

A szerkezeti anyagok nagyobb részében, a fémekben az atomok a tér mindhárom irányában, szabályosan ismétlődő idomok szerint rendeződve helyezkednek el. Az ilyen anyagokat kristályos anyagoknak nevezzük.

Vannak olyan anyagok, amelyeknek atomjai rendezetlenül halmozódnak egymásra, bár atomtávolságaik közel egyenlők. Ezeket az anyagokat amorf (alakatlan) anyagoknak hívjuk. Ilyen minden folyadék. Éppen ezért az amorf szilárd anyagokat, amilyen pl. az üveg, túlhűtött folyadéknak tekintik. Van olyan anyag, amely mindkét változatban előfordul. Ilyen az elemi szén (C), mely szilárd állapotban " amorf alakban és kétféle rendszer szerint (szabályos vagy köbös és hatszöges) kristályosodva is előfordul.

A fémek kristályos szerkezetének jellemzésére általános esetben 3 irány (szög) és 3 távolság (rácsméret, paraméter) szükséges.

A kristályos szerkezetben az egyes részecskék periodikusan ismétlődő, az elemi cellák által meghatározott rendben helyezkednek el. A kristályos szerkezetet másodlagos-, kovalens-, ionos- vagy fémes kötés hozza létre. A halmazállapot változásakor, megolvasztáskor vagy kristályosodáskor, alapvető változás következik be a kristályos anyagokra jellemző hosszú távú rendezettségben. A kristály mindig síkokkal határolt soklapú test. Mivel a síkok egymáshoz való viszonya, a síkok által bezárt szögek sokfélék lehetnek, ezért a kristályok alakja is változatos, de egy adott anyagra jellemző. A kristályosodás során a növekvő kristály, méretétől függetlenül, megtartja az anyagára jellemző geometriai formát,

A kristályrácsnak azt a legkisebb térfogatát, amely már a kristály alakját mutatja, melynek ismételt eltolásával (transzlációjával), sokszorozásával az egész rácsot létre lehet hozni, elemi cellának nevezzük. A kristály jellemzésére elegendő ennek az elemi cellának a geometriai sajátosságait vizsgálni, mivel így az összefüggések jobban követhetők és ugyanakkor ezek lesznek jellemzők egy nagyobb kristályra is. Már az 1800-as évek közepe táján egy francia kristály kutató, Bravais kimutatta, hogy legfeljebb 14 különböző elemi cella alak létezik. A kristályrácsok ezek valamelyikéből, ill. ezek kombinációiból épülnek fel. A kristályrácsot az ún. rácsállandók jellemzik. Ezek a cella élhosszai és az élek által bezárt szögek, melyek anyag-jellemzők.

A kristályok szerkezete az egyes kristálytani irányokban nem mindig azonos. Így azok a fizikai tulajdonságok, amelyek szerkezetfüggők (pl. kristálynövekedés, fénytörés, keménység, hasadás, belső súrlódás stb.), egyúttal irány függők, anizotropok is.

Az elemi cellát egy megfelelően megválasztott térbeli koordináta-rendszerben vizsgálhatjuk (kristálytani tengelykereszt). A tengelyek iránya a kristály éleinek irányával egyezik meg és valamely jellegzetes éllel párhuzamos.

A kristályokat szimmetriaelemeik alapján 7 kristályrendszerbe, ezeken belül 32 kristályosztályba sorolják. Még egyéb csoportosítási szempontok is vannak, pl. optikai szempontból a fénytörés jellegét figyelembe véve 3 csoportba sorolják a kristályokat (izotropok, egytengelyűek, két optikai tengelyűek).

A kristály szó hallatára nagyon általában a szépen nőtt, szabályos ún. egykristályokra gondolunk. Ilyenek azonban csak akkor keletkeznek, ha megfelelő körülmények között, szabadon nőhetnek. Ezzel szemben sok kristályos anyagon szabad szemmel, első rátekintésre nem állapítható meg, hogy kristályos szerkezetű. Ezek ún. polikristályos anyagok. Úgy jönnek létre, hogy az anyag szilárdulásakor nem egy, hanem egymás környezetében számtalan kristály kezd el növekedni és ezek addig fejlődnek szabadon, míg egymást elérve összenőnek szabálytalan kristály határokat kialakítva.

