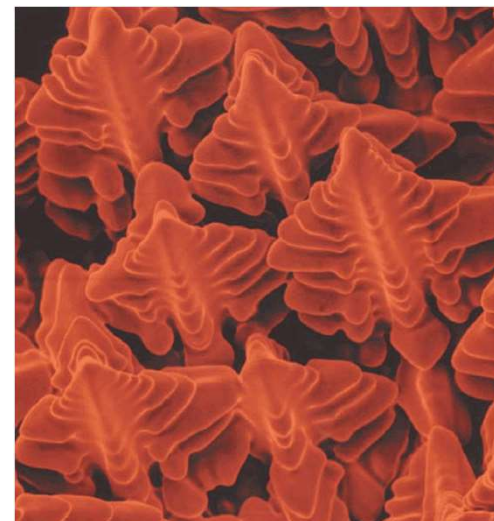


Figyelem!

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



FÁZISÁTALAKULÁSOK

GERZSON MIKLÓS

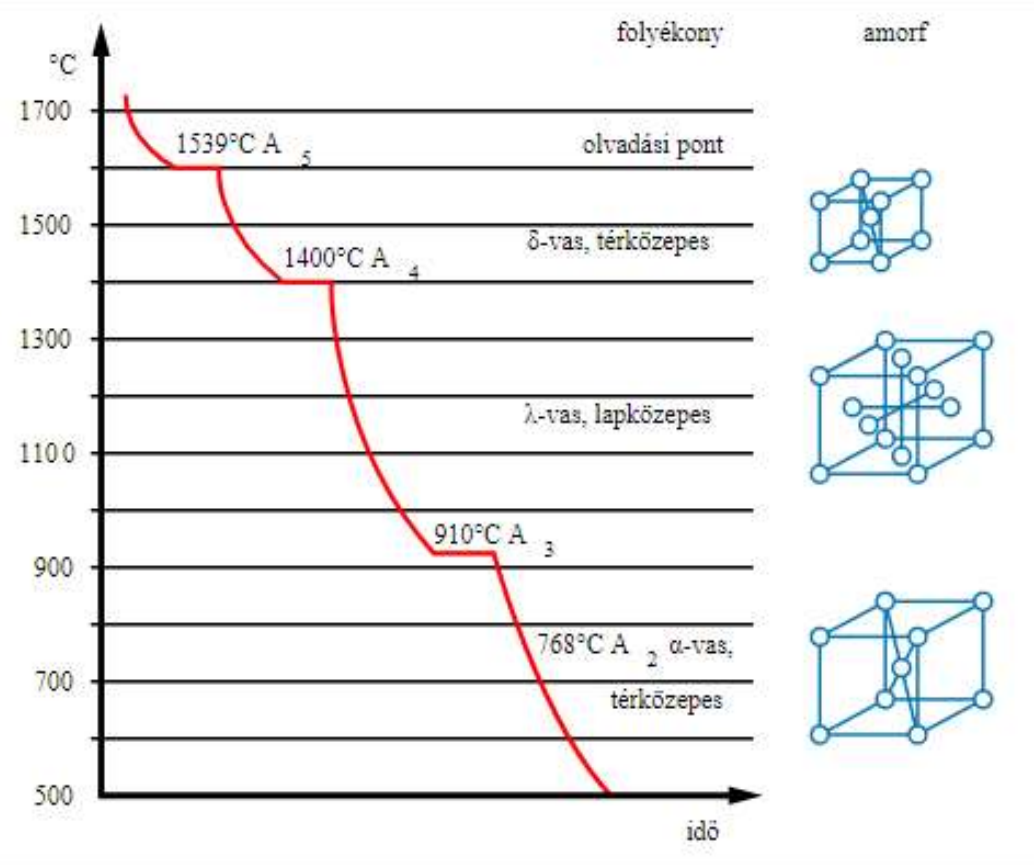
Külső tényezők hatása a kristályszerkezetre

- ugyanannak az anyagnak többféle kristályszerkezete lehet függően:
 - hőmérséklettől
 - nyomástól
 - az előállítás módjától
 - esetleges idegen anyagoktól
- az ón (Sn) szerkezete
 - alacsony hőmérsékleten gyémántrács
 - 13,2°C felett tetragonális szerkezet

Külső tényezők hatása a kristályszerkezetre

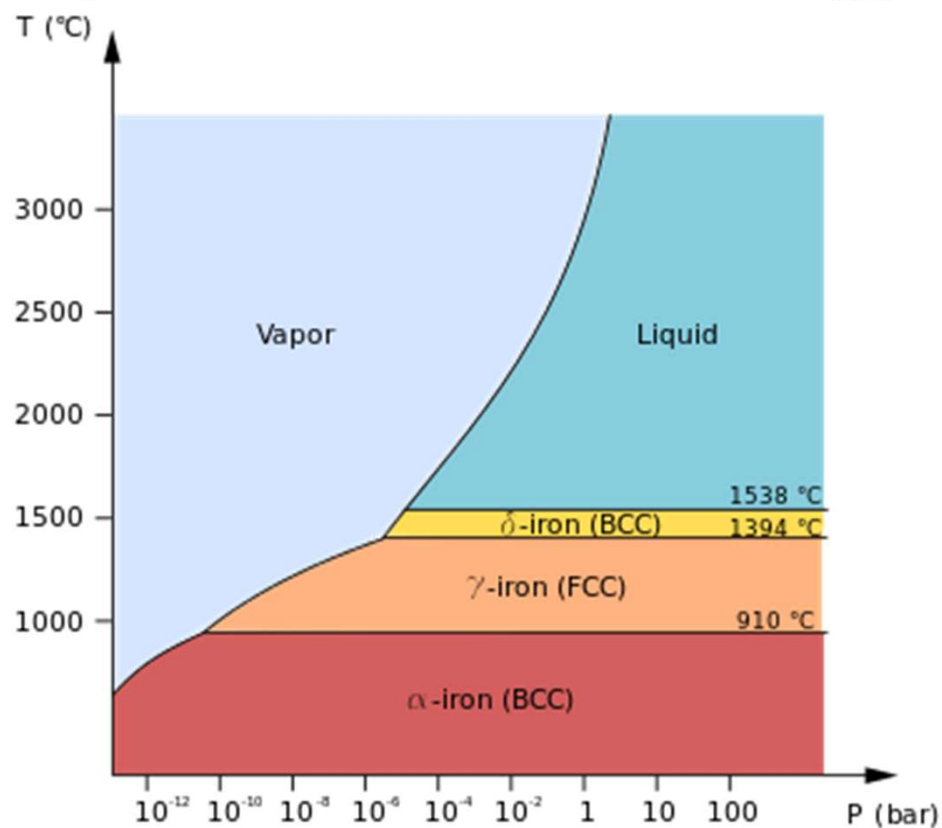
- a vas (Fe) esetében ez még sokfélebb

- 1539°C olvadáspont
- 1400 -1539 °C között térben középpontos δ -vas
- 910 – 1400 °C: felületen középpontos γ -vas
- 910°C alatt térben középpontos α -vas
- 768°C felett paramágnes alatta ferromágnes



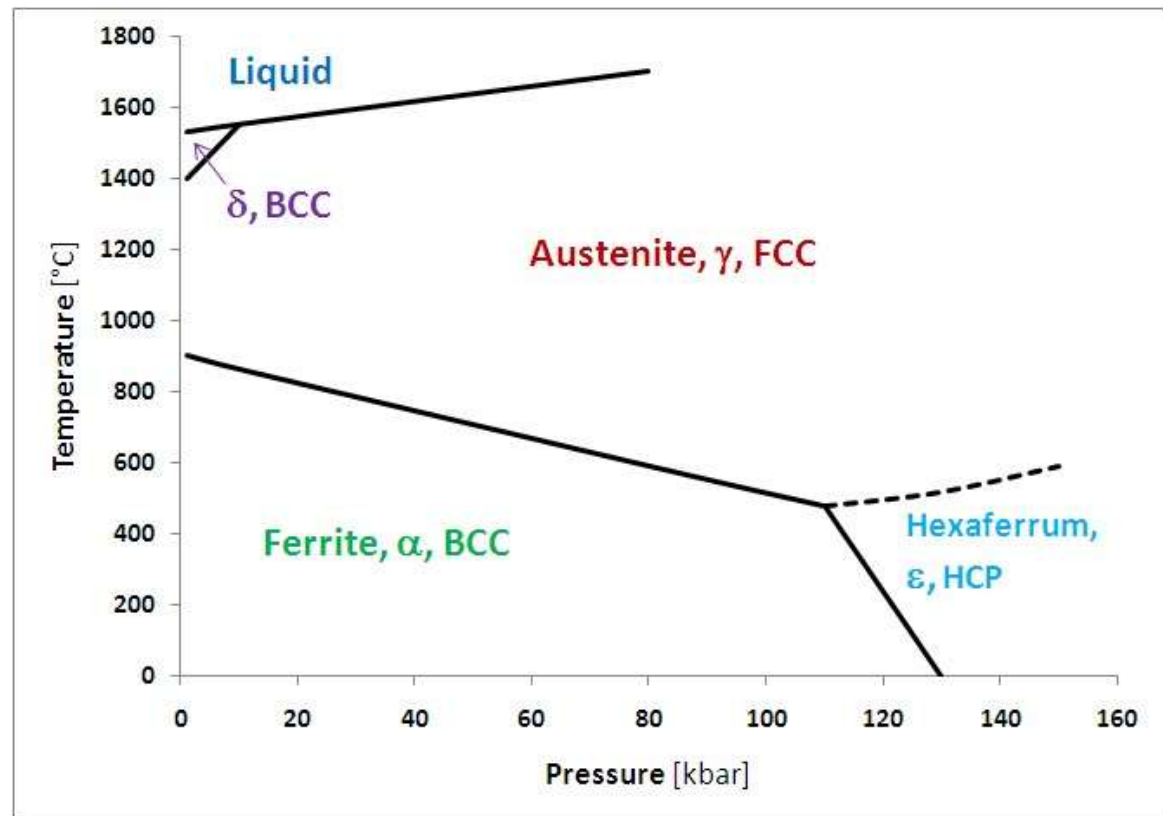
Külső tényezők hatása a kristályszerkezetre

- A vas fázisai a nyomás és a hőmérséklet függvényében

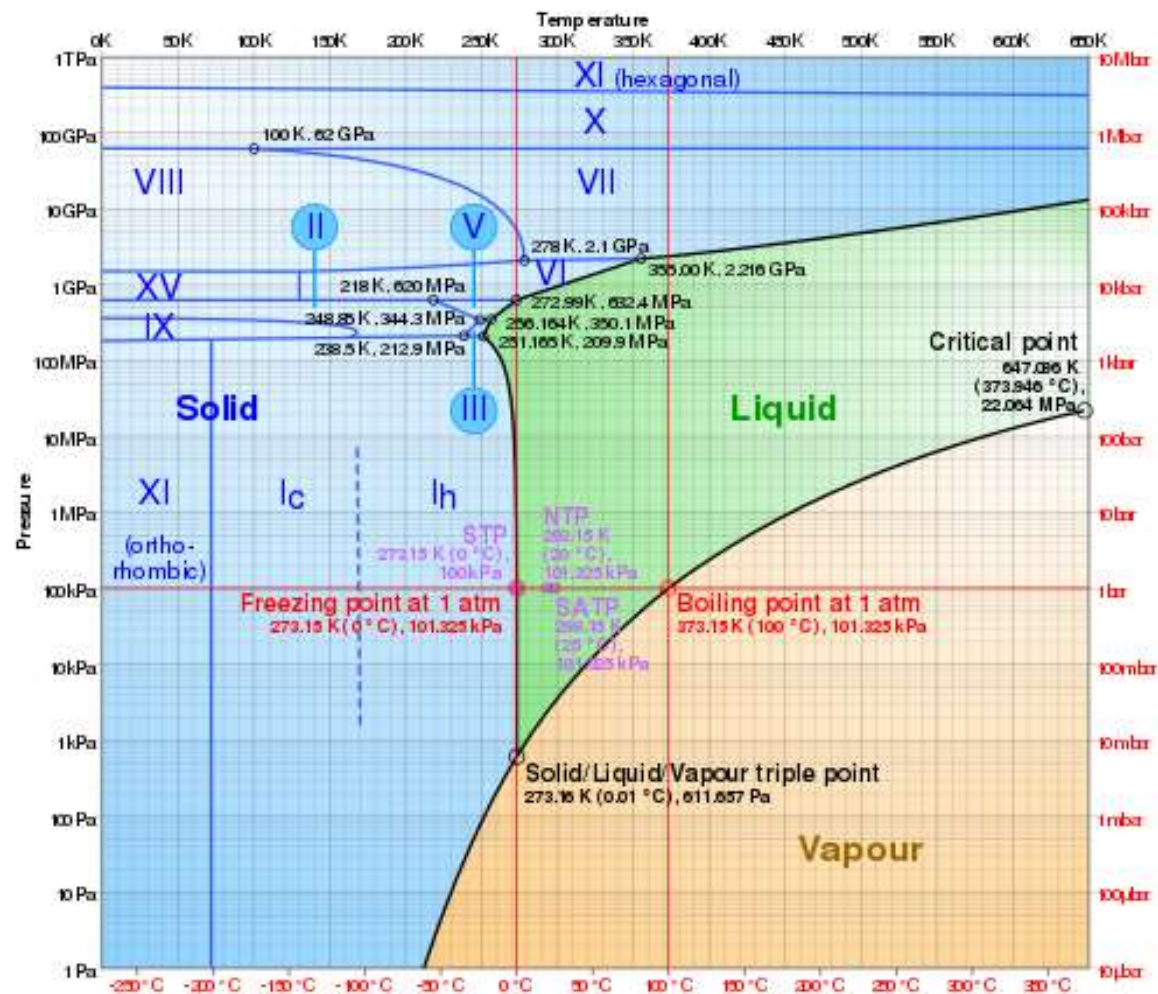


Külső tényezők hatása a kristályszerkezetre

- nagy nyomáson újabb átalakulás játszódik le:
hexagonális
kristályszerkezet
jön létre, ϵ -vas
(geológiai jelentőség)
- vasmódosulatok:
 - ferrit,
 - ausztenit
 - hexaferrum



Víz fázisdiagramja



Külső tényezők hatása a kristályszerkezetre

- előállítási módtól függés:
 - volfrám (W) esetében
 - ha WO_3 -ból állítják elő hidrogénes redukcióval, akkor térben középpontos szerkezetű
 - ha megváltoztatják a redukció körülményeit, akkor felületen középpontos szerkezetű

Külső tényezők hatása a kristályszerkezetre

allotróp átalakulás: szilárd halmazállapotban bekövetkező fázisátalakulás: megváltozik a kristályszerkezet

- tipikusan jellemző az allotróp átalakulás az átmeneti fémekre, mivel ezek több, csak részben betöltött főkvantumszámú elektronhéjjal rendelkeznek
 - (n) s - és p -pályák; $(n-1)$ d -pályák, $(n-2)$ f -pályák
- a kristályszerkezet hatással van
 - fizikai tulajdonságokra
 - ötvözhetőségre

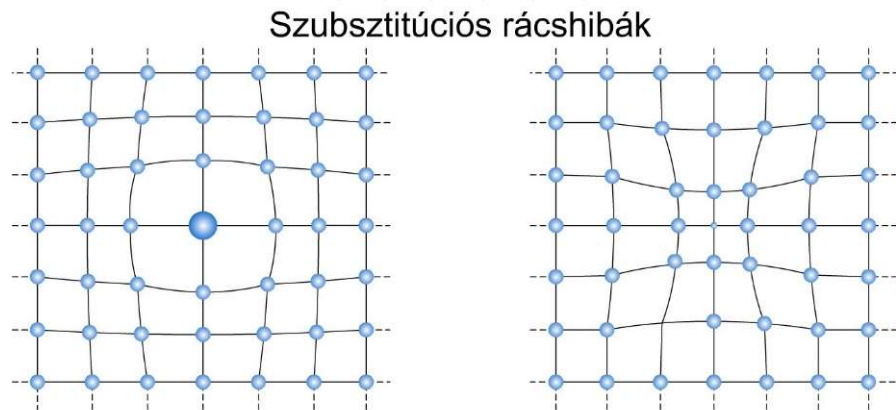
Ötvözetek szerkezete

Ötvözet: két vagy több kémiai elemből álló anyag – szilárd oldat, az *alkotók* – komponensek – elsősorban fémes elemek

- kismennyiségű idegen anyag hatása a kristályszerkezetre
 - ha az alapfém és az ötvöző közelítőleg megegyező méretű
 - az ötvöző sokkal kisebb méretű

Ötvözetek szerkezete

- **szubsztitúciós oldat** akkor jöhet létre, ha
 - az alapfém és az ötvöző anyag rácsszerkezete azonos
 - az atomátmérők között ne legyen nagy különbség
 - az alapfém és az ötvöző vegyértéke azonos
 - nincs lényeges elektrokémiai potenciálkülönbség
- korlátlan oldódású szubsztitúciós szilárd oldatok:
 - Cu – Ni
 - Au – Ag



