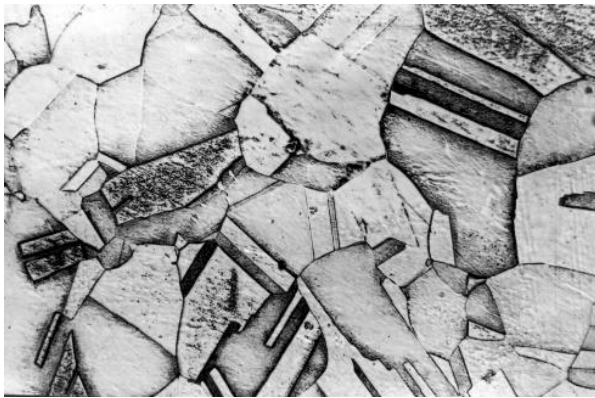


## Újrakristályosodás

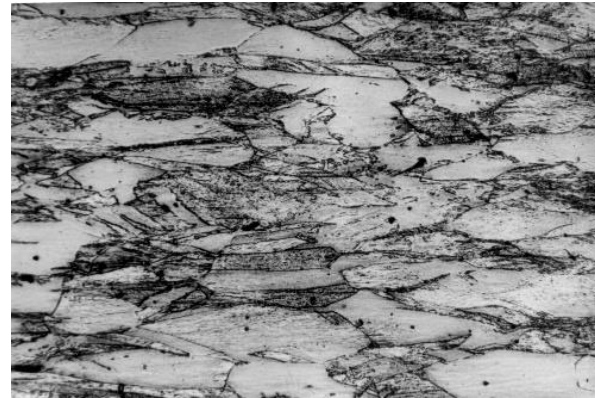
### Bevezetés, az újrakristályosítás célja

Az anyagok fizikai tulajdonságai és szemcseszerkezete képlékeny hidegalakítás hatására – az anyag szabadenergiájának növekedése folytán – számottevően megváltoznak. A mikroszerkezetre érzékeny tulajdonságok (például szilárdság, alakváltozás) nagyobb mértékben, míg a kevésbé mikroszerkezet függő tulajdonságok (például villamos vezetés) kisebb mértékben. A képlékeny hidegalakításnak három fő hatása van.

**(1)** Megváltozik a szemcseszerkezet, a szemcsék alakja (1. ábra). Az alakítás (például hengerlés) hatására az eredetileg poligonális szemcsék megnyúlnak.



Alakítatlan szemcseszerkezet

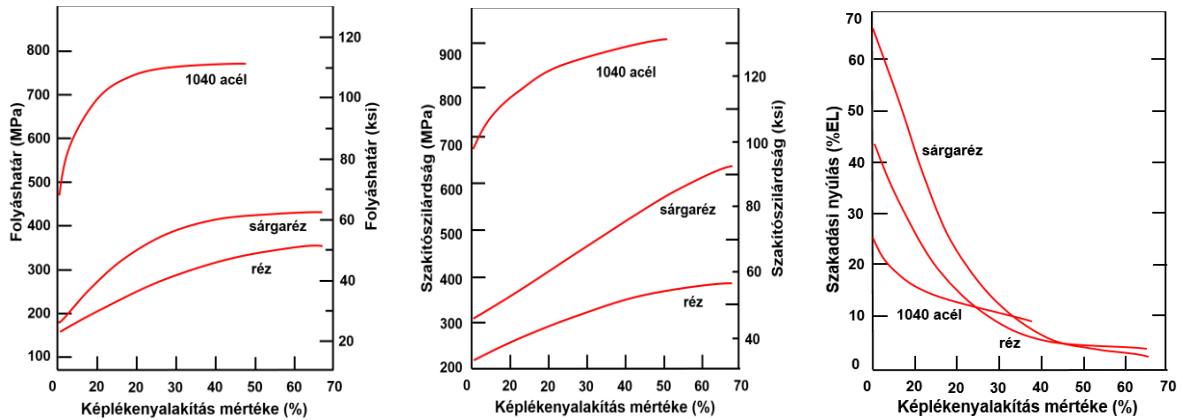


Alakított (hengerelt) szemcseszerkezet

1. ábra. Szemcseszerkezet alakítás előtt és után

**(2)** A hidegalakítással bevitt energia hatására beinduló Frank-Read források működésével megnő az anyag diszlokáció sűrűsége ( $10^8 \text{ cm}^{-2} \rightarrow 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ).

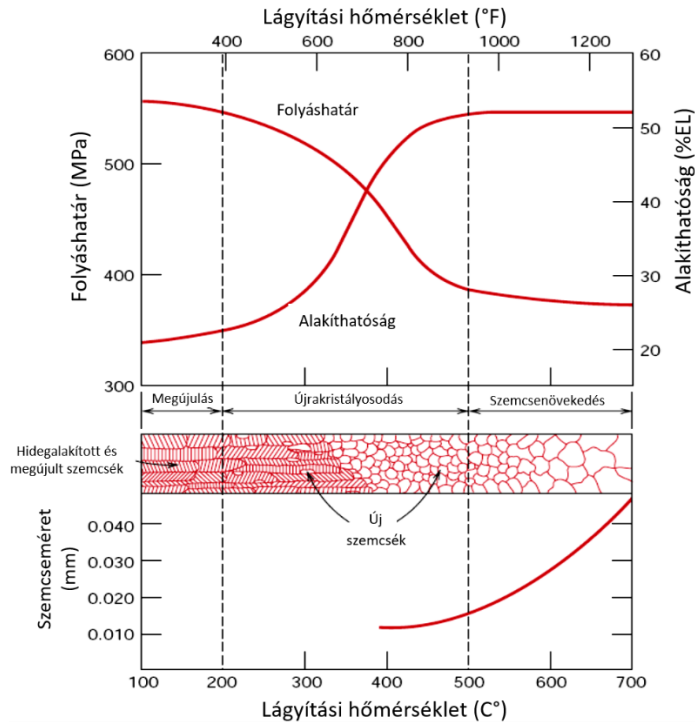
**(3)** Az alakítás hatására bekövetkező diszlokációsűrűség növekedés hatására alakítási keményedés lép fel: a szilárdsági jellemzők (folyáshatár, szakítószilárdság) nőnek, míg az alakváltozási jellemzők (szakadási nyúlás, kontrakció) csökkennek. Ennek oka az, hogy a nagyszámú diszlokáció jelentősen gátolja egymást a szabad elmozdulásban. A 2. ábra ezeknek a jellemzőknek a változását mutatja be egy acél típus, sárgaréz (Cu-Zn ötvözet) és réz esetére. Megjegyezzük, hogy a növelt szabadenergiájú állapot nem csak képlékeny hidegalakítás hatására, hanem például neutron besugárzás, vagy gyors hűtés esetén is előállhat.