A kristályos anyagokat vizsgálva felmerülhet a kérdés, miért éppen a rácspontokban helyezkednek el az anyag részecskéi.

Az egyes atomok negatív töltésű elektronjai kölcsönösen taszítják egymást, a pozitív töltésű atommagok úgyszintén, ellenben az elektronok és atommagok kölcsönösen vonzzák egymást. Így a részecskék között egyidejűleg két, egymással ellentétes hatás lép fel. Azt, hogy végül is milyen hatás érvényesül, vagyis milyen lesz a két erő eredője, azt a részecskék közötti távolság határozza meg. Ábrázolva mind a vonzó-, mind a taszítóerő változását bemutató függvényt és összegezve ezeket, megszerkeszthető az eredőerő függvénye. Ez megmutatja, hogy két atomot egymáshoz közelítve előbb növekszik a köztük ható vonzóerő, majd egy maximum érték után újra csökkenni kezd. Az eredő görbe metszi az abszcisszatengelyt, vagyis ezen a helyen a vonzó- és taszítóerő kiegyenlíti egymást. Ez éppen a két atom sugarainak távolságában van ($r_a + r_b$). Ez a két atom egyensúlyi távolsága. Ha tovább közelítenénk az atomokat egymáshoz, a taszítóerő értéke hirtelen növekedne és tartana a végtelen értékhez.

Szintén megvizsgálhatjuk az atomok energiaszintjének változását az atommagok távolságának függvényében. Az energia az erőnek a távolság szerinti integrálásával határozható meg és ott van minimuma, ahol az erőfüggvény zérus értéket vesz fel. Itt az atomok energiaszintje minimális.

Ez a pont felel meg a kristályrácsban a rácspontnak. Ebből a pontból a részecskéket kimozdítani csak energia befektetése árán lehetséges (olvadási hő). Az ennél nagyobb energiájú atomok (pl. hőenergia hatására) elhagyhatják ezt a helyet, másként kifejezve az anyag megolvad. Az atomok nemcsak hő-, de mechanikai energia révén is szétválaszthatók (húzó, csavaró, nyíró stb. igénybevétellel). Ezzel szemben nyomó igénybevétel esetén az atomok között exponenciálisan növekvő taszítóerő lép fel és nagysága tart a végtelen értékhez.

Termodinamikai alapismeretek:

- Termodinamika első főtétele: A rendszer belső energiájának megváltozása egyenlő a rendszerrel közölt összes hő és a rendszeren végzett összes munka összegével.
$$\Delta E_b = Q + W$$
- Termodinamika második főtétele (az entalpiára kifejezve):
$$H = G + TS, \quad \text{amiből} \quad G = H - TS$$
- A termodinamikai folyamatok spontán lejárásának feltétele
$$DG = DH - T DS - S DT < 0$$
- állandó hőmérsékleten lejárású folyamatokra
$$DG = DH - T DS < 0$$

Fémek és ötvözeteik kristályosítása

Az elhanyagolható mennyiségű fémporgyártástól eltekintve, a kohászati eljárásokkal a kívánt összetételben előállított fémeknek és ötvözeteiknek a további megmunkáláshoz alkalmas alakját öntéssel alakítják ki. Az iparban alkalmazott fémek és ötvözeteik gyakorlatilag mindig többalkotósak, vagyis ötvözetek. A többalkotós

ötvözetek az alkotók milyenségétől, mennyiségétől és a kristályosodás körülményeitől függően lehetnek homogének vagy heterogének, azaz egy- vagy többfázisúak. A kristályosítás körülményei, különösen a hűtési sebesség jelentősen befolyásolja az anyag szubmikroszkopikus, mikroszkopikus és makroszkopikus méretben értelmezett rendeződését, ezáltal szerkezetét és tulajdonságait.