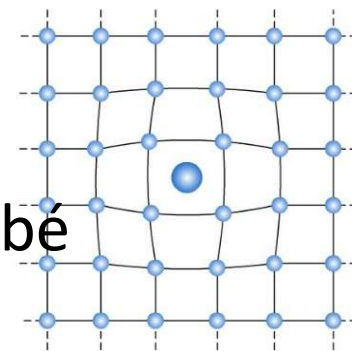
Ötvözetek szerkezete

- példa réz (Cu) és kismennyiségű ón (Sn) ötvözetének kristályszerkezete:
 - az Sn atom átmérője 26%-kal nagyobb
 - az ötvözet megőrzi a Cu felületen középpontos szerkezetét,
 - a kristályszerkezetbe szabályosan, a Cu helyére épül be az Sn
 - de az elemi cellák átlagos mérete növekszik az Sn mennyiségének függvényében

Ötvözetek szerkezete

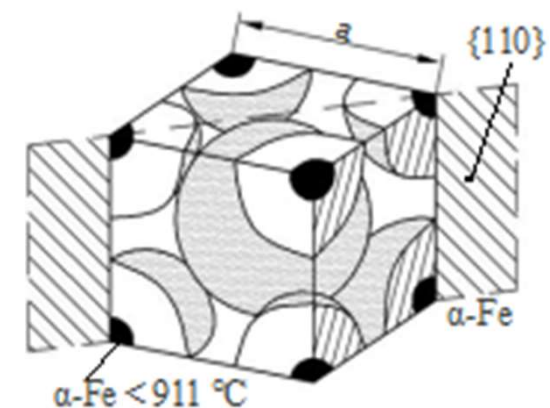
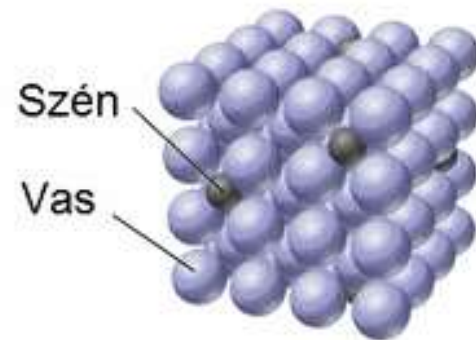
- **intersztíciós szilárd oldat** jön létre:
 - ha az ötvöző sokkal kisebb méretű, akkor az idegen atomok a rácshézagokba illeszkednek bele
hidrogén (H), szén (C), nitrogén (N), oxigén (O), bór (B)
 - a rácsállandók ekkor is növekednek
 - nagy atomátmérő (Mo, Ta) → nagy hézag → egyszerű, stabilabb szerkezet
 - kis atomátmérő (Fe, Ni) → kis hézag → kevésbé stabil, bonyolult szerkezet

Intersztíciós rácshiba



Ötvözetek szerkezete

- példák:
 - térben középpontos vas (α -Fe) és szén
 - a α -Fe atomok $\sim 40\%$ -kal nagyobbak, mint a C atomok
 - az α -Fe rácshézagai viszont sokkal kisebbek, mint a C $\rightarrow$ kevés szén tud oldódni a Fe-ban



Ötvözetek szerkezete

- az ötvöző anyagok eloszlása az alapfémekben kétféle lehet:
 - statisztikusan rendezetlen
 - *rendezett rácsú szilárd oldat*
 - az idegen atomok csak meghatározott rácspontokon találhatók
 - meghatározott körülmények között jön létre: ha az atomfajták úgy aránylanak egymáshoz, mint a kis egész számok (pl. 1:1, 3:1)
 - alacsony hőmérsékleten stabilak
 - példák: Fe – Al, Fe – Ni

Ötvözetek szerkezete

- ötvözetek tulajdonságai:
 - az ötvöző atomok nem illeszkednek tökéletesen az alapfém rácsszerkezetébe
 - a maradandó alakváltozáshoz nagyobb erő kell
 - példa színfém vas – acél

Ötvözetek szerkezete

- az ötvözet szilárd oldat, az alkotók között nincs közvetlen kémiai kapcsolat, kötés
- speciális esetben létrejöhetnek fémvegyületek, más néven *intermetallikus vegyületek*
- a fémvegyület kristallitjai színfémbe vagy szilárd oldatba ágyazódva fordulnak elő

Ötvözetek termikus vizsgálata

- anyagszerkezeti vizsgálatok célja:
 - milyen feltételek mellett milyen szerkezet alakul ki → termodinamika
 - a kialakult szerkezetnek milyenek a tulajdonságai → anyagszerkezettan / kvantummechanika
- vizsgált tulajdonságok
 - szerkezetérzékeny tulajdonságok → mechanikai tulajdonságok
 - szerkezetérzéketlen tulajdonságok → villamos tulajdonságok

Alapfogalmak

termikus analízis: anyagok viselkedésének vizsgálata a hőmérséklet függvényében

termodinamikai rendszer: a térnek egy jól körülhatárolt, elszigetelt része

fázis: a rendszernek egy körülhatárolt, *fázishatárral* elválasztott része, melyen belül a fizikai és kémiai tulajdonságok azonosak

- egy rendszer lehet egy fázisú vagy több fázisú
- a fázisok lehetnek azonos és különböző halmazállapotúak
- *heterogén rendszer*: több fázisú rendszer

Alapfogalmak

a rendszer is és a fázis is lehet

- *homogén*: a tulajdonságok, állapotjelzők minden pontban azonos értékűek
- *inhomogén* a tulajdonságok, állapotjelzők értéi a helytől függnnek

egy rendszer vagy fázis *többkomponensű*, ha többféle atomot vagy molekulát tartalmaz

- az *alkotók száma* azoknak az atom- vagy molekula-fajták legkisebb száma, melyből a rendszer felépíthető

Termodinamikai egyensúly

egyensúly fogalma

- mechanikai egyensúly: nyugalom, egyenes vonalú egyenletes mozgás
- kémiai egyensúly: nincs észlelhető reakció
- termikus egyensúly: két test között nincs hőátadás
- *termodinamikai egyensúly*: a rendszer *szabadenergiája* adott feltételek mellett minimális

Termodinamikai egyensúly

szabadenergia fogalma:

$$F = U - TS$$

F – a (Helmholtz-féle) szabadenergia

U – belső energia: a rendszer alkotó részecskék kinetikus és potenciális energiájának összege

T – abszolút hőmérséklet

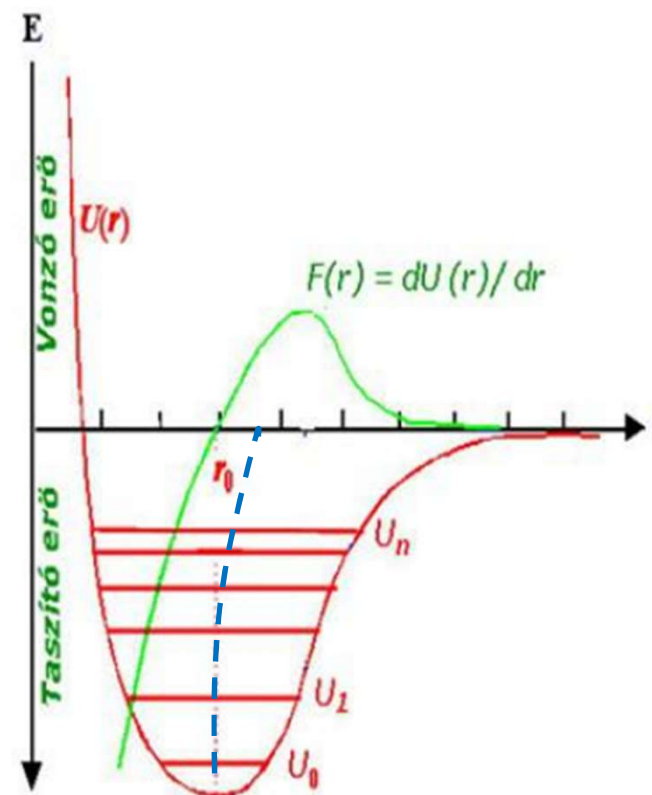
S – entrópia – rendezetlenség mértéke:

egykomponensű rendszer: a belső energia eloszlása a rendszerben lévő részecskéken

többkomponensű rendszer: a különböző fajtájú részecskék eloszlása

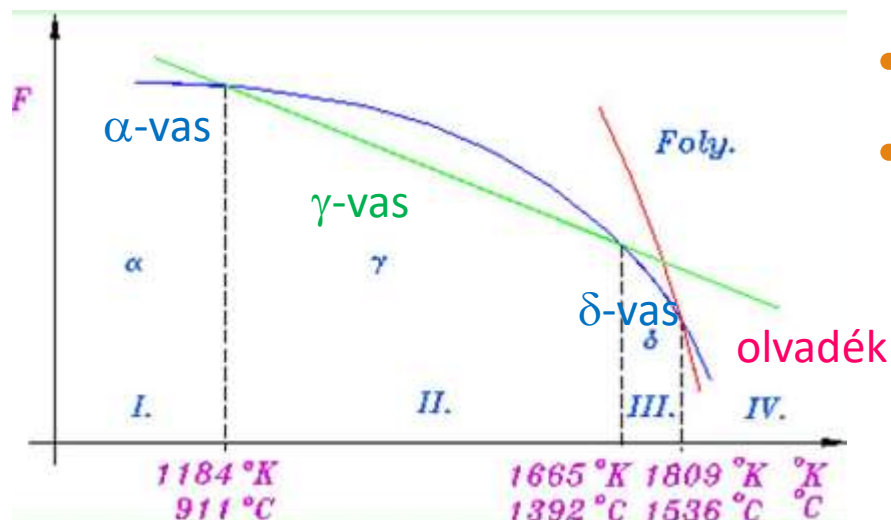
Termodinamikai egyensúly

- $F(r)$ – két szomszédos atom közötti erő a távolság függvényében
- $U(r)$ – két szomszédos atom közötti potenciális energia
- átlagos egyensúlyi helyzet



Termodinamikai egyensúly

- egykomponensű rendszerek termodinamikai egyensúlya:
 - csak akkor van két fázis szabadenergiája egyensúlyban, ha a szabadenergiájuk egyenlő
 - ha ez nem teljesül, akkor a nagyobb szabadenergiájú fázisnak el kell tűnnie



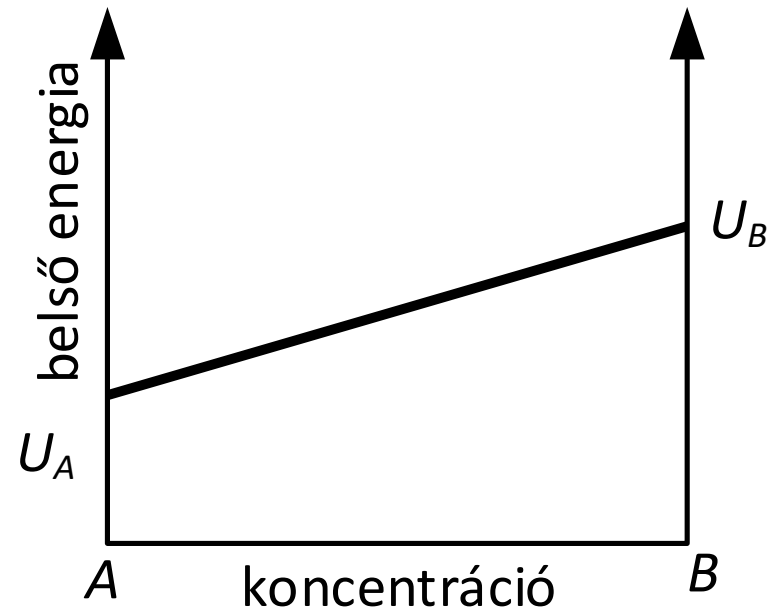
- a vas szabadenergia görbéi
- létezik egyidejűleg pl. szilárd és folyadék fázis az olvadáspont alatt néhány fokkal, de az nem egyensúlyi rendszer

Termodinamikai egyensúly

- egykomponensű rendszernél
 - az a fázis stabil, amelyiknek kisebb a szabad energiája
 - egyensúlyi rendszerben csak akkor lehet két fázis, ha a szabadenergiájuk egyenlő
- többkomponensű rendszerek esetében
 - lehetséges, hogy egyensúlyi rendszerben a fázisok szabadenergiája nem egyenlő
 - az egyensúly feltétele az, hogy a *rendszer szabadenergiája* legyen *minimális*

Termodinamikai egyensúly

- a rendszer szabadenergiája az egyes fázisok szabadenergiáinak az összege
- a koncentráció belép új változóként
- a koncentráció és a belső energia közti kapcsolat *ideális oldat* esetén



Termodinamikai egyensúly

- reális oldatoknál ez a lineáris összefüggés nem érvényes, mert keveredési entrópia lép fel:

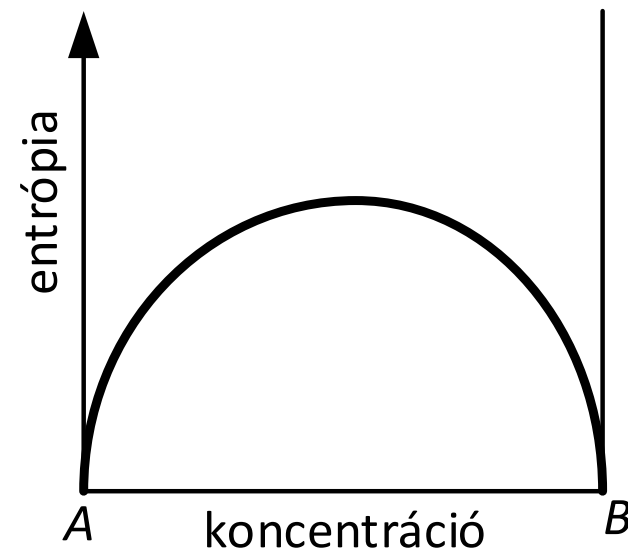
$$S_k = -kN(C_A \ln C_A + C_B \ln C_B)$$

ahol N a rácshelyek száma, k a Boltzmann állandó

ha N mólnyi mennyiség,

és $C_A = 0,5$ akkor

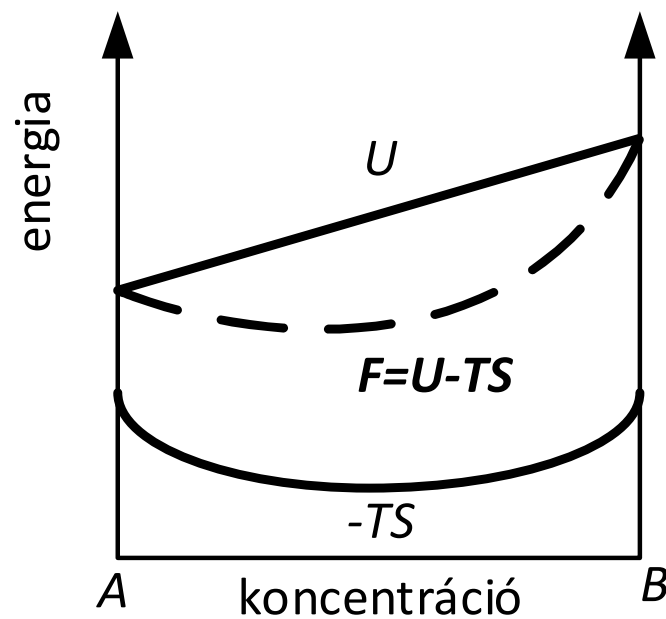
$$S_{kmax} = 5,76 \text{ J/(K mol)}$$



Termodinamikai egyensúly

a szabadenergia függése a koncentrációtól:

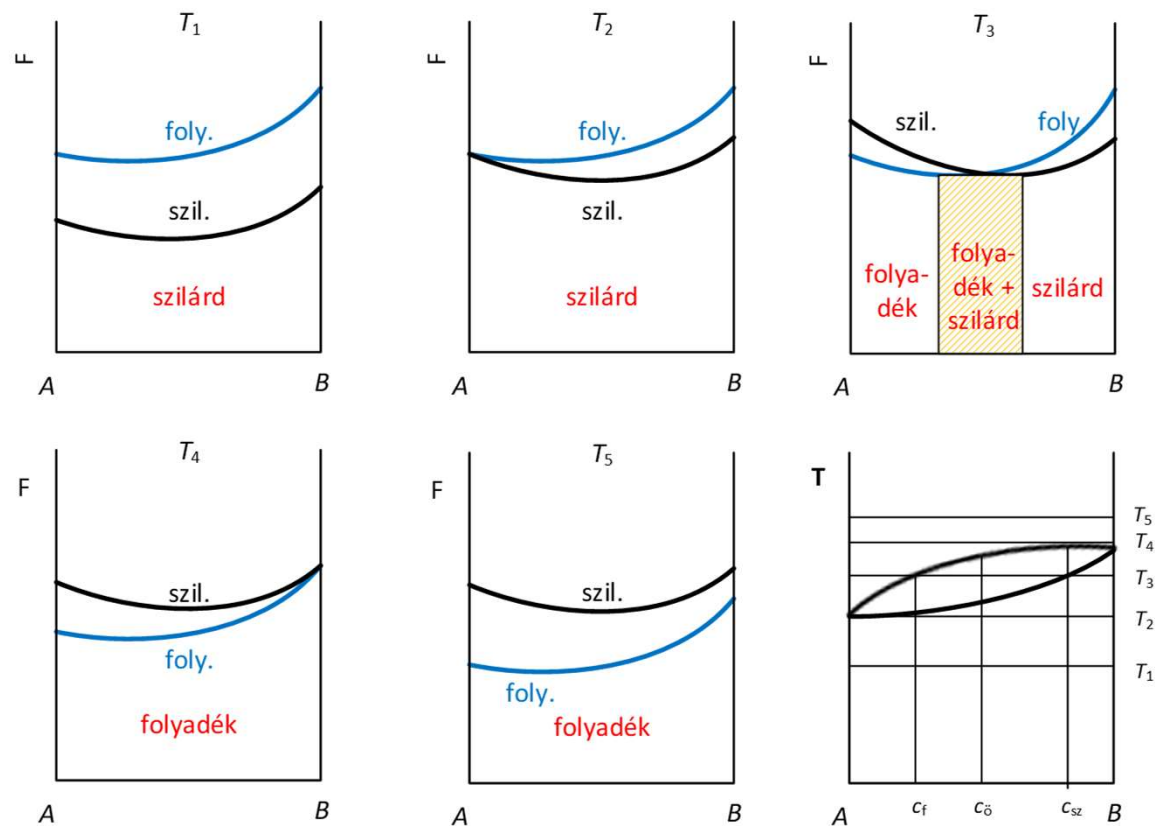
$$F = U - TS$$



Termodinamikai egyensúly

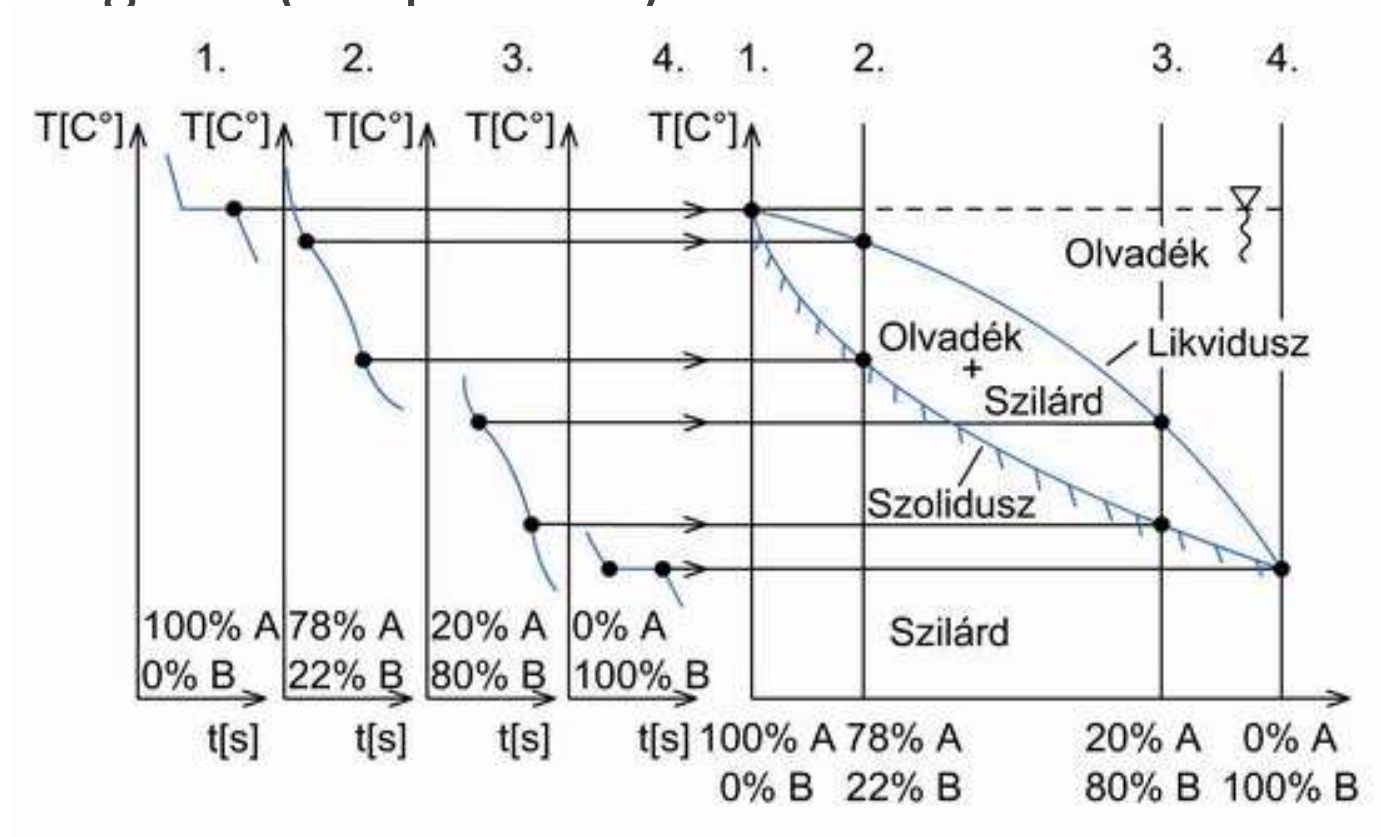
kétkomponensű ötvözet szabadenergia görbéi

stabil fázis



Termodinamikai egyensúly

Fázisdiagram (állapotábra) szerkesztése



Termodinamikai egyensúly

kétfázisú tartományban az ötvözet szabadenergiáját megadó összefüggés:

$$F_{\ddot{o}} = F_{sz} + (F_f + F_{sz}) \frac{c_{\ddot{o}} - c_{sz}}{c_f - c_{sz}}$$

ahol F_f , F_{sz} , $F_{\ddot{o}}$ a folyadék, a szilárd fázis ill. az ötvözet szabadenergiája

c_f , c_{sz} , $c_{\ddot{o}}$ a folyadék, a szilárd fázis ill. az ötvözet egyensúlyi koncentrációja

Termodinamikai egyensúly

a folyadék és szilárd fázis mennyiségeinek arányát az „emelő szabály” határozza meg:

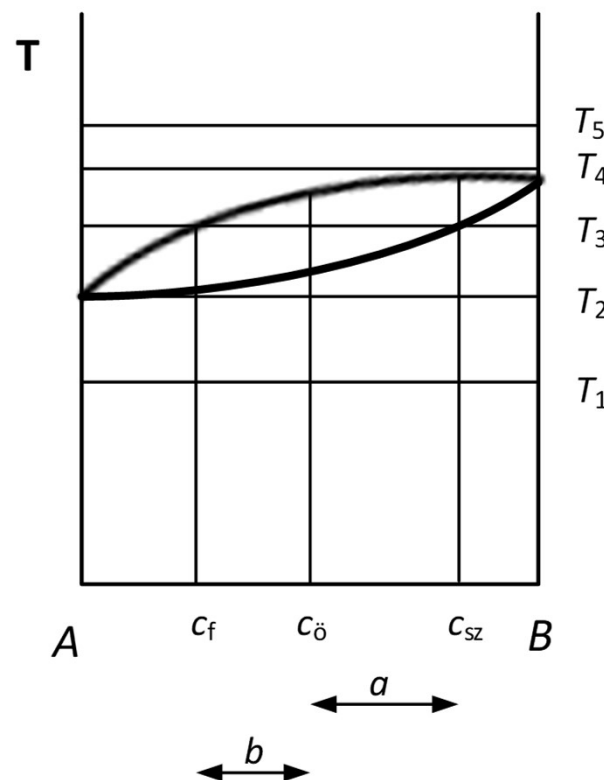
$$x \cdot b = (1 - x) \cdot a$$

ahol

x a folyadék fázis aránya

$$a = c_{\text{ö}} - c_{\text{sz}}$$

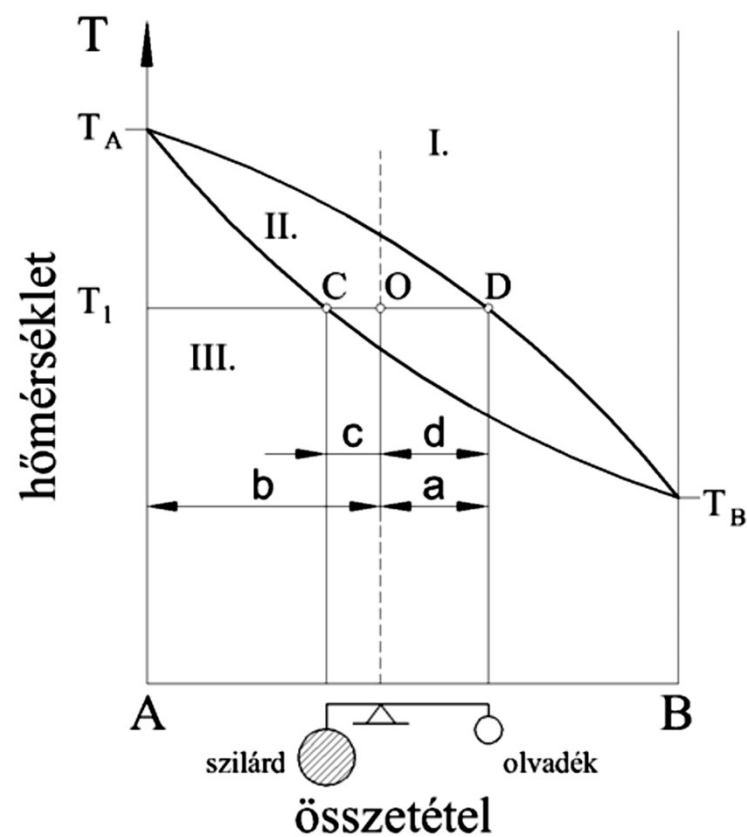
$$b = c_f - c_{\text{ö}}$$



Termodinamikai egyensúly

- emelő- (mérleg) szabály

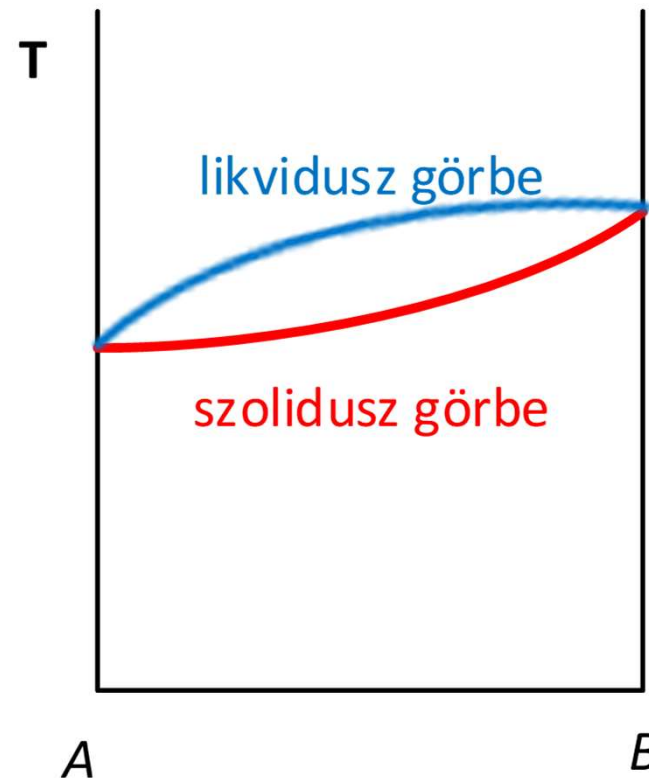
$$\frac{\text{szilárd fázis}}{\text{folyadék fázis}} = \frac{x}{1-x} = \frac{d}{c}$$



Fázisdiagramok

kétalkotós ötvözet *egyensúlyi diagramja* vagy *állapotábrája*, *fázisdiagramja*

- *likvidusz görbe*: kristályosodás kezdődik vagy olvadás befejeződik
- *szolidusz görbe*: olvadás kezdődik vagy kristályosodás befejeződik

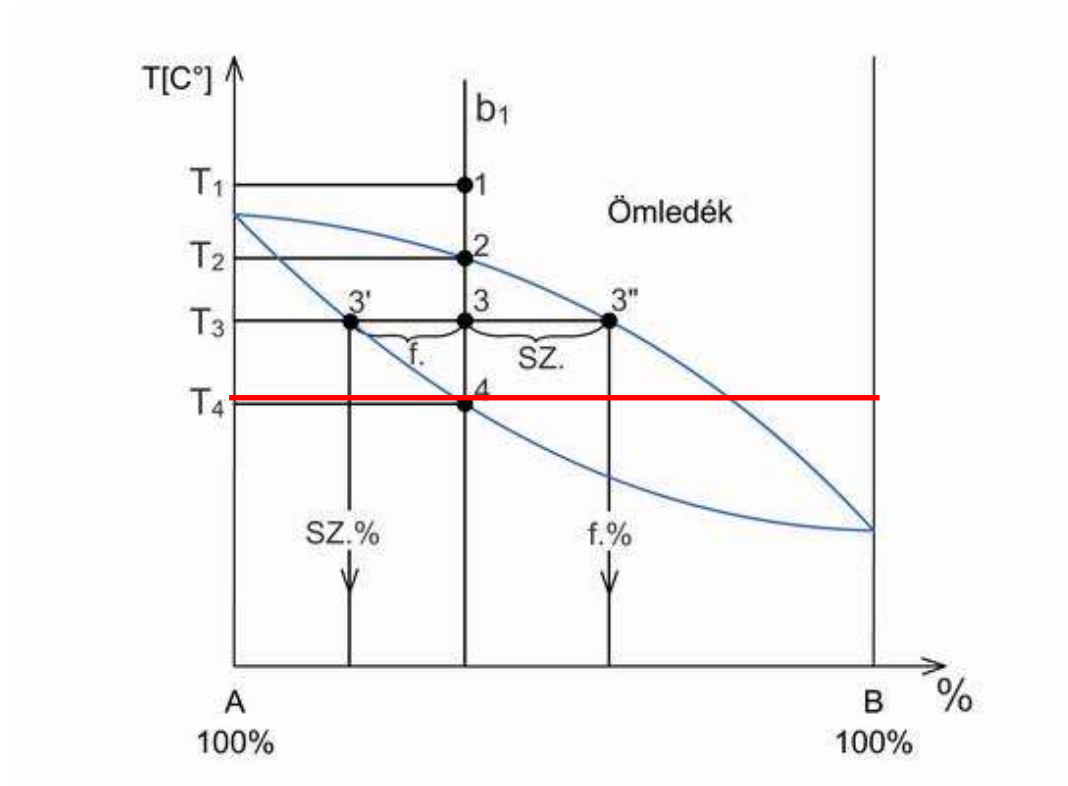


Fázisdiagramok

- a fázis diagramból kiolvasható adatok
 - adott hőmérsékleten a koncentráció függvényében az egyensúlyi fázis vagy fázisok és azok kémiai összetétele
 - tetszőleges összetételű ötvözetben a hőmérséklet függvényében az egyensúlyi fázisok koncentrációja
 - bármely ötvözetnél a fázisátalakulások kezdő és befejező hőmérséklete
 - minden ötvözetben minden hőmérsékleten az egymással egyensúlyt tartó fázisok egymáshoz viszonyított aránya

Fázisdiagramok

fázisdiagramból kiolvasható adatok



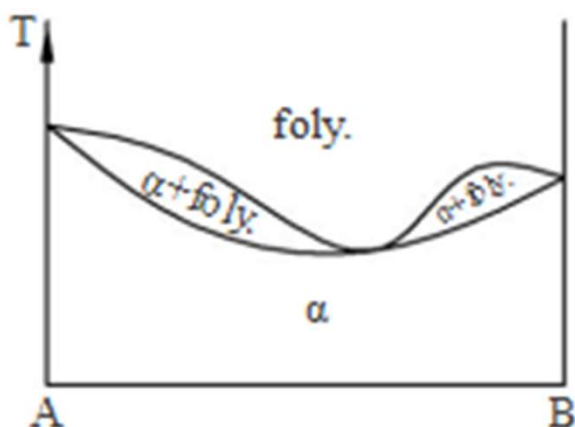
Fázisdiagramok

- ez a fázisdiagram olyan ötvözetekre igaz,
 - amelyeknél a két komponens mind szilárd, mind folyadék állapotban oldja egymást,
 - a komponensek kristályszerkezete egyforma
 - ilyen a Cu – Ni
- ha a kristályszerkezetek nem egyformák, akkor legalább három fázis létezik: egy folyadék és két szilárd, illetve intermetallikus vegyület is képződhet
(két vagy több fémes elem kristályos vegyülete, melyben az atomfajták mennyiségi arányát egyszerű egész számok adják meg)