2. ábra. A mechanikai tulajdonságok változása a képlékeny alakítás mértékének függvényében (1) folyáshatár, (2) szakítószilárdság, (3) szakadási nyúlás

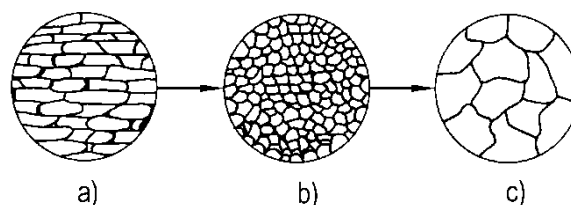
A képlékeny alakváltozással bevitt energia nagy része (~90%) hővé alakul, míg fent maradó hányada (~10%) az anyagban tárolódik (új üresrácshelyek képződése, diszlokációk képződése). Az anyag, mint minden termodinamikai rendszer igyekszik az energiáját csökkenteni. Ez a törekvés szilárd testekben kis hőmérsékleten az ionok viszonylag erős helyhez kötöttsége miatt nem, vagy csak kis mértékben érvényesül. Nagyobb hőmérsékleten azonban – az ionok nagyobb termikus energiája révén – a szabadenergia csökkentő változások könnyebben végbe mennek. Az ehhez az energiacsökkentéshez kapcsolódó anyagszerkezettani folyamatokat nevezzük összefoglaló néven **újrakristályosodásnak** vagy **rekrisztallizációnak**. Az újrakristályosodás jelenségének számos fontos vonatkozása van. Az alakítás előrehaladtával az anyag alakváltozó képessége fokozatosan kimerül. Számos ipari technológia azonban nagy értékű alakváltozási képességet követel meg (például dróthúzás, süllyesztékes kovácsolás), ezért ezeket a technológiai műveleteket vagy nagyobb hőmérsékleten végzik (melegalakítás), vagy az alakváltozási képesség kimerülésének megelőzésére a technológiai lépéssorba újrakristályosító hőkezelést iktatnak be. Megint más esetekben a szilárdságnövelés a cél, amelynek egyik lehetősége a szemcseméret csökkentése (Hall-Petch egyenlet). Az újrakristályosítással – megfelelő előzetes hidegalakítást feltételezve – előidézhető a szemcseszerkezet finomodása, az átlagos szemcseméret csökkenése. Az újrakristályosodás hőmérsékletének ( $T_{\text{rekriszt}}$ ) a képlékeny alakító technológiákban is fontos műszaki szerepe van.

A rekrisztallizációs hőmérséklet alatti ( $T < T_{\text{rekriszt}}$ ) alakítási műveleteket hidegalakításnak, a rekrisztallizációs hőmérséklet felettieket ( $T > T_{\text{rekriszt}}$ ) melegalakításnak, a rekrisztallizációs hőmérséklet közelében végzett alakításokat pedig félmeleg alakításnak nevezzük ( $T \approx T_{\text{rekriszt}}$ ). A képlékeny alakváltozás hatására megváltozott tulajdonságok meghatározott hőmérsékleten (az újrakristályosodási hőmérséklet felett) végzett izzítással visszaállíthatók eredeti értékükre (3. ábra).



**3. ábra. A mechanikai tulajdonságok változása a képlékeny alakítás hatására és az újrakristályosító hőkezelés hatása a mechanikai tulajdonságokra**

A teljes folyamat három fő részt foglal magába: a megújulást, az újrakristályosodást és a szemcsedurvulást. A következő, 4. ábrán az egyes részfolyamatok során végbemenő szemcseszerkezeti változásokat mutatjuk be.



**4. ábra. Az újrakristályosító hőkezelés hatása a szemcseszerkezetre (a) alakított szemcsék, (b) újrakristályosodott szerkezet, (c) szemcsedurvulás**

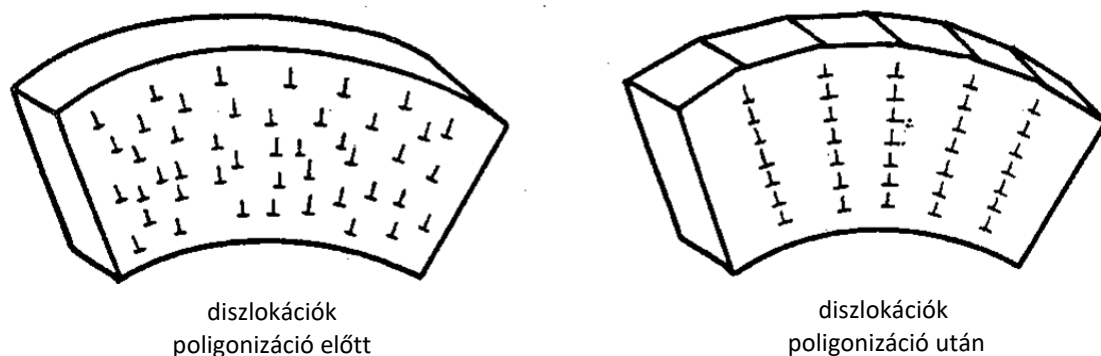
Jelen oktatási segédlet célja, hogy bemutassa a fent felsorolt folyamatok anyagszerkezettani okait és vonatkozásait, az újrakristályosító hőkezelés elvi alapjait.

### A megújulás jelensége

A megújulás hőmérsékletén végzett izzítás hatására a szemcseszerkezet nem fog megváltozni, ugyanakkor a szemcséken belül jelentős változások mennek végbe. Az üres rácshelyek száma beáll az izzítási hőmérséklet által indokolt nagyságúra. Vagy kidiffundálnak a felületre, vagy pedig csatlakoznak valamely, a közelben lévő diszlokáció extrasíkjához, ezáltal meginđítva a diszlokációk kúszását, melynek hatására a diszlokációk átrendeződnek. A kristallitok

meghatározott féltérében pozitív, másik féltérében pedig jellemzően negatív diszlokációk gyűlnek össze, vagyis az azonos diszlokációk egy helyre rendeződnek. Az ellentétes előjelű diszlokációk kioltják egymást. Ezen hatások által a munkadarabban tárolt energia csökken. Ennek a folyamatnak a hatására a kristály bizonyos tartományaiban majdhogynem kizárólag azonos előjelű diszlokációk maradnak.