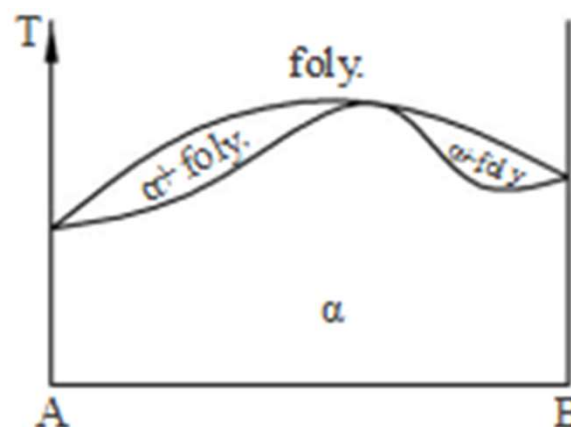
Fázisdiagramok

Fázisdiagram teljes oldhatóság és közeli olvadáspont esetén

szilárd fázis
görbülete nagyobb



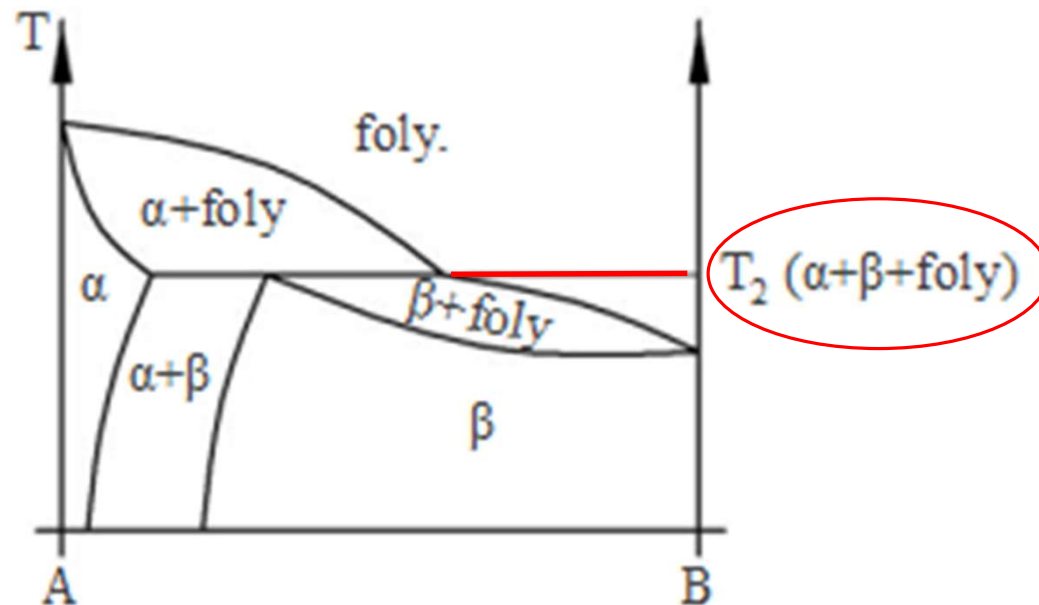
folyadék fázis
görbülete nagyobb



Fázisdiagramok

- **Peritektikus fázisdiagram**
 - eltérő kristályszerkezet, nagy olvadáspont-különbség
 - a T_2 *peritektikus hőmérséklet*en mindhárom fázis jelen van,
 - pl: W – Ti, Fe – C

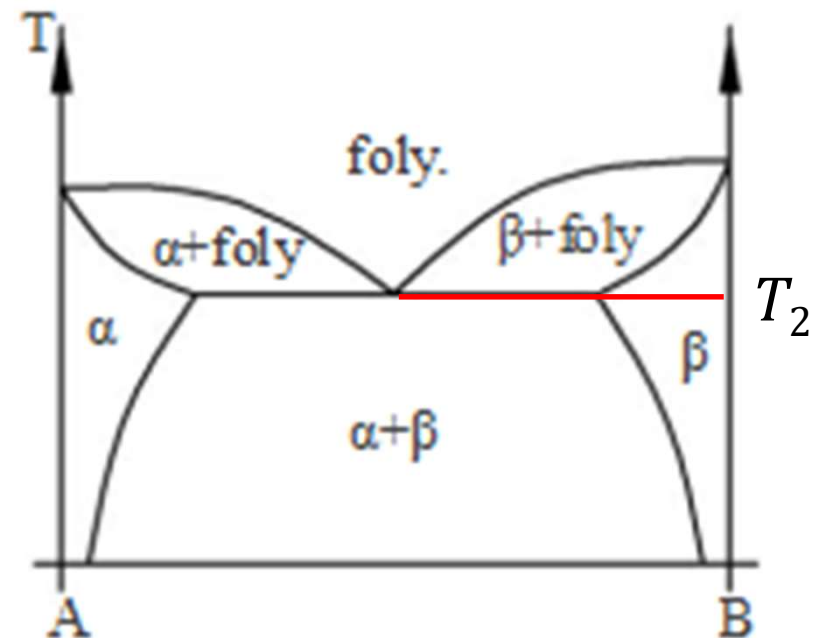
α , β - szilárd fázisok



Fázisdiagramok

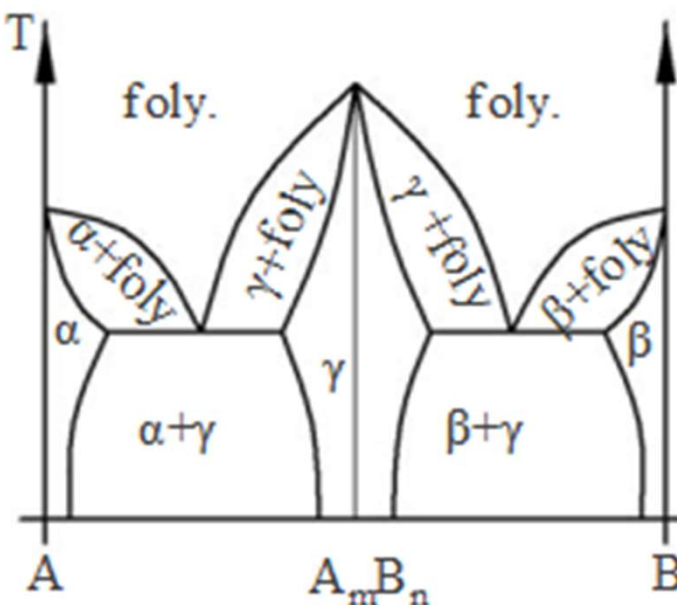
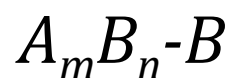
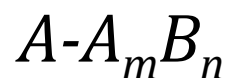
- Eutektikus fázisdiagram

- a két alkotó csak korlátozottan oldja egymást és a kristályszerkezetük is eltérő
- T_2 *eutektikus hőmérséklet*en mindhárom fázis jelen van
- az eltűnő fázis az ömledék
- pl Pb – Sn



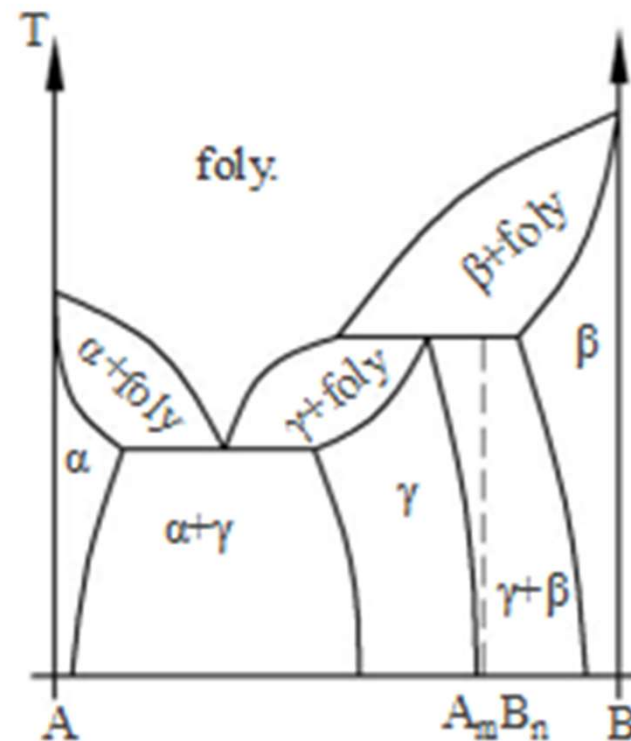
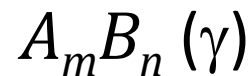
Fázisdiagramok

- Fázisdiagram **intermetallikus vegyületképződéssel** **olvadásfázisban**
- adott koncentrációnál képződő vegyület: A_mB_n (γ)
- felbontható két fázisdiagramra:



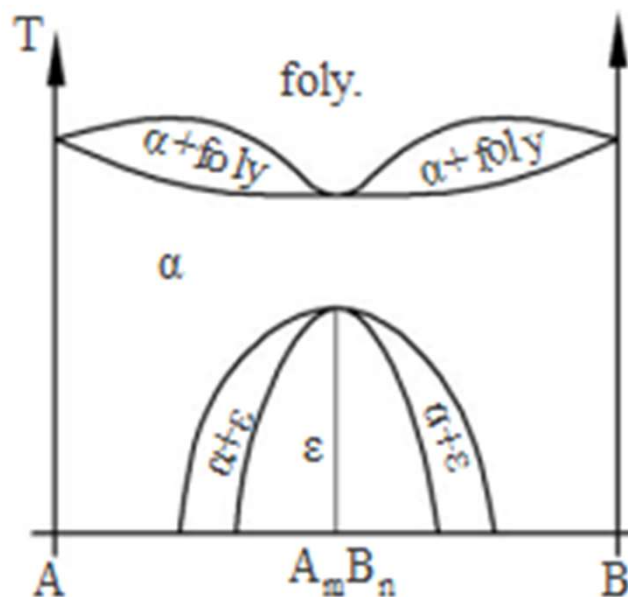
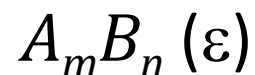
Fázisdiagramok

- fázisdiagram **intermetallikus vegyületképződéssel kétfázisú tartományban**
- a vegyület csak szilárd fázis és olvadék együttes jelenléte esetén képződik



Fázisdiagramok

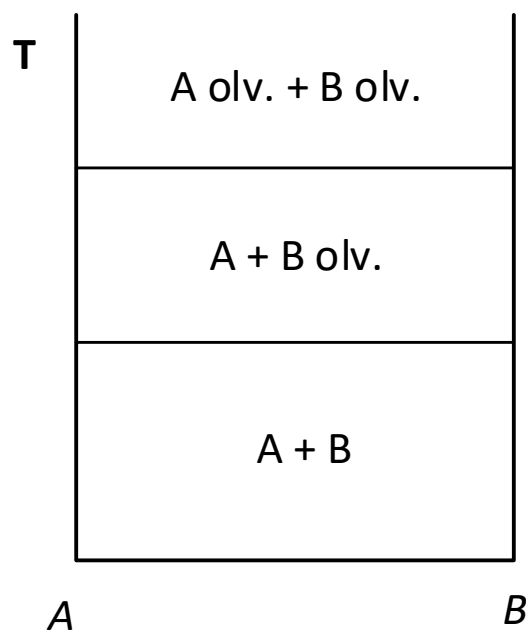
- fázisdiagram **intermetallikus vegyületképződéssel szilárd fázisban**
- a vegyület csak szilárd fázisban képződik



pl.: Fe-V
Au-Cu

Fázisdiagramok

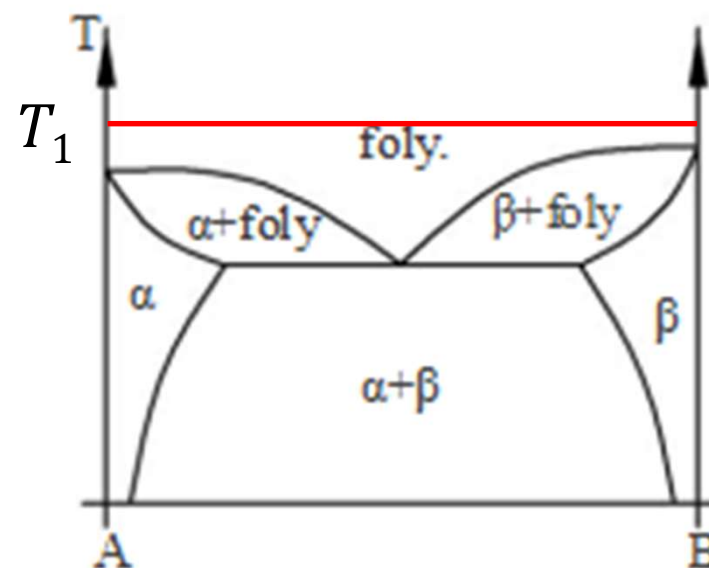
- a két alkotó nem oldja egymást sem olvadék sem szilárd állapotban



Szabadsági fok

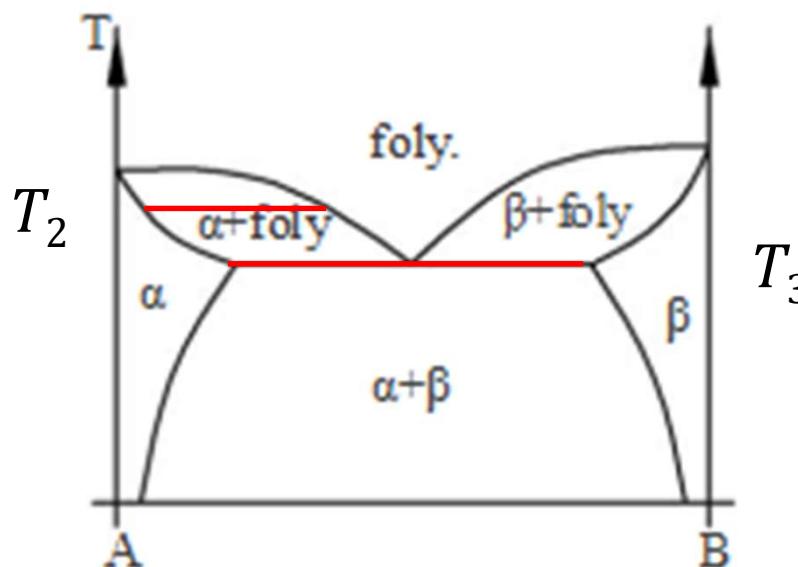
Szabadsági fok fogalma:

- kétalkotós rendszerben a változók: a két koncentráció és a hőmérséklet
- ha a rendszer egyfázisú, akkor a hőmérséklet és az egyik koncentráció szabadon megválasztható
pl. T_1 hőmérséklet és az A komponens koncentrációja



Szabadsági fok

- ha a rendszer kétfázisú csak egy változó választható meg szabadon: T_2 hőmérsékleten adott a szilárd fázis összetétele
- ha a rendszerben mind a három fázis jelen van (T_3 hőmérséklet), akkor azok koncentrációi és hőmérséklete adott, nincs szabadon választható változó



Szabadsági fok

szabadon választható változók száma $\rightarrow$ termodinamikai szabadsági fok

Gibbs-féle fázisszabály:

$$Sz = K - L + 1$$

ahol

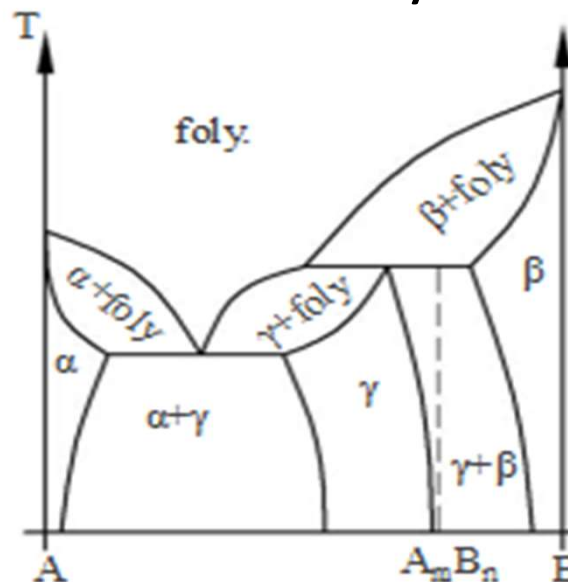
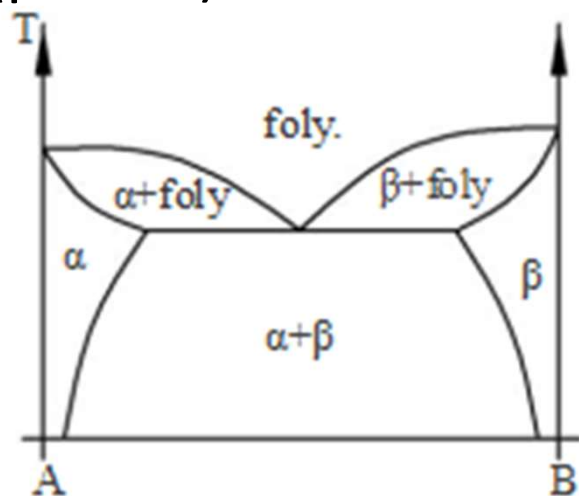
Sz – a szabadsági fokok száma