A kúszás során kialakuló diszlokáció mozgás és elhelyezkedés a **poligonizáció**. Az azonos előjelű diszlokációk számára az a legkisebb energiájú helyzet, amikor egymás alatt helyezkedhetnek el. A felül lévő diszlokáció csúszósíkja alatt húzott zóna, az alul lévő diszlokáció csúszósíkja felett nyomott zónával kerül kapcsolatba, így energiájuk csökken. Az egymás alatt elhelyezkedő, azonos előjelű diszlokációk pedig kismértékű orientáció különbséget eredményeznek, ezáltal kisszögű szubszemcsehatárokat hoznak létre (5. ábra).



5. ábra. A poligonizáció jelensége

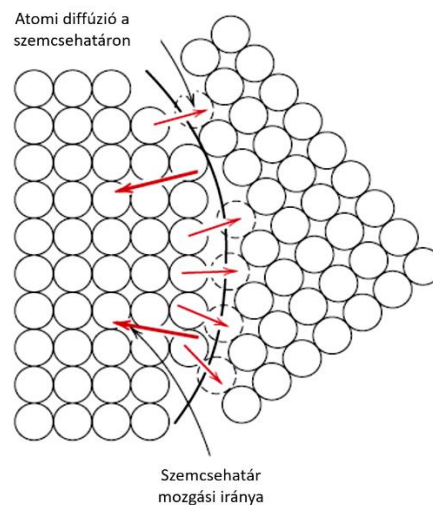
Ezek a szubszemcsék lesznek az alapjai az új, immáron közel feszültségmentes szerkezetnek, ami az újrakristályosodás során jön létre. Ezért a poligonizáció végbemenetele az újrakristályosodás alapvető feltétele.

### Újrakristályosodás

A poligonizáció során kialakult szubszemcsehatárokon a diszlokációk viszonylag távol helyezkednek el egymástól a kisszögű szemcsehatár miatt. A hőmérséklet hatására éppen ezért a szubszemcsehatárok könnyen mozgásba lendülnek, hiszen a kis orientáció különbség miatt az egyes atomok, atomsorok könnyen csatlakoznak az egyik, vagy éppen a másik szemcséhez. Az egymással találkozó kisszögű határok egyesülésével létrejövő szubszemcsehatáron nő a diszlokációk száma, ezáltal nő az orientáció különbség. Ennek a folyamatnak a lévén egyre több olyan szubszemcse alakul ki, amely nagy szögű szemcsehatárral, a szemcsehatáron pedig nagyobb diszlokációsűrűséggel rendelkezik. Ezek a szubszemcsék a többiek rovására növekedni kezdenek és így új, feszültségmentes szemcsék alakulnak ki. Tehát az újrakristályosodás során nem a képlékenyen alakított, nagy energia többlettel rendelkező szemcsék nyerik vissza eredeti állapotukat, hanem teljesen új, feszültségmentes kristallitok képződnek. A rekristallizáció hajtóereje tulajdonképpen az alakváltozott és az újonnan kialakult szemcsék közötti energiakülönbség.

## Szemcsedurvulás

A fémekben a rekrisztallizáció befejeztével sem teljesen feszültségmentesek a szemcsék, mert a folyamat helyenként indul be és mindaddig folytatódik, amíg az újonnan keletkező szemcsék teljesen össze nem érnek. Ha az így keletkező szemcsék nem azonos méretűek, akkor a rekrisztallizáció tovább folytatódhat. Ez a jelenség a szemcsedurvulás, vagy másodlagos (szekunder) rekrisztallizáció. A szemcsék a másodlagos rekrisztallizáció során is a lehető legkisebb energiaállapotra törekednek. Az újonnan keletkezett szemcsék energetikai szempontból legkedvezőtlenebb állapotú atomjai a szemcsék felületén helyezkednek el, mivel ezeknek az atomoknak egy vagy több közvetlen szomszédja hiányzik. Emiatt a szemcsék felületén egyfajta felületi feszültség alakul ki. Az egymással szomszédos szemcsék felületi feszültségei akkor kerülnek egyensúlyba, ha a közvetlenül szomszédos három szemcse határfelületei  $120^\circ$ -ot zárnak be egymással. (Ez egyúttal azt is jelenti, hogy az ideális alakú szemcsék tökéletes hatszögek lennének.) Azonban a rekrisztallizáció során az egyes szemcsék egymáshoz képesti nem egyenlő távolsága, valamint eltérő növekedési sebessége miatt nem egyforma méretű szemcsék alakulnak ki. Ennek következtében a nagyobb méretű szemcsék a kisebbek rovására növekedni fognak (6. ábra). Ezt úgy is megfogalmazhatjuk, hogy a szemcsehatárok a görbületi középpontjuk irányába tolódnak el.

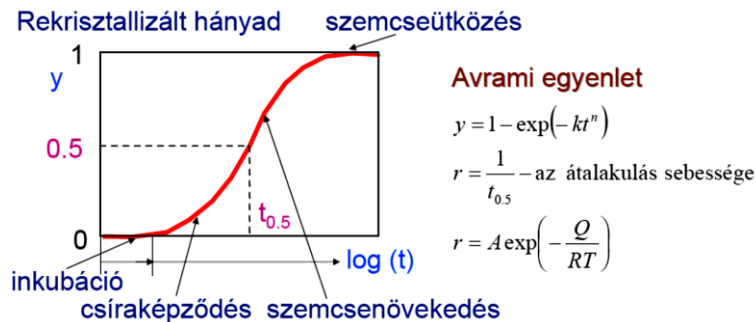


6. ábra. A szemcsedurvulás folyamata (a jobboldali szemcse nő a baloldali rovására)

Maga az újrakristályosodás tehát diffúziós folyamat, és mint ilyen, a diffúziós fázisátalakításokhoz hasonló módon adott inkubációs idő letelte után adott időtartam alatt megy végbe. A fázisátalakításokhoz hasonlóan az újrakristályosodott anyaghányadot is az **Avrami egyenlet** írja le:

$$y = 1 - e^{-kt^n} \quad (1)$$

Az (1) egyenlethez tartozó matematikai görbét és a hozzá kapcsolódó számítási összefüggéseket a következő, 7. ábra mutatja be. Minél nagyobb hőmérsékleten történik az újrakristályosítás, a görbe annál inkább balra tolódik, vagyis a rekrisztallizáció inkubációs időszükséglete és magának az átalakulásnak az időszükséglete is csökken.

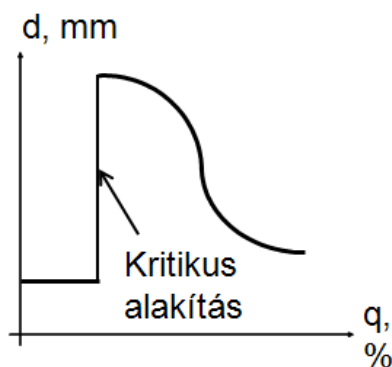


7. ábra. Az Avrami-egyenlet és matematikai összefüggései

### Az újrakristályosodást befolyásoló tényezők

*Az előzetes képlékeny alakítás mértékének hatása a kialakuló szemcseátmérőre*

Mint említettük, az újrakristályosodás egyik anyagszerkezettani feltétele a poligonizáció végbemenetele, amely által szubszemcsék keletkeznek. Amennyiben az előzetes alakítás mértéke kicsi, az alakítási folyamatok jellegéből következően csak néhány helyen alakul ki olyan mértékű diszlokációsűrűség, amelynek következtében a megújulás során végbe mehet a diszlokációk rendeződése, vagyis a poligonizáció. Az újrakristályosodás ilyen esetben csak az így kialakult néhány szubszemcsén indulhat meg, aminek az lesz a következménye, hogy durva szemcsés lesz a szerkezet (hiszen az újonnan kialakuló szemcsék ritkán helyezkednek el és ezért sokáig nőhetnek, amíg egymással találkoznak). Az ilyen, kismértékű előzetes alakítást kritikus alakításnak nevezzük és a megfelelő mechanikai tulajdonságok elérése érdekében az esetek túlnyomó többségében igyekszünk elkerülni (8. ábra). A kritikus alakítás ötvözettypustól függően a 3-15% alakváltozási tartományba esik. Ha az előzetes alakítás mértéke nagyobb, akkor sok erősen deformált, nagy diszlokációsűrűségű tartomány fog kialakulni, a poligonizáció nagyobb tartományban megy végbe, így sok új kristallit fog keletkezni, az újrakristályosított tartomány finomszemcsés lesz.



8. ábra. Az előzetes képlékeny alakítás hatása az újonnan keletkező szemcsék átlagos átmérőjére

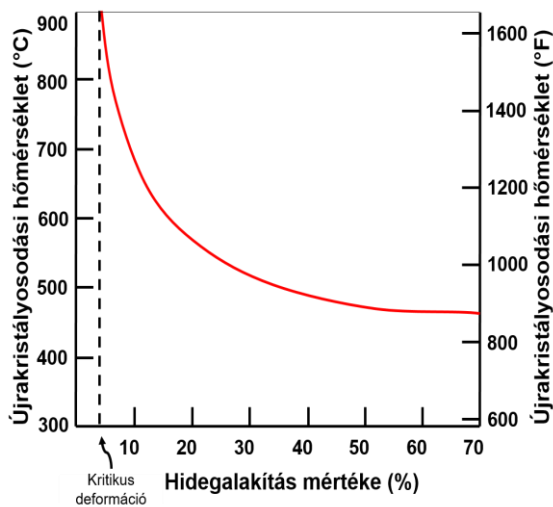
### Az előzetes képlékeny alakítás mértékének hatása a rekrisztallizációs hőmérsékletre

Minél nagyobb az előzetes alakítás mértéke, annál kisebb hőmérsékleten indul meg a rekrisztallizáció, vagyis az egyes fémek újrakristályosodási hőmérséklete függ az előzetes alakítás mértékétől (9. ábra). Tehát az újrakristályosodási hőmérséklet egy adott hőközben változik az előzetes alakítás mértékének függvényében. A rekrisztallizációs hőmérséklet megbecsülhető az olvadáspont alapján. Jó közelítéssel a rekrisztallizációs hőmérséklet a 0,5-ös homológ hőmérsékletnek felel meg. Homológ hőmérsékletnek nevezzük azt a dimenzió nélküli számot, amely adott folyamat K-ben megadott hőmérsékletének és a fém olvadáspontjának ugyancsak K-ben mért hányadosa. Ez alapján az alábbi számítási módszer alkalmazható: (pl. vas esetén az (2) számítás alapján)

$$T_{\text{hom}} = \frac{\text{kezelési hőmérséklet (K)}}{\text{olvadáspont (K)}} = \frac{633+273}{1539+273} = 0,5 \quad (2)$$

$$T_{\text{rek.}} = 0,5 \cdot 1812 = 906\text{K} = 633^{\circ}\text{C}$$

A gyakorlatban az újrakristályosodási hőmérséklet 0,3-0,7-es homológ hőmérséklet tartományba esik. A 1. táblázat néhány szívfém és ötvözet alapállapotbeli újrakristályosodási hőmérsékletét, valamint olvadáspontját mutatja be.



9. ábra. Az előzetes alakítás hatása az újrakristályosodási hőmérsékletre

Név	T <sub>rekriszt</sub> (°C)	T <sub>olv</sub> (°C)
Ólom	-4	327
Ón	-4	232
Cink	10	420
Alumínium 99,999	80	660
Réz 99,999	120	1085
Sárgaréz (Cu60Zn40)	475	900
Nikkel	370	1455
Vas	450	1538
Volfrám	1200	3410

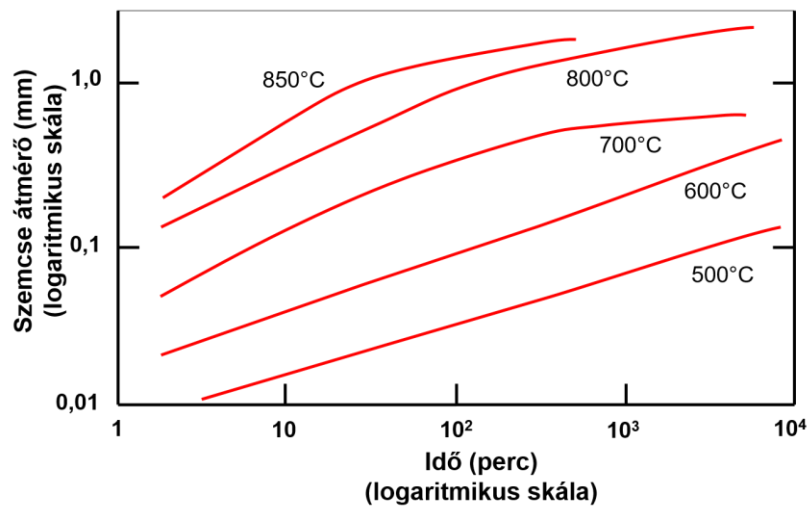
1. táblázat. Jellemző újrakristályosodási hőmérsékletek és olvadáspontok

### A hőntartási idő hatása a kialakuló átlagos szemcseméretre

Adott mértékű előzetes alakítás után a munkadarabot a rekrisztallizációs hőmérséklet felett izzítva az újonnan kialakuló átlagos szemcseméret a hőntartási idő növelésével jó közelítéssel lineárisan növekszik (10. ábra).