K – az alkotók száma

L – a fázisok száma

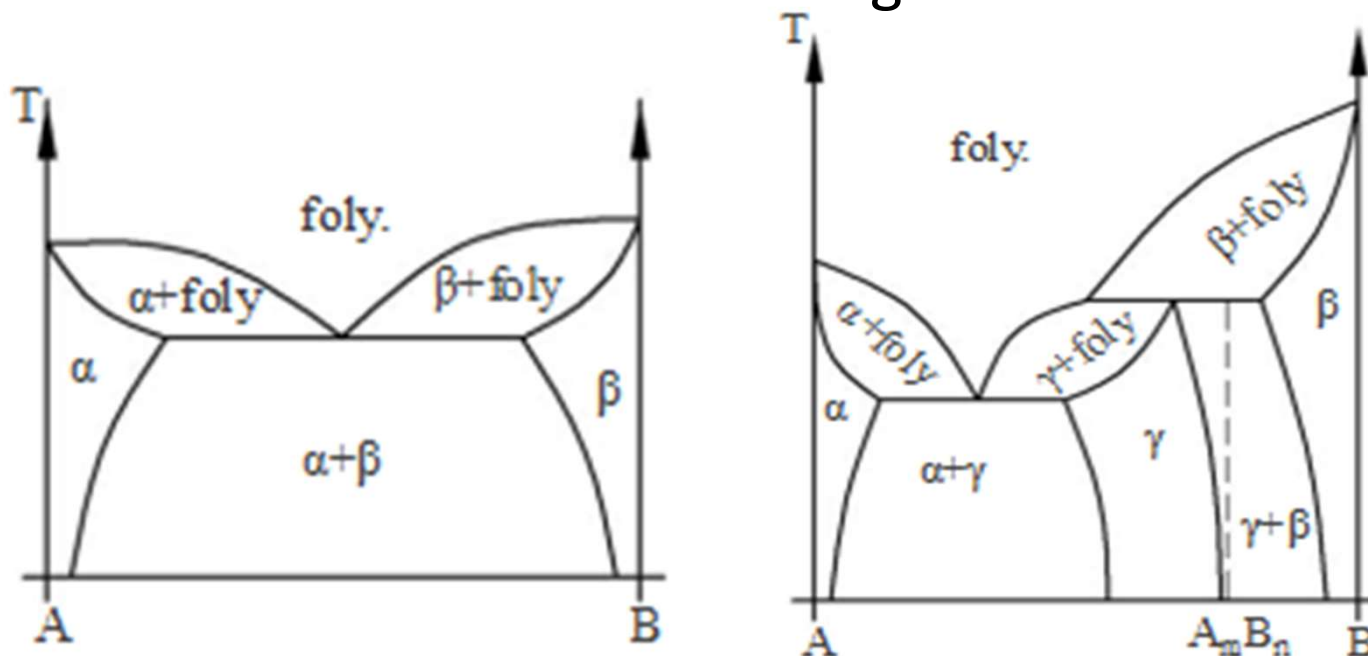
Fázisdiagramok

- általánosítható összefüggések:
 - likvidusz csak görbe szakaszokból áll folyékony állapotban korlátlan oldódás
 - likvidusz ágainak száma = olvadékból kristályosodó (primer) fázisok száma



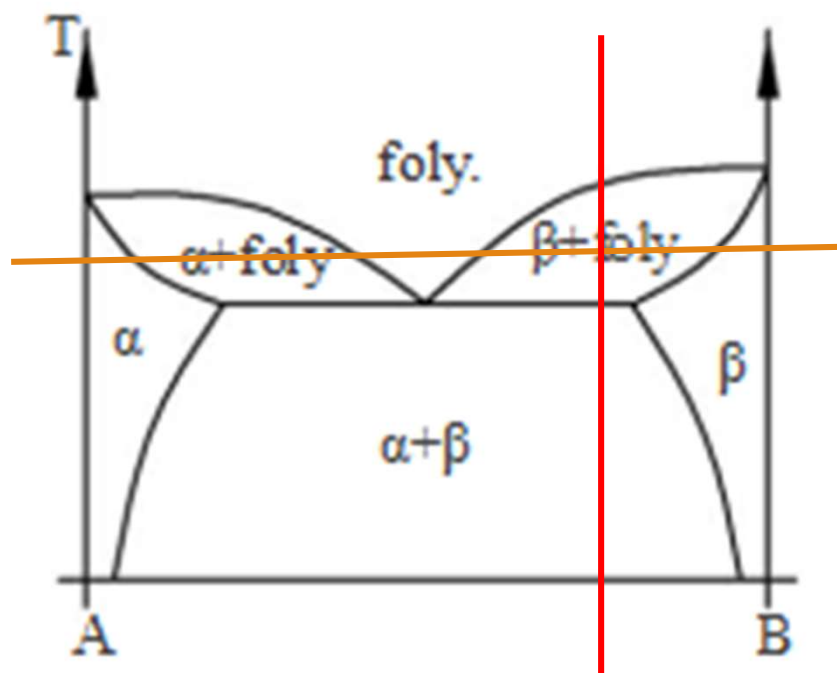
Fázisdiagramok

- szilárd állapotbeli oldóképesség szolidusz alakja
 - szolidusz görbe alatta homogén mező
 - szolidusz vízszintes alatta heterogén mező



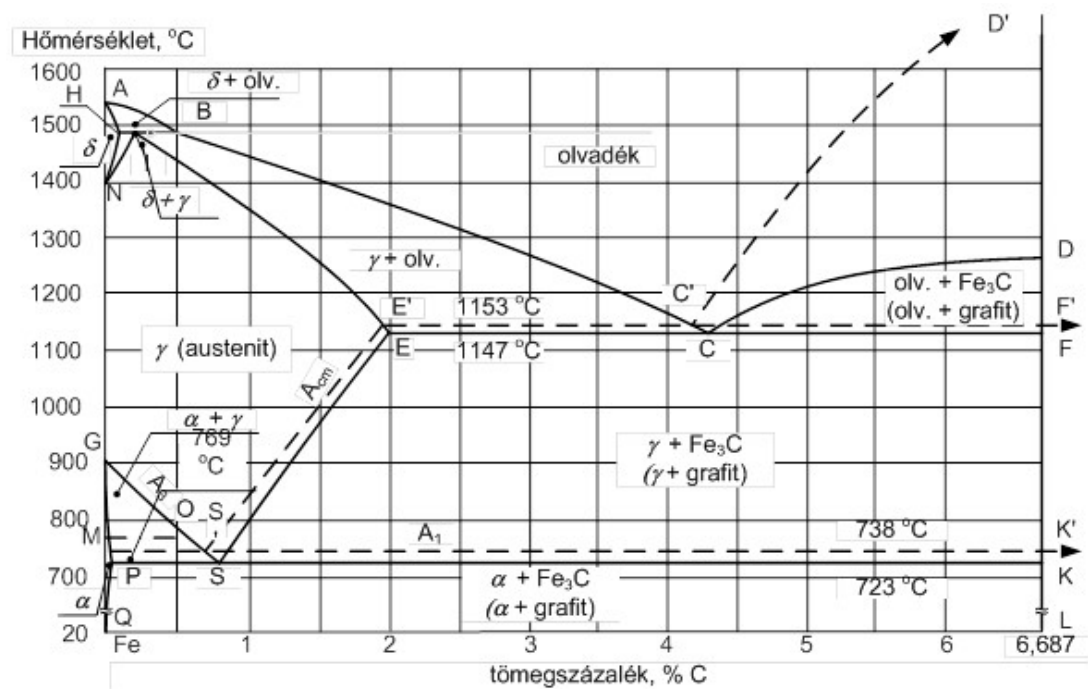
Fázisdiagramok

- a diagram vonalait metszve a fázisok száma eggyel változik



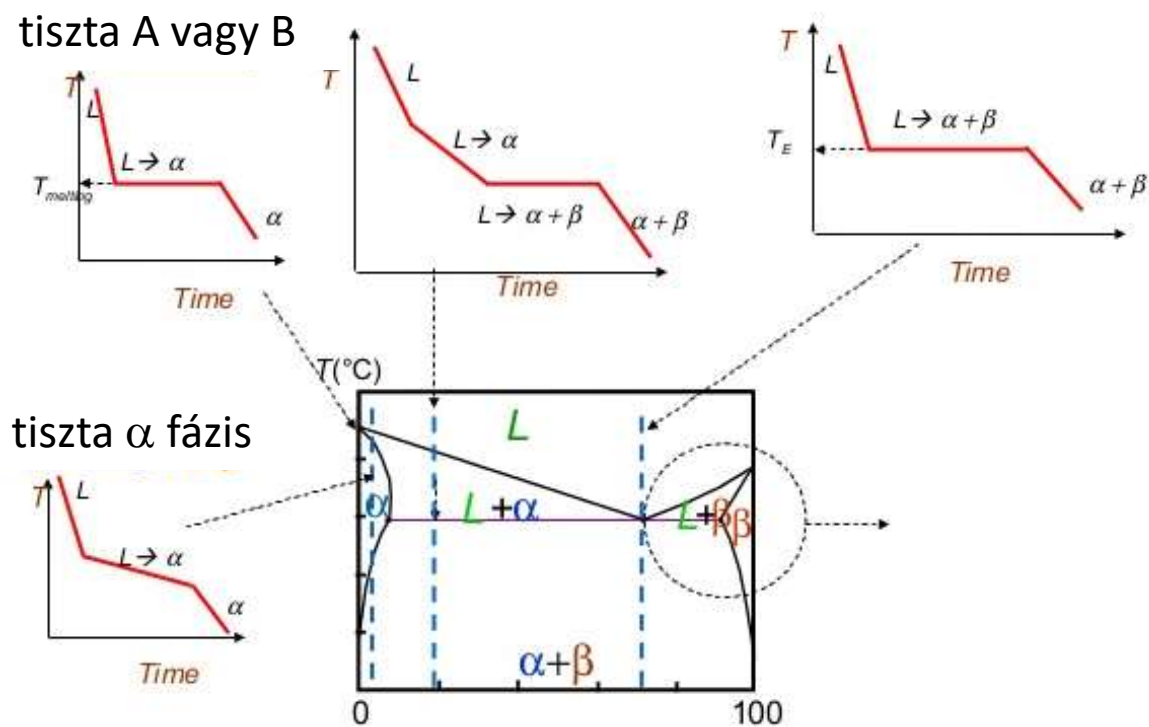
Fázisdiagramok

- Acél ikerdiagramja - két diagram együttese
 - vas-vaskarbid és vas-grafit (szaggatott)



Fázisdiagramok

- A fázisdiagram és a lehűlési görbék kapcsolata



Intermetallikus vegyületek

- Intermetallikus vegyületek
 - két vagy több fémes elem **kristályos vegyülete**, melyben az atomfajták mennyiségi arányát egyszerű egész számok adják meg
 - intermetallikus vegyület a **két fém meghatározott arányban van jelen**, köztük **kötés alakul ki**
- Ötvözet: szilárd oldat, az „oldószer” fém az oldhatósági korlátnál nagyobb mennyiségben van jelen, az arányuk tetszőleges, gyenge másodlagos kötések vannak közöttük

Intermetallikus vegyületek

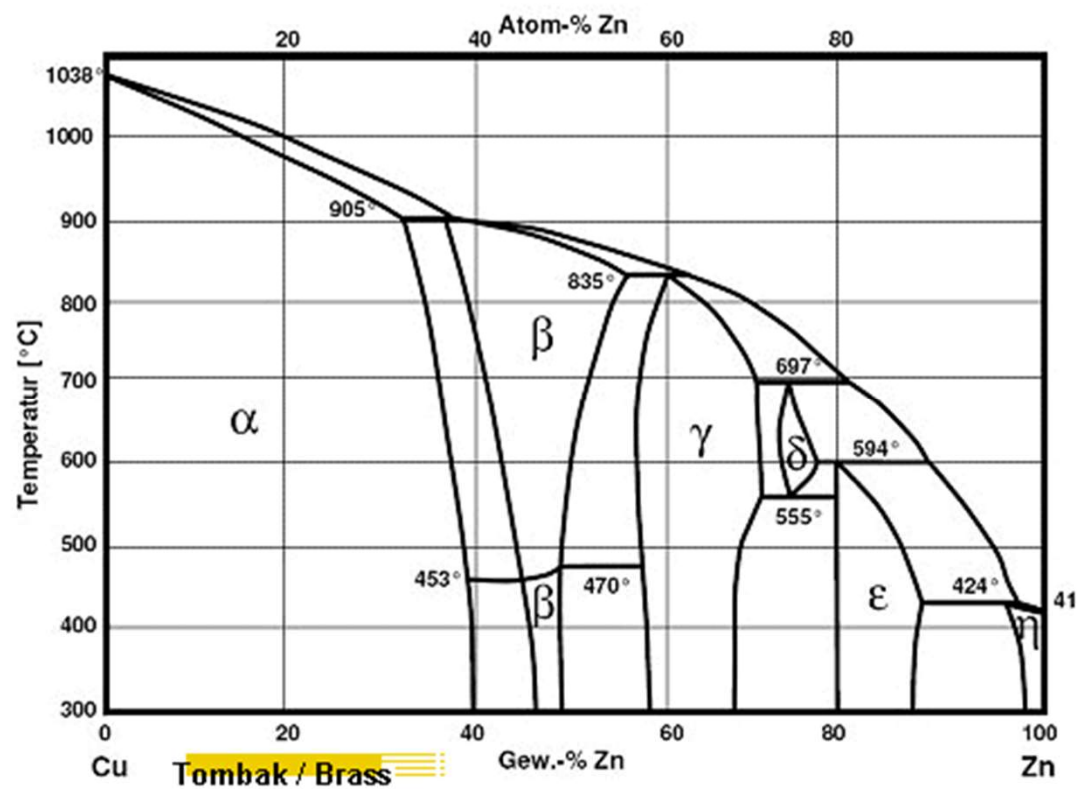
- *intermetallikus* vegyületek kristályszerkezete bonyolult, eltér a komponensek kristályszerkezetétől, a vegyület krisztallitja a színfémbe vagy az ötvözetbe ágyazódnak, de maguk is oldhatnak idegen atomokat vagy komponenst
- az összetételük megadható meghatározott kémiai vegyületként, de az többé-kevésbé széles tartományban változhat
- áramot kevésbé jól vezetnek és kevésbé rugalmasak, mint a színfémek, könnyen törnek

Intermetallikus vegyületek

- intermetallikus vegyületekben létrejövő kötés átmenet az ionos és fémes kötés között
 - ionos jellegű a viszonylag nagy elektronegativitás különbség miatt
 - fémes jellegű: közös elektronfelhő
- típusaik
 - állandó sztöchiometrikus arányúak: pl. Au_2Pb , MgSi_2 , CuAl_2 ,
 - változó sztöchiometrikus arányúak: sárgaréz (Cu – Zn ötvözetben: Cu_xZn_y ,

Intermetallikus vegyületek

sárgaréz fázisdiagramja, a γ fázis a Cu_5Zn_8



Intermetallikus vegyületek

- tulajdonságaik:
 - az ionos jelleg következtében kemények, de ridegek, a kerámiákhoz hasonlítanak
 - jó kúszási tulajdonság magas hőmérsékleten
 - nagy keménység nagyon alacsony hőmérsékleten
 - jó megmunkálhatóság
- alkalmazás
 - dugattyúk, szegecsek (repülő) – CuAl_2
 - gépjármű karosszéria – MgSi_2

Fázisátalakulások

- állapotábrák az egyensúlyi feltételeket adják meg
- az egyensúlyi állapot nem állandó állapot: a hőmérséklet és az idő hatására megváltozik
- az új egyensúlyi állapot kialakulásához idő kell
- bonyolult folyamat, főleg akkor, ha a fázisok
 - száma
 - szerkezete
 - egymáshoz viszonyított mennyisége megváltozik, azaz *fázisátalakulás* történik

Fázisátalakulások

- mi történik, ha egy stabil állapotú anyagot olyan hőmérsékletre melegítünk/hűtünk, ahol egy másik fázis stabil?
- a fázisátalakulás nem játszódik le egyszerre a rendszer minden pontján, hanem bizonyos pontokon indul meg, nagyon kis térfogatokban játszódik le
- ezek a pontok lesznek a fázisátalakulás *magjai* vagy *csírái*
- majd ezek az új fázisnak megfelelő tartományok növekednek a régi fázis rovására

Fázisátalakulások

- a fázisátalakulás két fő szakasza:
 - *magképződés*
 - *növekedés*
- a magképződés lényege: az atomok kritikus mennyiségű csoportja az új fázisnak megfelelően rendeződjön, azaz a szerkezete, koncentrációja megfeleljen az új fázisnak
- a magképződést megelőzi egy *átmeneti állapot*, amikor vagy a szerkezet vagy a koncentráció nem felel meg az új fázisnak