### A hőntartási hőmérséklet hatása a kialakuló átlagos szemcseméretre

A rekristallizációs hőfok feletti hőmérsékleten izzított próbatestek újonnan kialakuló átlagos szemcseátmérője állandó idő mellett a hőmérséklettel exponenciálisan nő (10. ábra).



10. ábra. A hőmérséklet és az idő hatása az újonnan kialakuló átlagos szemcseméretre

A műszaki gyakorlatban a hőkezelések hőfokát és időtartamát általában komplex módon, párhuzamosan kell kezelnünk. Az újrakristályosodás folyamatát leíró hőtani és diffúziós problémát erősen leegyszerűsítve, a hőmérséklet és a hőntartási idő kapcsolat a következő egyenlet formájában fogalmazható meg.

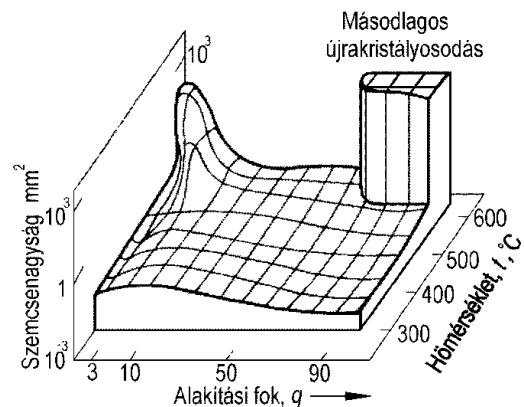
$$T_1(C + \lg t_1) = T_2(C + \lg t_2)$$

A C állandó értéke az ötvözés jellegétől és mértékétől függően 14 és 32 között változik, de kevésbé ötvözött acélok esetén a  $C \approx 20$  érték használható. Más esetben a C értéket kísérletileg lehet meghatározni.

### Ötvöző vagy szennyező atomok hatása az újrakristályosodásra

Az ötvöző vagy szennyező atomok jelenléte az újrakristályosodási folyamatokat általában lassítja a gátolt diffúzió miatt.

A fentiekből látható, hogy a megújulás az újrakristályosodás bonyolult anyagszerkezettani folyamata, amit számos paraméter befolyásol. Az újrakristályosodás és az újonnan kialakuló szemcsék átlagos méretének leírására az úgynevezett újrakristályosodási diagramot alkalmazzák, amelyre példaként a szin alumínium diagramját mutatjuk be (11. ábra).



11. ábra. Alumínium teljes újrakristályosodási diagramja

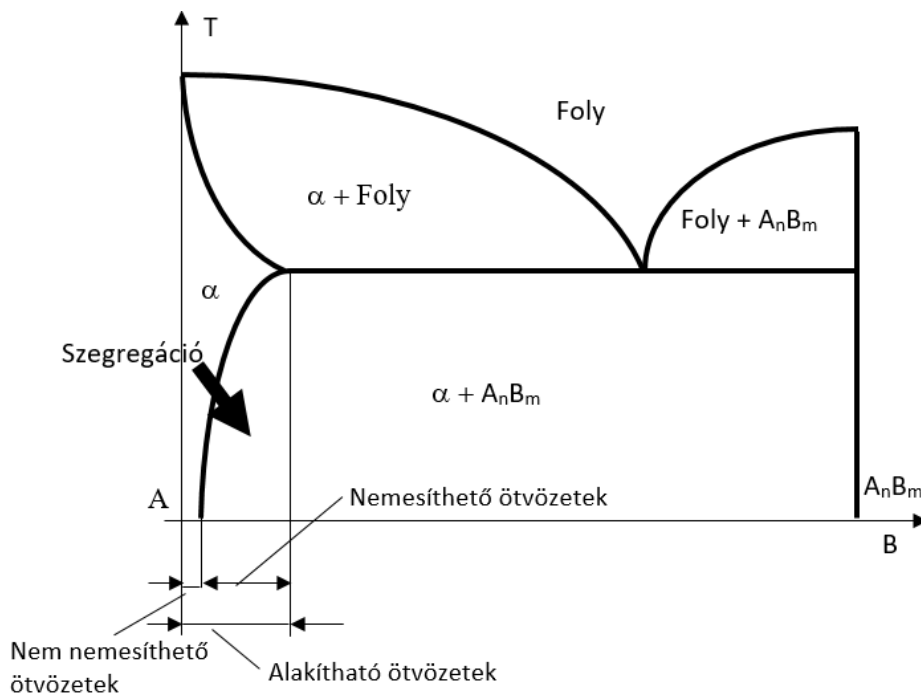


# KIVÁLÁSOS KEMÉNYEDÉS

A kiválásos keményedés jelensége olyan fémek illetve fémötvözetek szilárdságnövelését is lehetővé teszi, amelyeknél nem játszódik le allotróp átalakulás. Ilyenek például bizonyos alumínium ötvözetek (Al-Cu, Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg). Ezek esetében a kiválásos keményedés elvén tudunk szilárdságnövelést végrehajtani.

A kiválásos keményedés feltételei a következők (12. ábra):

- korlátolt oldódás,
- az oldóképesség változása a hőmérséklet függvényében,
- az oldóképesség változását kísérő szegregáció során kemény fázis (általában vegyület fázis) kiválása és
- a szegregáló ötvöző diffúziós tényezője elegendően nagy legyen az alapfémekben.



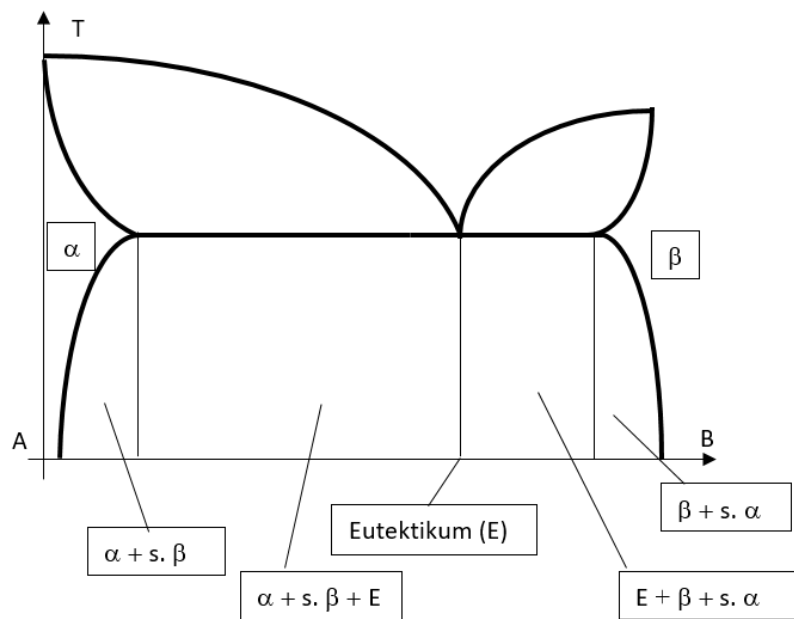
12. ábra. A kiválásos keményedés feltételei

A kiválásos keményedés feltételei teljesülhetnek ún. kvázibinér rendszerekben is, ilyenkor két ötvözőelem vegyületfázisát tekintjük ötvözőnek az alapfémekben (pl. Al-Mg<sub>2</sub>Si ötvözet az Al-Mg-Si ötvözet-rendszerben).