Fázisátalakulások

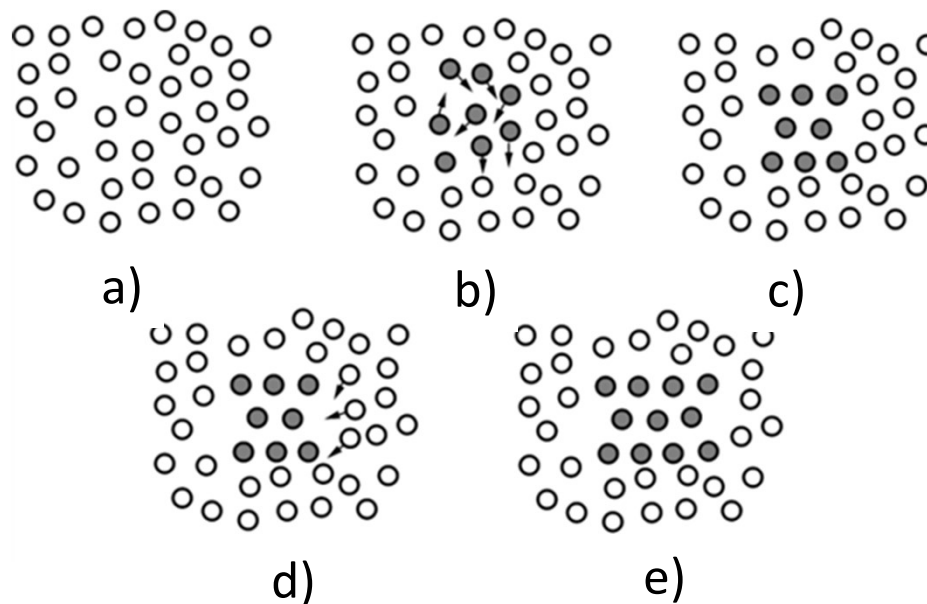
A kristályosodás, mint fázisátalakulás lépései

a) olvadék

b) atomok csoportosulása
átmeneti fázis

c) csíra kialakulása

d) - e) növekedés



Fázisátalakulások

- a mag kialakulása után a növekedés: ez az atomok régi fázisban való diffúzióját, a fázis határon való átlépését, majd az új fázisbeli diffúzióját jelenti
- egykomponensű rendszereknél csak a fázishatár átlépésének kell lejátszódnia
- *diffúzió*: az anyagban lejátszódó tömegáramlás, ami koncentrációváltozással jár – tetszőleges halmazállapotban lejátszódhat

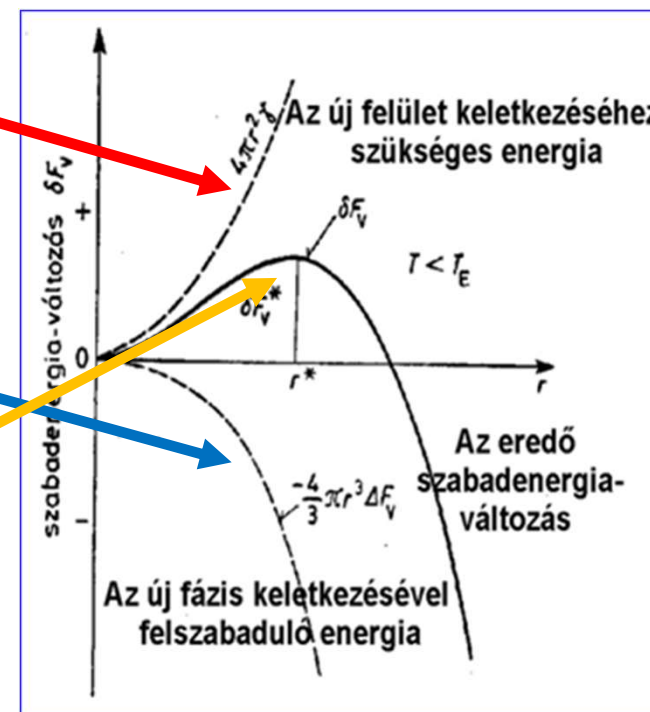
Fázisátalakulások

- *homogén magképződés*: a magok a rendszer bármely pontján egyforma valószínűséggel megjelenhetnek
- *inhomogén magképződés*: magok bizonyos helyeken nagyobb valószínűséggel jelennek meg
- az átmeneti fázis szabadenergiája nagyobb lesz, mint a régi vagy az új fázisé

Fázisátalakulások

- **magképződés**

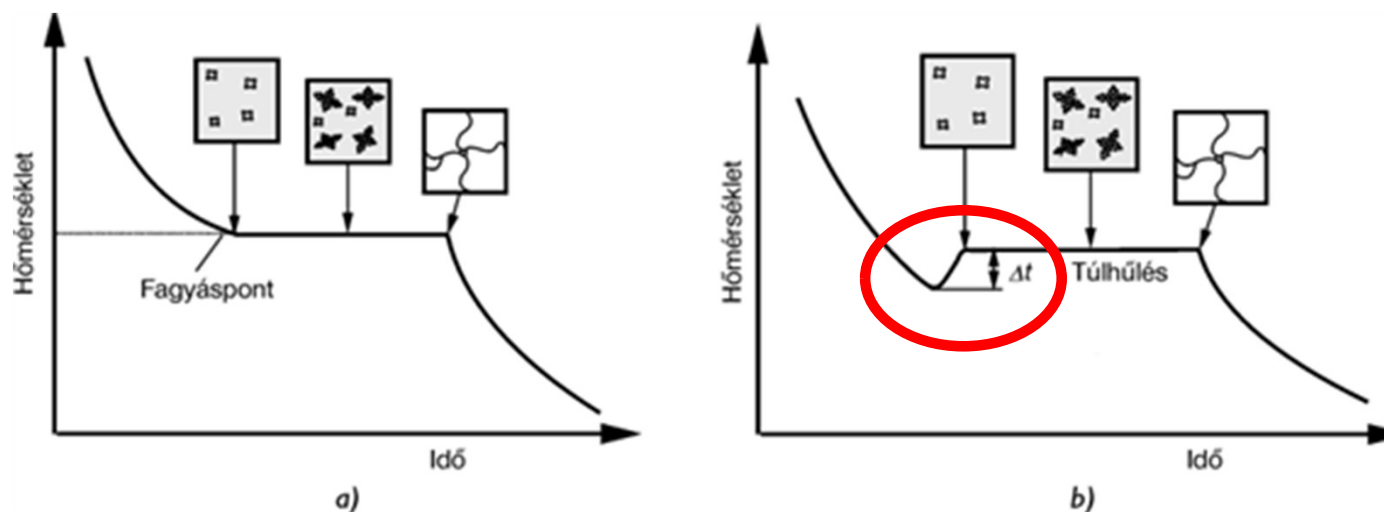
- az új felület képződése szabadenergia növekedéssel jár $\Delta F \sim \gamma \Delta A$
- az új fázis szabadenergiája alacsonyabb, $\Delta F \sim \Delta V$
- átmeneti fázis szabadenergiája nagyobb, mint a régi vagy az újé
- a két tag összege adja a szabadenergia-változást, amihez meghatározható a kritikus csíraméret:



$$r^* = \frac{2\gamma}{\Delta F_V} = \frac{2\gamma T_E}{L\Delta T}$$

Fázisátalakulások

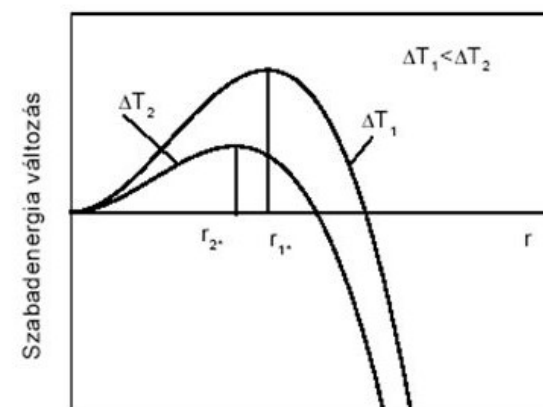
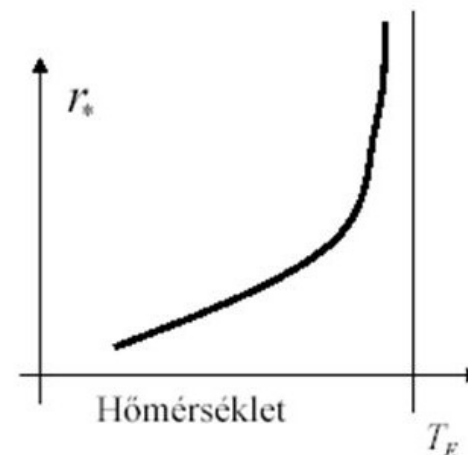
- ha nem jön létre a kritikus csíraméret, akkor a kezdemény szétesik
- a kristályosodás ténylegesen beindulásához, az olvadékot az olvadásponthoz képest túl kell hűteni



Fázisátalakulások

- a ΔT túlhűtést lehet a legjobban kézben tartani és erősen befolyásolja a magképződést:
 - túlhűtés nélkül nincs magképződés
 - ha $\Delta T \rightarrow 0 : r^* \rightarrow \infty$ -hez tart
 - ha ΔT nagy, akkor kis r^* is elég, sok mag képződik, így sok apró kristallit lesz

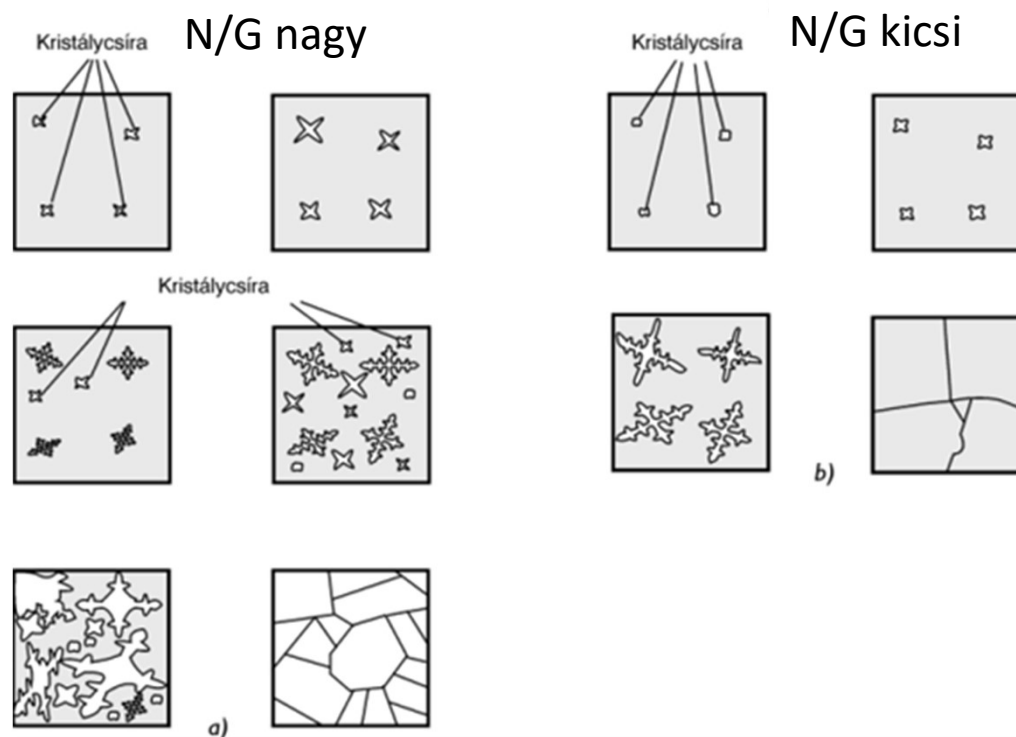
$$r^* = \frac{2\gamma T_E}{L\Delta T}$$



Fázisátalakulások

- a fázisátalakulás gyorsaságát és így kristallitok méretét meghatározza:

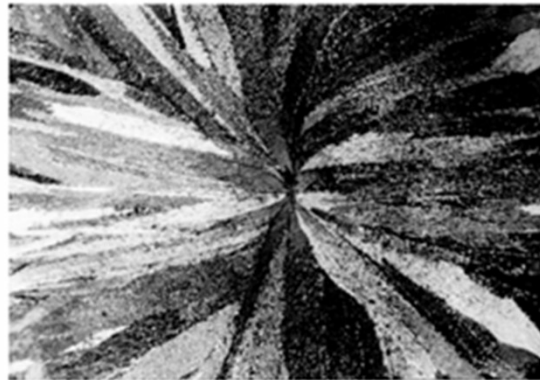
- a magok keletkezésének gyakorisága N
- a magok növekedésének sebessége G



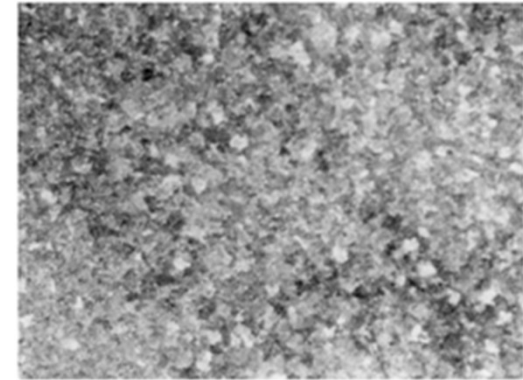
Fázisátalakulások

- általában apró szemcsés, kisméretű kristallitokból álló anyagra van szükség
- heterogén magképződés: idegen vagy ötvöző anyagokkal segítik elő a csíráképződést → az oltóanyagon és annak közelében nagyobb valószínűséggel indul meg a magképződés

Al szemcsenagysága
(100x nagyítás)



TiB₂ adagolás nélkül



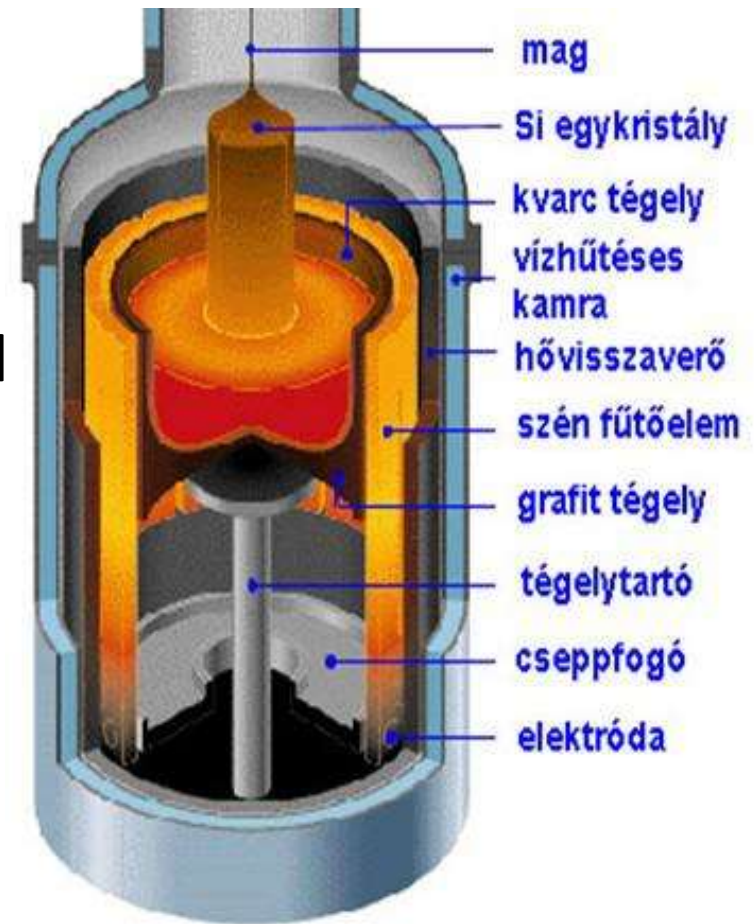
adagolással

Egykristályok

- egykristályok:
 - egységes kristályszerkezet a teljes térfogatban,
 - nincsenek fázis határok a szilárd anyagon belül fázis
- természetes környezetben ilyen nagyon kis valószínűséggel valósulhat meg: egyetlen kristálymag lehet kiindulásként
- elektrotechnikában, elektronikában, műszergyártásban nélkülözhetetlenek
- mesterséges módszerek

Egykristályok

- Czochralski-módszer
 - emelés gyorsasága:
 - lassú → új mag képződik
 - gyors → ömledék fázis elszakad
 - az egyenletes hőmérséklet elosztás biztosítása az ömledék felett
 - túl magas → szakadás
 - forgatás → tengelyirányú egyenletese eloszlás

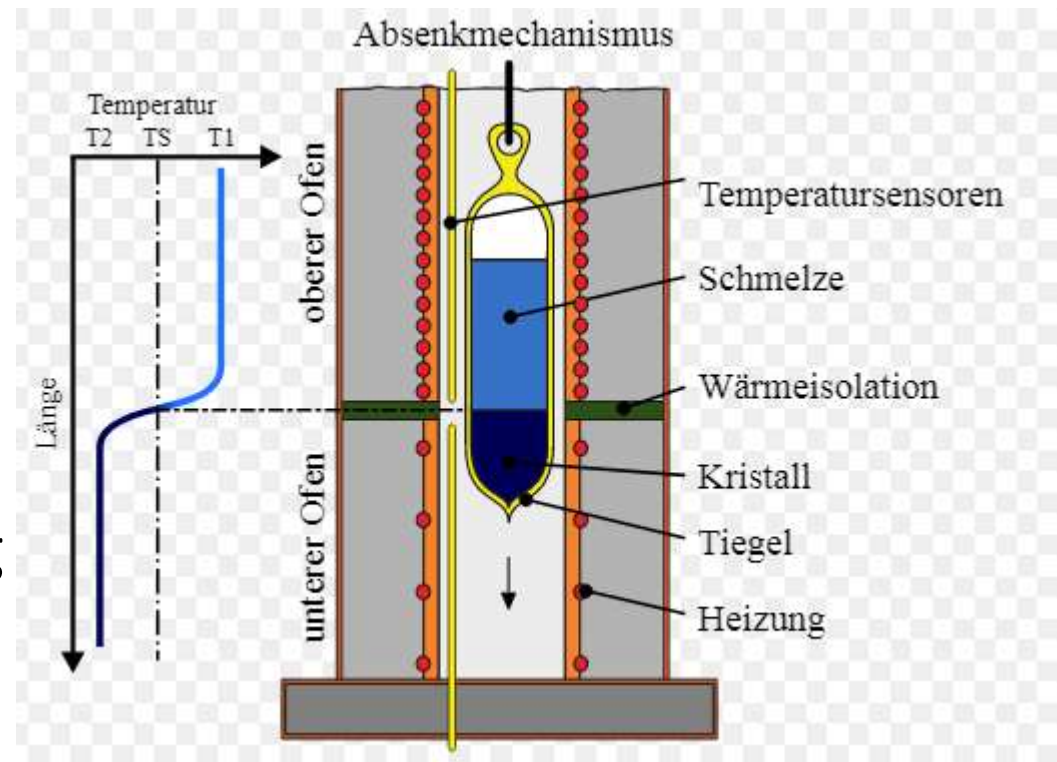


Egykristályok

- egykristály-növesztés problémái:
 - nagy tisztaság, kis diszlokációsűrűség → megfelelő elektromos tulajdonságok érdekében
 - tégely → kvarc, védőgáz, vákuum
 - kristályok izotróp jellege → megfelelő orientációjú magkristály
 - ömledék összetételének változása

Egykristályok

- Bridgman-féle eljárás
 - ömledék a tégelyben
 - tégely a kristályosodásnak megfelelő sebességgel süllyed
 - a tégely vége kúpos, kis térfogat → egy mag
 - tégely fala!
 - megfelelő hőmérsékletgradiens legyen az egyensúlyi hőmérsékletnél!