Ahhoz, hogy megértsük a kiválásos keményedés során lejátszódó jelenségeket, ismételjük át az egyensúlyi átalakulás szöveleteleit (13. ábra). A vegyületfázist az ábrán  $\beta$ -val jelöltük, korlátolt oldás itt is lehetséges, ha kvázibinér rendszert tekintünk. (Az elsődlegesen kivált szöveleteket külön betűvel nem jelöltük.)

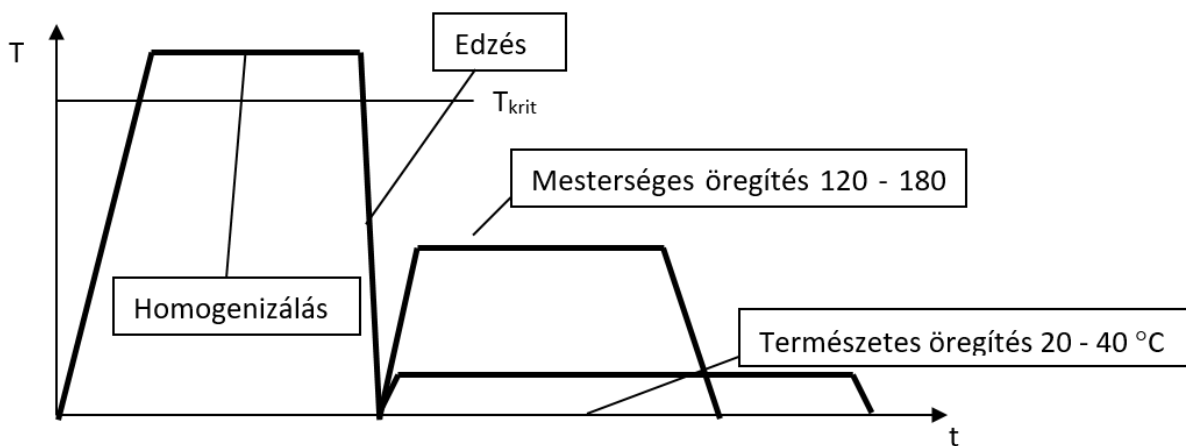
A 12. ábra szerint a nemesíthető ötvözetek szövetszerkezete tehát,  $\alpha$  szilárdoldat+szekunder  $\beta$ , amikor is a másodlagos kiválás tipikusan a szemcsehatáron történik.

A kiválósos keményedés jelensége azon alapul, hogy ezt az egyensúlyi szövetszerkezetet nem engedjük kialakulni. Homogén szilárdoldatot létrehozása után olyan gyorsan hűtjük le a darabokat, hogy az egyensúlyi szövetek (fázisok) kialakulására ne legyen idő (13. ábra).



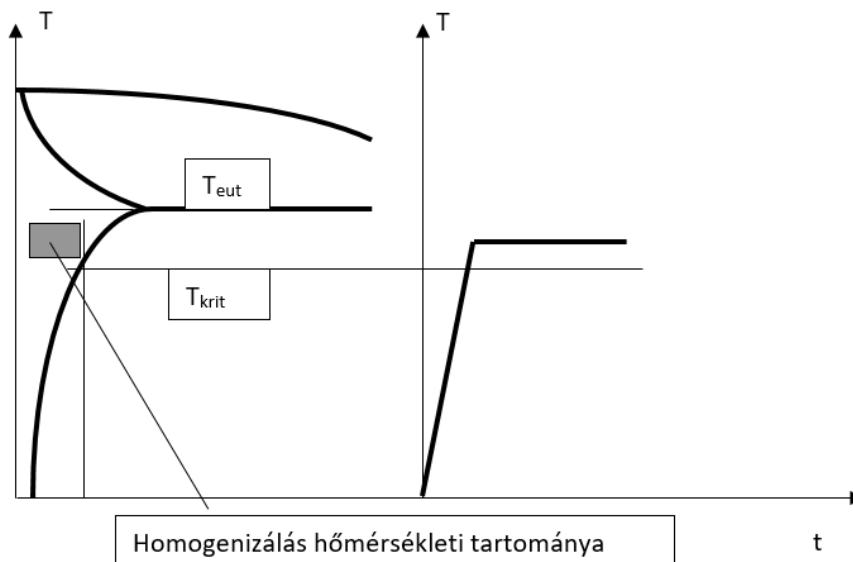
13. ábra. Egyensúlyi szövetelemek

Végző soron az energetikailag stabil egyensúlyi állapot elérésére törekszik az anyag, ezt az állapotot átmeneti fázisok kialakulásán keresztül éri el. Röviden összefoglalva, ezeknek az átmeneti fázisoknak a szilárdságnövelő hatását használjuk ki kiválósos keményedés során. A kiválósos keményedésen alapuló hőkezelés ciklusdiagramja a 14. ábrán látható.