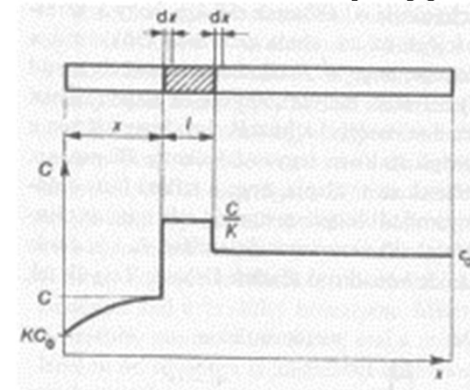
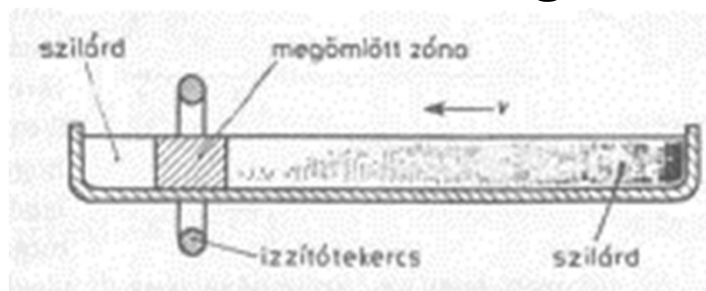


Egykristályok

- az ömledékből való egykristály-növesztés, csak akkor alkalmazható, ha szilárd fázisban nincs allotróp átalakulás (pl. Fe)
- ha van allotróp átalakulás, akkor átkristályosítással lehet próbálkozni
- módosított Bridgman-féle eljárás: nem olvadáspontra, hanem a fázisátalakulás pontjára kell melegíteni az anyagot

Nagy tisztaságú fémek

- nagy tisztaságú fémek előállítása
 - olvadék elektrolízis: a katódon válik ki a 99.99 – 99.999 % tisztaságú fém
 - zónás átolvasztás: hosszú vékony anyagnak egy kis részét megolvasztják, kihasználják, hogy az olvadékban a szennyezők jobban oldódnak, mint a szilárd anyagban, 99.9999 %-os tisztaság érhető el



Ötvözetek kristályosodása

- Ötvözetek
 - cél: a tiszta fémek tulajdonságainak javítása egy vagy több további alkotó jelenlétével
 - fontos az ötvöző anyag fajtája
 - az ötvöző atomok elhelyezkedése a kristályszerkezetben
 - más hatása van, ha az ötvöző anyag szilárd oldatként van jelen, és más, ha más fázisban
 - a megfelelő kristályszerkezet kialakítása
 - kristályosítás körülményei
 - hőkezelés

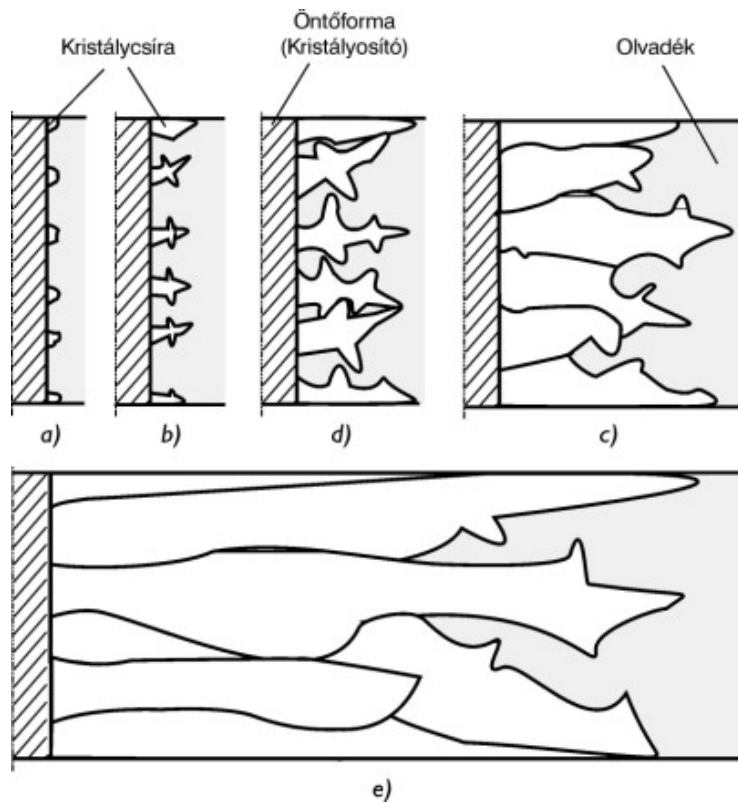
Ötvözetek kristályosodása

- ötvözetek kristályosítása
 - ipari körülmények között lényeges szerepe van az öntőforma felületének
 - a durva felület kedvez a magképződésnek
 - másik tényező öntőforma anyaga, illetve hűtése a hőelvonás miatt
 - a fém öntőformák jó hővezető-képességűek, gyors hűtést biztosítanak

Ötvözetek kristályosodása

kristályosodás megindulása az öntőforma falán

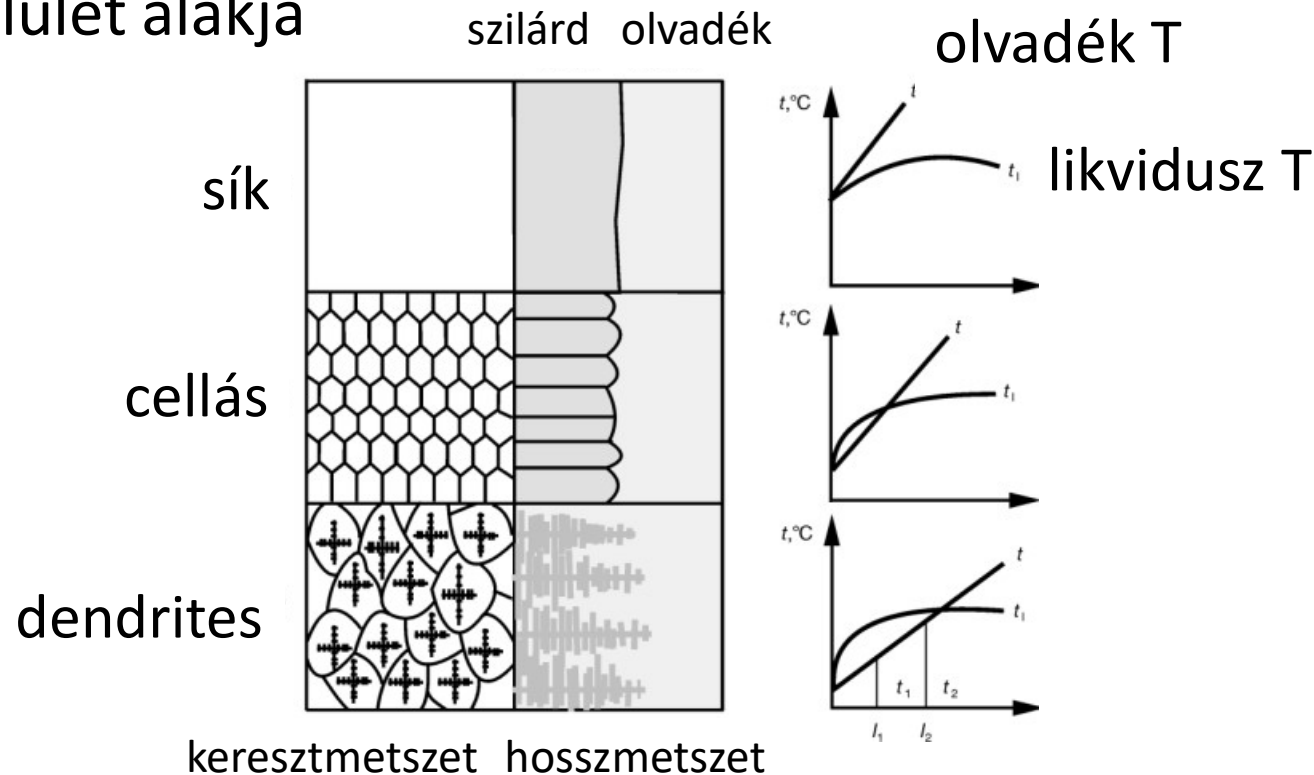
kristálycsírák
képződése



oszlop-
kristályok
növekedése

Ötvözetek kristályosodása

- ötvözetek kristályosodásakor lényeges az olvadék-szilárd határfelület alakja

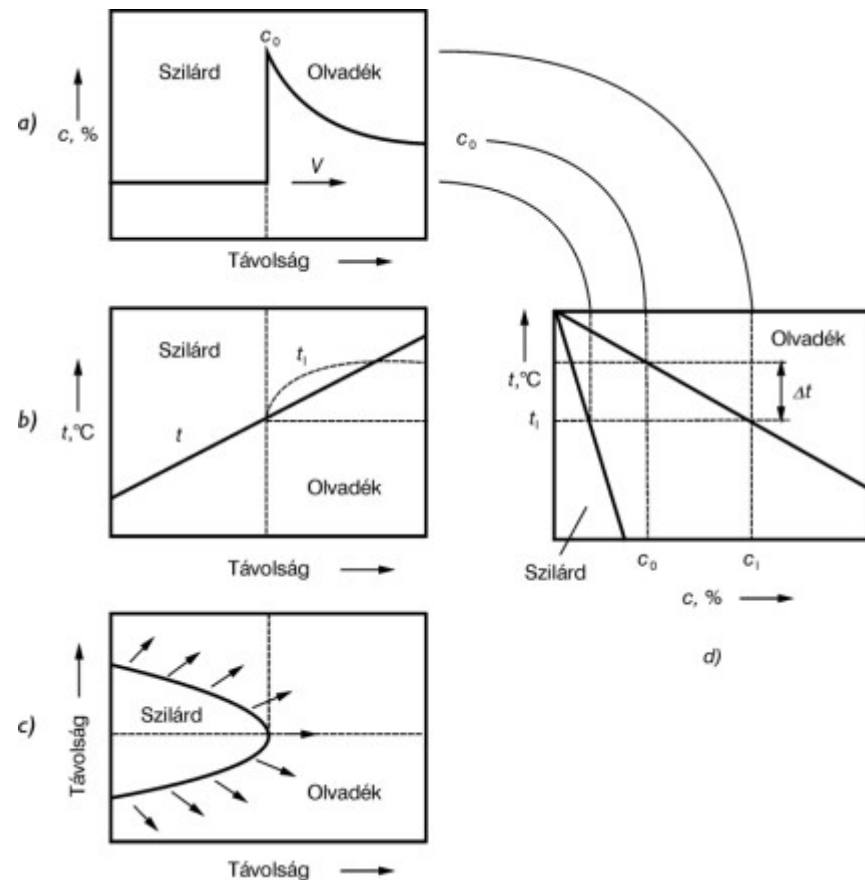


Ötvözetek kristályosodása

- cellás, dendrites kristályosodás
a diffúzió nem elég gyors, az
ötvöző tartalom a határfelület
előtt megnő

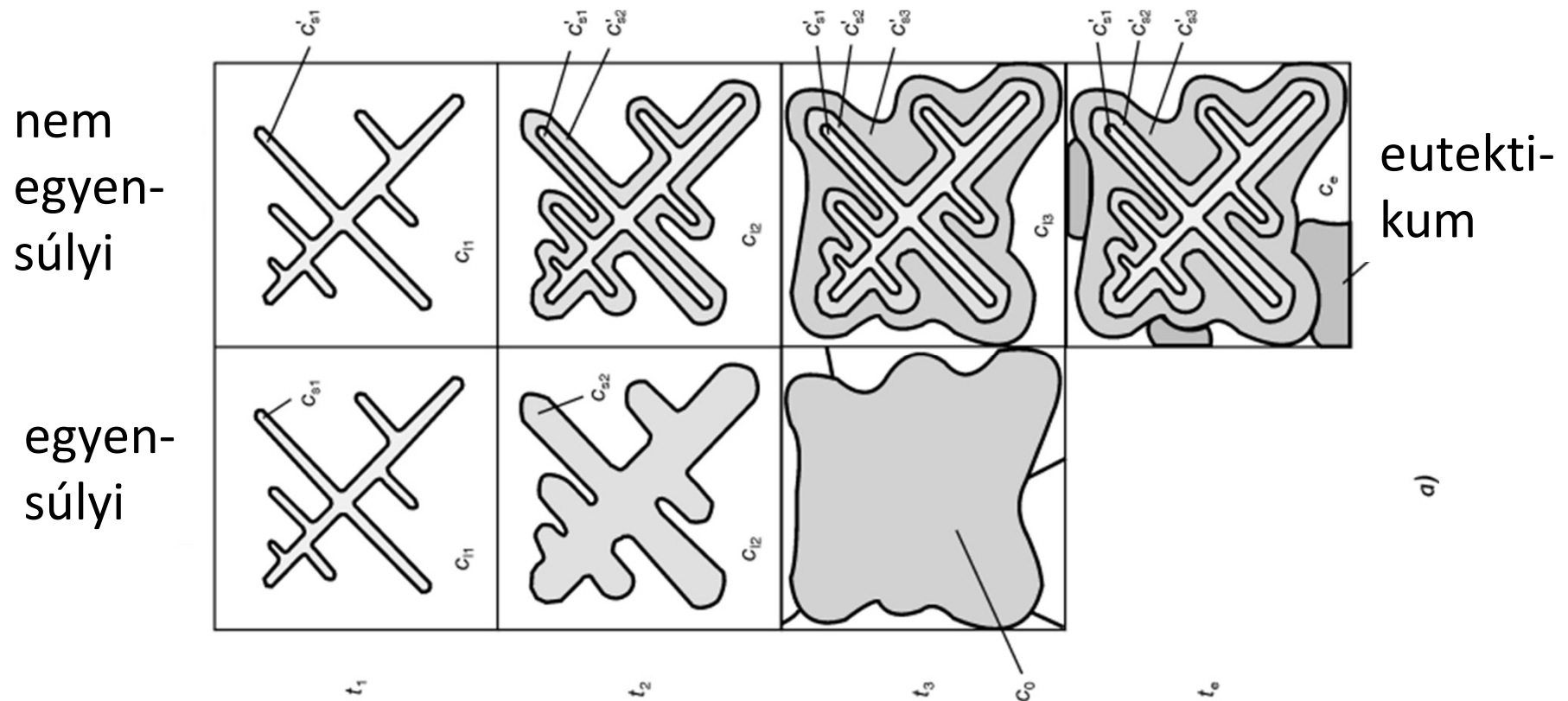
a tényleges hőmérséklet a
likvidusz görbéből számítottnál
alacsonyabb: túlhűlés