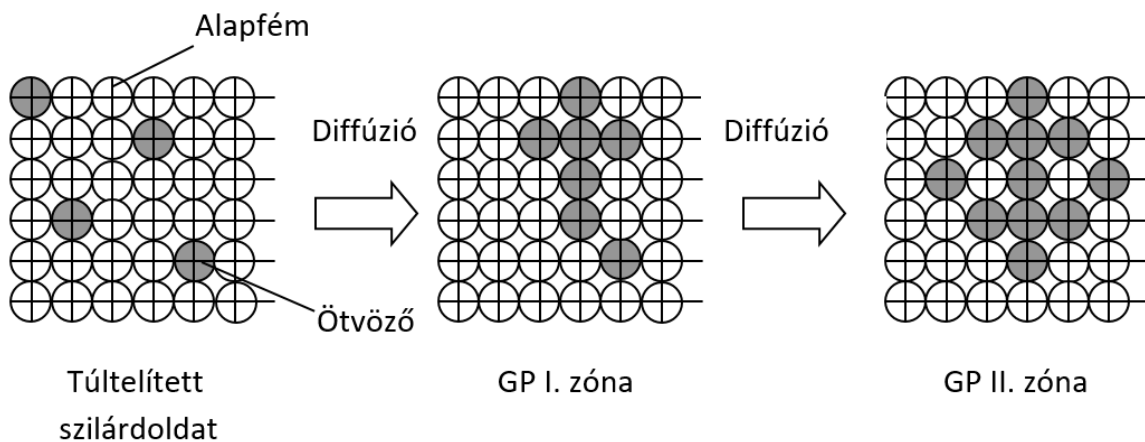
14. ábra. Hőkezelési ciklusdiagram

A homogenizálás során tehát homogén szilárdoldatot hozunk létre. A homogenizálás hőmérsékletét igen körültekintően kell megválasztani, ennek az adott összetétel szerinti szegregációs hőmérsékletnél nagyobb, de az eutektikus hőmérsékletnél alacsonyabbnak kell lennie (15. ábra). A homogenizálás idejét úgy kell megválasztani, hogy teljes keresztmetszetben homogén szilárdoldatot jöjjön létre.



15. ábra. A homogenizálás hőmérsékleti tartománya

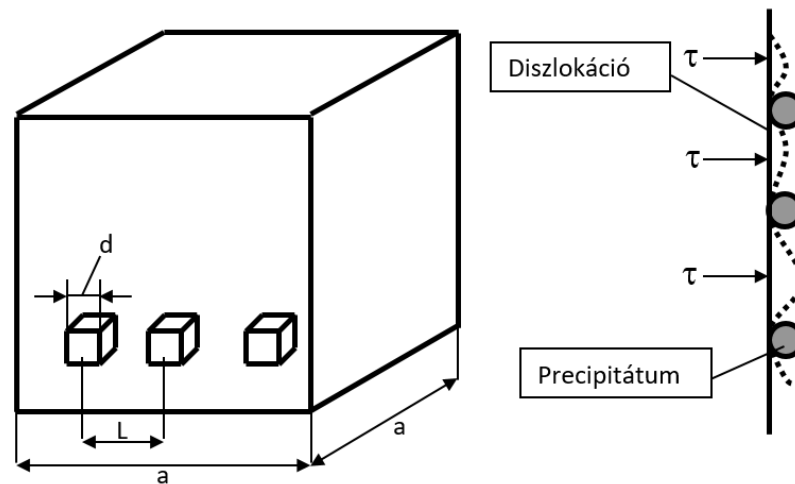
A homogén szilárdoldat létrehozása után gyors hűtéssel, víz- (melegvíz, esetleg olaj) hűtéssel túltelített szilárdoldatot hozunk létre. A kiválásos keményedés feltétele a túltelített szilárdoldat, amelyből természetes illetve mesterséges öregítés során kiváló fázisok, a Guinier-Preston zónák (GP I. ill. II. zónák) hozzák létre a kiválásos keményedést. Minőségileg a 16. ábra szerint képzelhetjük el a zónák kialakulását:



16. ábra. A Guinier-Preston zónák kialakulása

A túltelített szilárdoldatból, az ötvöző atomok (ionok) diffúziós mozgása következtében atomdúsulások alakulnak ki bizonyos síkokban, az ilyen néhány atomsor és néhány 100 nm méretű kiválások a GP I. zónák. A GP II. zónák további diffúzióval jönnek létre, ezek több atomsor és kb. 100 nm nagyságú kiválások. A GP II. zónákban az ionok elrendezése az egyensúlyi vegyületfázisnak felel meg, de azok mérete nem egyensúlyi (annál nagyobb). További diffúzió az egyensúlyi fázisoknak megfelelő méreteket eredményez, amely végső soron az egyensúlyi szövetszerkezetet adja, ezt az ún. túl öregítést el kell kerülni, hiszen a mechanikai tulajdonságok is az egyensúlyra jellemzőek lesznek.

A kiválásos keményedés során kialakuló zónák akadályozzák a diszlokációk mozgását a csúszósíkokban, így szilárdságnövekedést okoznak a képlékenységi jellemzők jelentős rontása nélkül. A szilárdság növekedése a kivált részecskék méretétől és egyenletes eloszlásuktól függ. Minél kisebb méretűek a kiválások és egyenletesebb az eloszlásuk, annál nagyobb a szilárdság növekedése, ez az alábbi egyszerű mennyiségi szemléltetésből is látható: Legyen egy „a” oldalhosszúságú kockában teljesen egyenletes eloszlásban, egy irányban „n” darab kiválás (idegen szóval precipitátum) amelyek távolsága „L” és egy részecske mérete „d” (17. ábra).



17. ábra Kiseb méretű és egyenletesebb eloszlású kiválás nagyobb szilárdságnövekedést okoz

Ideális kristályra ismert, hogy egy diszlokáció által okozott szilárdság növekedés:

$$\tau^* = \frac{Gb}{2\pi L} \quad (3)$$

itt,  $\tau^*$  az egy diszlokáció által létrehozott szilárdság növekedés, amelyre  $b$  Burgers-vektor jellemző,  $L$  pedig azt a távolságot jelenti, amelyen belül egy diszlokáció található,  $G$  a csúsztató rugalmassági modulus. Ha a kivált részecskék távolságát úgy fogjuk fel, mint a diszlokációk távolságát, az előző egyenletből látható, hogy ha  $L$  csökken, akkor a szilárdság nő. Az egyenletes eloszlású precipitátumok (kiválások) feltételezésével írható, hogy a részecskék koncentrációja:

$$c = \frac{(n \cdot d)^3}{a^3} \quad (4)$$

Mivel  $a = n \cdot L$ , a kiválások távolsága úgy is írható, hogy:

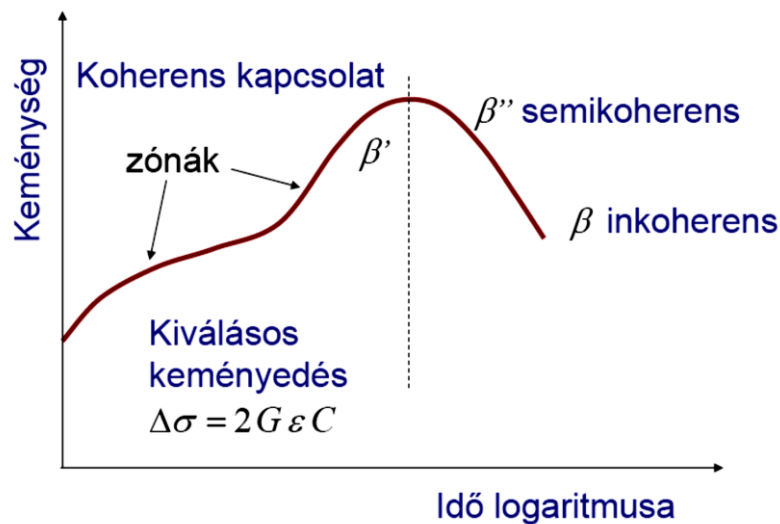
$$L = \frac{d}{\sqrt[3]{c}} \quad (5)$$

A részecskék távolságának helyettesítésével a kiinduló egyenlet a következő alakban írható:

$$\tau^* = \frac{G}{2\pi} \frac{b}{d} \sqrt[3]{c} \quad (6)$$

Ebből az utóbbi összefüggésből látható, hogy ha a kivált részecskék mérete csökken és a koncentrációja nagyobb, nagyobb szilárdságnövekedést kapunk.