cellák alakulnak ki, ha nagy
a túlhűlés akkor elágaznak



Ötvözetek kristályosodása

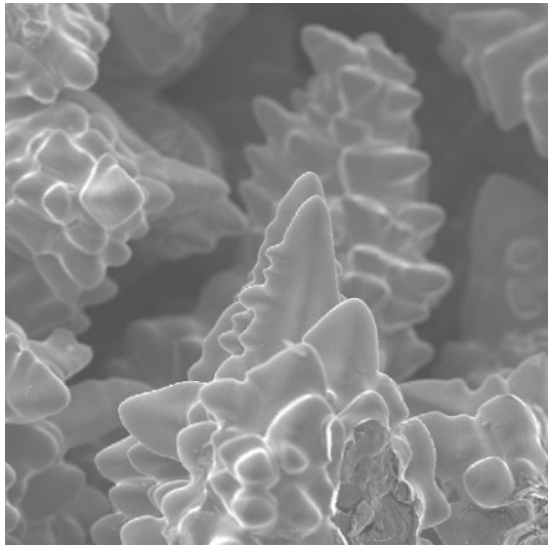
szilárd oldat kristályosodása



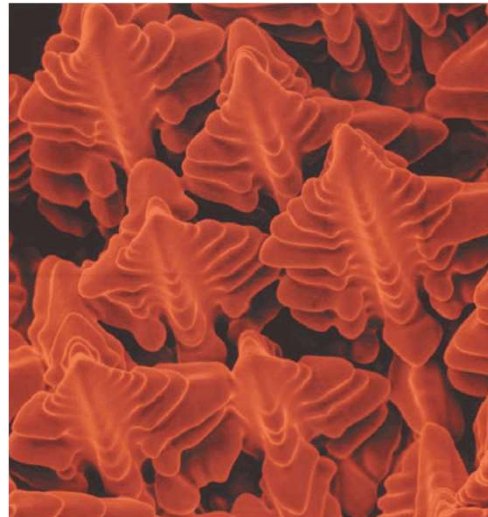
Ötvözetek kristályosodása

dendrites kristályok

acél



acél – Ni
ötvözet



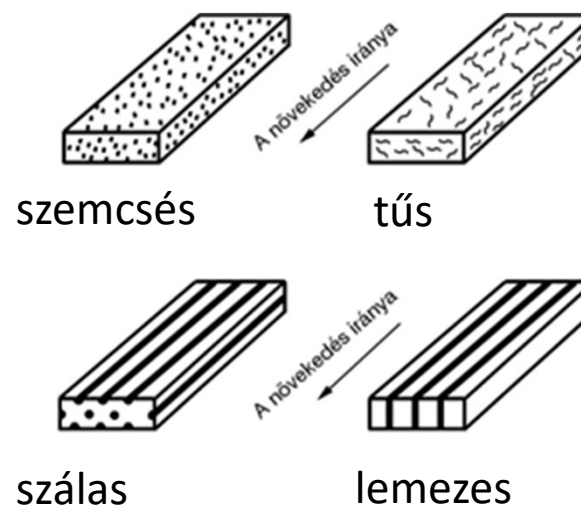
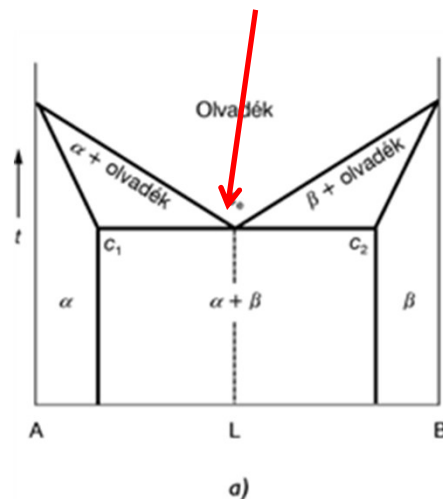
ezüst



Ötvözetek kristályosodása

eutektikum kialakulása: néhány ötvözet kristályosodása során a színfém vagy a szilárd oldat kiválása során mindkét fázisra nézve telített összetételű olvadék jön alakul ki

ekkor az olvadékból állandó hőmérsékleten, két fázisból álló szövetelem, **eutektikum** kristályosodik



Ötvözetek hőkezelése

- ***hőkezelés***: az anyag felmelegítése a fázisdiagram által meghatározott pontra, ott hőntartás a szerkezeti átalakulás idejére, majd célnak megfelelő hűtés
- a szilárd anyagban a részecskék vándorlása diffúzió révén játszódik le
- a diffúzió az atomok hőmozgásán alapul, tehát a hőmérséklet növelése energia-bevitelt jelent a megfelelő szerkezeti átalakulás lejátszódásához
- a hűtés sebessége erőteljesen befolyásolja a diffúzió lejátszódási idejét

Ötvözetek hőkezelése

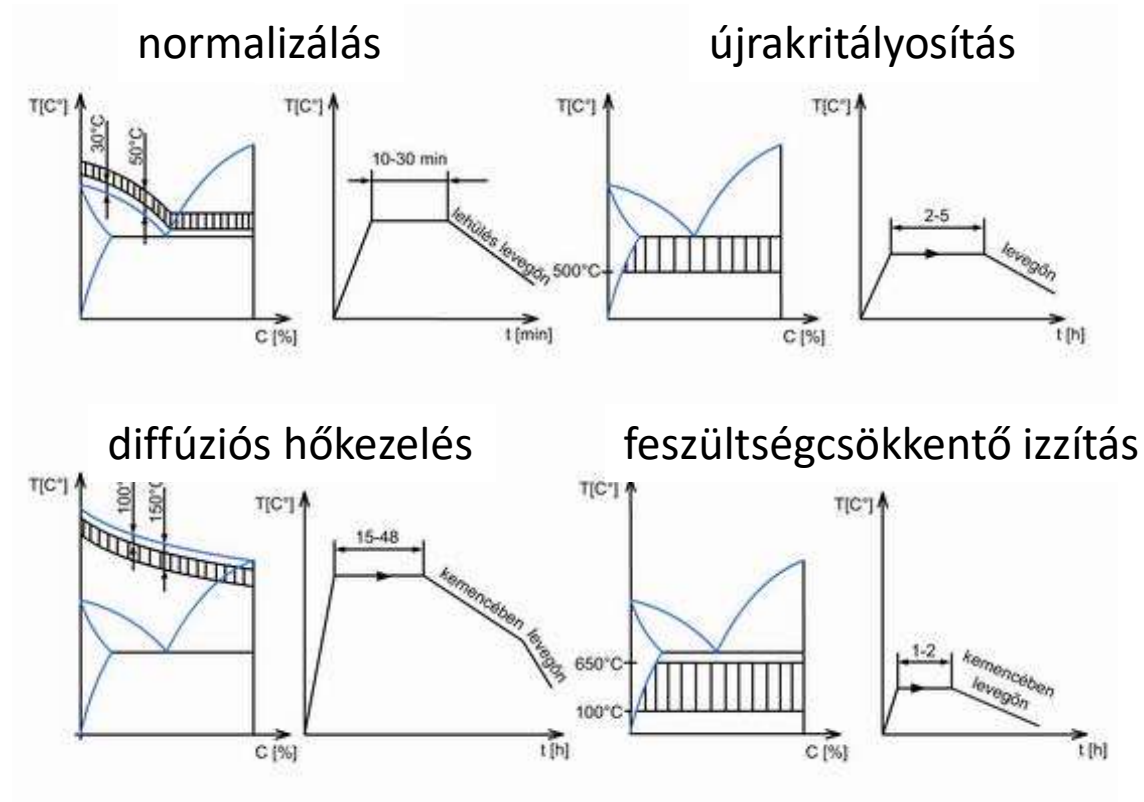
- Acélok hőkezelési eljárásai
 - kiegyenlítő hőkezelések
 - lágyító hőkezelések
 - keménységfokozó hőkezelések
 - szívósságot fokozó hőkezelések
 - kéregötvöző hőkezelési eljárások

Ötvözetek hőkezelése

- *Kiegyenlítő hőkezelés*: acélban előforduló inhomogenitások keresztmetszetre történő kiegyenlítése
- *normalizálás*: hegesztett acélok durva szemcsés szerkezetének javítása
- *újrakristályosítás*: hidegen húzott rudak kristallitjai megnyúlnak, szilárdság nő, keménység fokozódik, de szívósság csökken, alakíthatóság romlik

Ötvözetek hőkezelése

- diffúziós hőkezelés: egyeletlen vegyi összetétellé rendezés



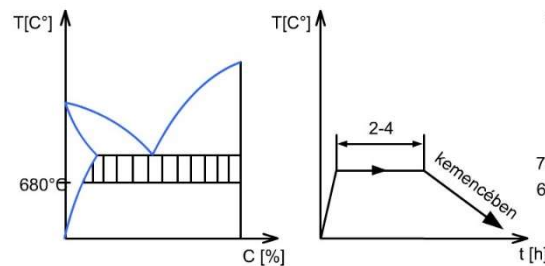
Ötvözetek hőkezelése

- *lágylító hőkezelések*: a megmunkálhatóság javítása
 - teljes kilágylítás: a lehűtés nagyon lassú, kemencével együtt történik
 - normalizáló lágylítás: valamivel gyorsabb hűtés
 - izotermális lágylítás: kis sebességű forgácsolás esetén szükséges átalakítás, nagyon gyors köztes hűtés
 - ausztenitre lágylítás: korrózió-, sav-, hő-, kopásálló acélok megmunkálhatóságának növelésére

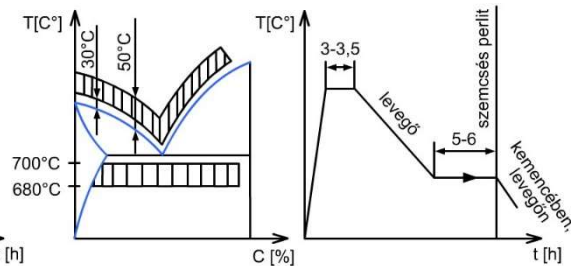
Ötvözetek hőkezelése

- lágító hőkezelések fázisdiagramjai

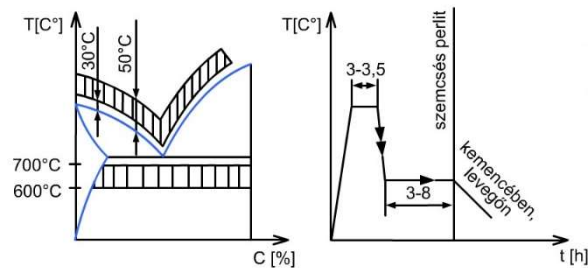
teljes kilágítás



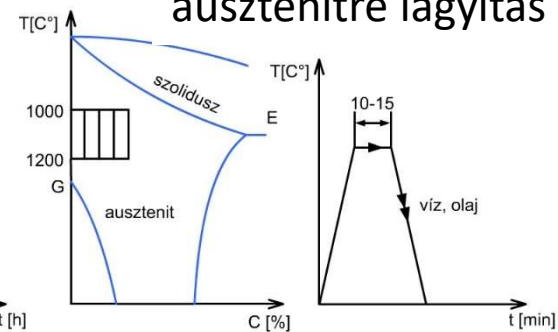
normalizáló lágítás



izotermális lágítás



ausztenitre lágítás

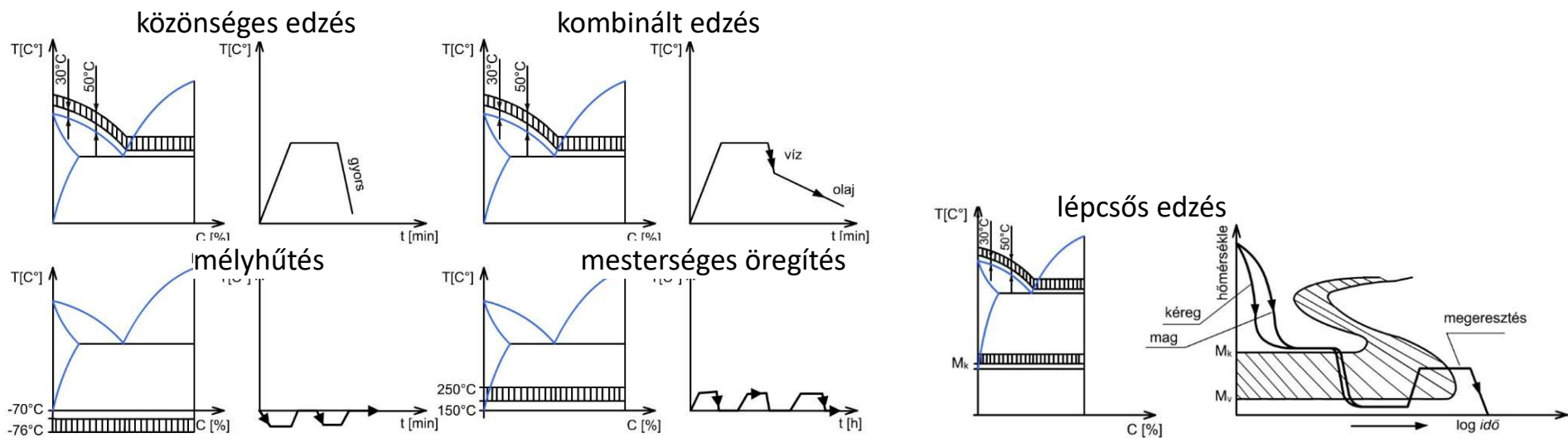


Ötvözetek hőkezelése

- *keménységfokozó hőkezelése*: kopásálló szövetszerkezet kialakítására, kemény fémvegyület kiválásának elősegítése
- *közönséges edzés*: felmelegítés után nagyon gyors lehűtés a megfelelő szövetszerkezet kialakítására
- *kombinált edzés*: kétféle hűtőközeg (víz, olaj) alkalmazása, a törések, repedések elkerülésére
- *lépcsős edzés*: nagyobb átmérőjű munkadarabok esetén a repedések elkerülésére (nő a szívósság, vetemedésre, repedésre való hajlam csökken)

Ötvözetek hőkezelése

- **mélyhűtés:** hevítés helyett hűtés, hogy a szerkezet-átalakulás teljes legyen
- **mesterséges öregítés:** keménység növelése, szívósság, nyúlás csökkentése



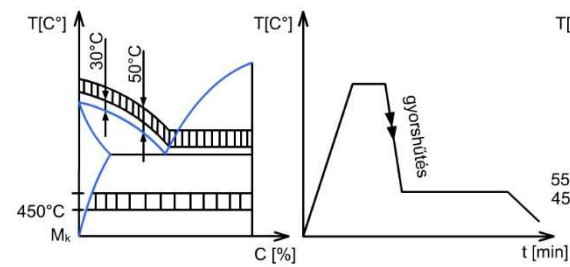
Ötvözetek hőkezelése

- *szívósság fokozása*: az eltöréshez szükséges fajlagos munka növelése
- *izotermális edzés*: keménység közel olyan, mint az edzett acélé, de szívóssága jóval nagyobb (nem reped, nem vetemedik), rugók, szerszámok, kések hőkezelése
- *patentírozás*: hosszú vékony termékek szívóssá tételére
- *nemesítés*: először edzés, majd magas hőfokú megeresztés (visszamelegítés, hőntartás, normál hűtés)

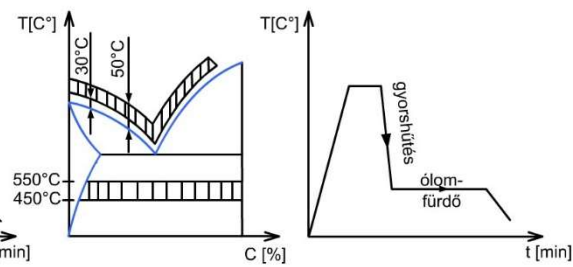
Ötvözetek hőkezelése

szívósság fokozás fázisdiagramjai

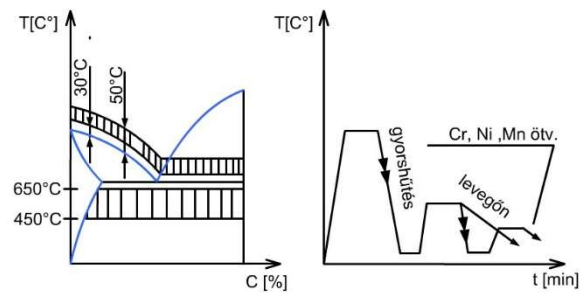
izotermális edzés



patentírozás



nemesítés



Ötvözetek hőkezelése

- *kéregötvöző hőkezelések*: ötvözetlen vagy gyengén ötvözött acél felületi rétegébe szénnek vagy más ötvözőnek juttatása diffúzióval
 - **cementálás**: szén diffúzióval a felület edzhetővé tétele
 - **nitridálás, karbonitrálás**: nitrogén diffúzióval a keménység növelése illetve korrózióállóság növelése
 - **nitrocementálás**: előző kettő kombinálása
 - **alitálás**: alumíniummal ötvözés a tűzállóság növelésére

Ötvözetek hőkezelése

- **kromálás:** króm diffúzióval a korrózióállóság, hőállóság növelése, keményítés
- **szilikálás:** ötvözet szilíciummal a savállóság növelésére