Kisebb méretű kiválás kisebb hőmérsékleten jön létre, azaz a természetes (szobahőmérsékleten végrehajtott) öregítés kedvezőbb a mesterségesnél. Ez azzal magyarázható, hogy a kiválások keményedés csíráképződéssel járó folyamat és kisebb hőmérsékleten a kritikus csíráméret is kisebb. A kisebb csíráméret pedig kisebb kiválásokat eredményez. A nagyobb hőmérsékleten végrehajtott öregítés hamarabb okoz szilárdságnövekedést, de az kisebb mértékű lesz.



18. ábra. A kiválások keményedés szilárdságnövelő hatása

A kiválások keményedést, mint említettük, elsősorban alumínium és ötvözetek hőkezelésére („nemesítésére”) használják. Az Al-Mg-Si ötvözetek mesterségesen, míg az Al-Cu ötvözetek természetesen öregednek. Az Al-Zn-Mg ötvözetek önnemesedő ötvözetek, amely azt jelenti, hogy túltelített szilárdoldat jön létre pl. hegesztés után és azt követően természetesen öregednek. Az utóbbi ötvözeteknél akár 600 MPa szakítószilárdság is elérhető nemesítéssel.

A kiválások keményedést szerszámacéloknál is használják szilárdságnövelésre, ugyanis azok az erősen ötvözött szerszámacélok, amelyek karbidképzőkkel vannak ötvözve, komplex karbidok kiválása miatt kiválásokon is keményednek az edzést követő megeresztés során. Például az ún. gyorsacélok ilyenek, amelyeket háromszor megeresztve jelentős keménységnövekedés tapasztalunk.

A kiválások keményedés hatását jól szemlélteti a gyakorlaton hőkezelt Al-Zn-Mg ötvözet keménységének alakulása:

Állapot	Edzett	Természetesen öregített (1 év)	60 °C-n 1 h öregítés	60 °C-n 8 h öregítés	90 °C-n 1 h öregítés	90 °C-n 6 h öregítés
Keménység HR <sub>0,5/625N</sub>	80	105	91	98	89	96
R <sub>m</sub> (MPa)	150	350				

2. táblázat. A kiválások keményedés hatása az Al-Zn-Mg ötvözetek mechanikai tulajdonságaira

## Felkészítést segítő kérdések

- Sorolja fel az újrakristályosító hőkezelés néhány ipari alkalmazását!
- Milyen hatással van az újrakristályosítás az alakított fémek mechanikai tulajdonságaira?
- Hogyan változik egy képlékenyen hidegalakított fém szemcseszerkezete az újrakristályosodás folyamán?
- Néhány mondatban ismertesse a megújulás jelenségét!
- Néhány mondatban és ábrával ismertesse a poligonizáció jelenségét!
- Néhány mondatban ismertesse az új kristallitok képződésének folyamatát!
- Milyen feltételei vannak az újrakristályosodás végbemenetelésének?
- Ismertesse a szemcsedurvulás vagy másodlagos (szekunder) rekrisztallizációt!
- Hogyan írható le az idő függvényében az újrakristályosodott anyaghányad (egyenlet és görbe)?
- Hogyan befolyásolja (merre tolja el) a hőmérséklet növelése az újrakristályosodott anyaghányadot leíró görbét?
- Milyen tényezők befolyásolják az újrakristályosodást?
- Hogyan befolyásolja az előzetes alakítás mértéke az újonnan kialakuló szemcsék átlagos méretét?
- Mi a kritikus alakváltozás?
- Hogyan befolyásolja az előzetes alakítás mértéke a rekrisztallizációs hőmérsékletet?
- Definiálja a homológ hőmérsékletet!
- Hogyan befolyásolja a hőntartási idő az újonnan kialakuló szemcsék átlagos méretét?
- Hogyan befolyásolja a hőntartási hőmérséklet az újonnan kialakuló szemcsék átlagos méretét?
- Írja fel, hogy milyen kapcsolatban áll egymással a hőntartási hőmérséklet és idő az újrakristályosító hőkezelés során!
- Miként befolyásolják az ötvöző vagy szennyező atomok az újrakristályosodás folyamatát?
- Jelleghelyesen vázolja fel az alumínium teljes újrakristályosodási diagramját!
- Egy alumínium ötvözet 500°C-on 20 perc alatt kristályosodik újra. Számítással határozza meg, hogy ugyan ez az ötvözet 520°C-on mennyi idő alatt rekrisztallizálódik (C=20)!
- Milyen feltételei vannak a kiválásos keményedésnek?
- Rajzolja fel a kiválásos keményedés felhasználására alkalmazott hőkezelés ciklus-diagramját!
- Ismertesse a Guinier–Preston zónák kialakulását!
- Magyarázza meg mi az oka annak, hogy a kisebb méretű és egyenletesebb eloszlású kiválások okoznak nagyobb szilárdságnövekedést!
- Rajzolja fel a kiválásos keményedésre jellemző szilárdságnövekedést mutató diagramot!

### **Felhasznált és ajánlott források**

- [1] Dr. Gillemot László: Anyagszerkezetten és Anyagvizsgálat, Tankönyvkiadó, Budapest, 1979
- [2] William D. Callister Jr.: Fundamentals of Materials Science and Engineering An Interactive e-Text, John Wiley and Sons. Inc., 2001
- [3] William D. Callister Jr.: Materials Science and Engineering: An Introduction, John Wiley and Sons. Inc., 2007
- [4] Dr. Prohászka János: Bevezetés az anyagtudományba, Tankönyvkiadó, Budapest, 1988
- [5] A. G. Guy: Fémfizika, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1978
- [6] Tanszéki jegyzetek