Az elsődleges kohászati technológiák termékeit a nyersvascipót, a fémport, a bugát, a tuskót másodlagos kohászati eljárással, mint öntéssel, meleg- és hideg-hengerléssel, kovácsolással, sajtolással, extrudálással dolgozzák fel kohászati végtermékké. A gazdaságos gyártás érdekében lehetőleg a végtermékek alakja és mérete a belőle készülő termék alakját és méretét a legjobban közelítse meg. A másodlagos kohászati technológiák végtermékei, a gépipari alapanyagok keresztmetszetüket tekintve lehetnek kör-, négyzet-, téglalap-, szabályos sokszög szelvényű rudak, lemezek, szalagok, csövek, huzalok, profilok, bonyolult alakú zsugorított, kovácsolt, sajtol, öntött termékek.

Az extraktív metallurgiát - az elsődleges kohászati előállítást -, követő kristályosítással általában nem végfelhasználásra alkalmas formájú anyagot állítanak elő, ezt szinte mindig valamilyen alak- és tulajdonságmódosító technológia követi, mégis a kohászati késztermék kristályosításakor kialakult szerkezet alapvetően meghatározza a belőle készült végtermék szerkezetét, így tulajdonságait is.

Az egyes ötvözetek nem mindig homogének, hanem két-, vagy akár több fázisból is állhatnak. A fázisok olyan, önmagukban homogén részei az ötvözetnek, melyek egymástól fizikai módszerekkel elkülöníthetők. Egy zárt rendszerben az eltérő halmazállapotú részek, például folyékony és szilárd részek fázisokat alkotnak.

Azonos halmazállapotú részekben is lehetnek eltérő fázisok. Erre példa lehet egy edényben lévő víz és olaj. Szilárd halmazállapotú rendszerekben is lehetnek különféle elkülöníthető fázisok. Amikor például egy folyékony állapotban lévő, megolvasztott ötvözet kezd megszilárdulni, a kristályosodási folyamat során háromféle szilárd állapotú fázis keletkezhet: színfém, szilárd oldat és vegyület.

Ha ezek a fázisok önállóan fordulnak elő, egyfázisú szövetelemnek nevezzük őket.

Ha két vagy több fázis együtt, egymás mellett van jelen, összetett szövetelemről beszélünk. Szövetelemnek a kristályosodás folyamatának meghatározott szakaszában egy, vagy több fázisból felépülő, azonos tulajdonságú részeit nevezzük.

Az ötvözeteknek lényegében 4 típusát különböztetjük meg:

- Szilárd oldat (egyfázisú ötvözet)
- Fémvegyület (egyfázisú ötvözet)
- Eutektikum (többfázisú ötvözet)
- Eutektoid (többfázisú ötvözet)

Eutektikum

Az eutektikumban két- vagy több kristályos fázis helyezkedik el egymás mellett. E többfázisú szövetelem a folyékony fázisból jön létre. A kristályos fázisok {színiem, szilárd oldat, vegyület} bármelyike képezhet bármelyik kristályos fázissal eutektikumot.

Az eutektikum tehát az alkotóknak egymásra nézve telített folyékony oldatából keletkező két-, három-, négy- vagy ennél is több fázisból álló ötvözete. Az eutektikum szó könnyen olvadót jelent. A szövetelem azért kapta ezt a nevet, mert olvadáspontja a legalacsonyabb olvadáspontú alkotóénál is alacsonyabb. Az eutektikumnak szerkezetét tekintve két típusa van. Az egyikben az egyes alkotó fázisok krisztallitjai lemezek formájában váltakozva követik egymást. Ez a lemezes eutektikum. A

szemcsés eutektikumban az egyik fázis összefüggő alapanyagába a másik fázis gömbszerű szemcséi ágyazódnak be.

Eutektoid

Az eutektoid az eutektikumhoz hasonlóan összetett szövetelem. Attól azonban alapvetően eltér abban, hogy nem folyékony, hanem szilárd fázisból válik ki. Az eutektoid tehát az ötvözet alkotóinak egymásra nézve telített szilárd oldatából keletkező többfázisú ötvözet, amelynek alkotó fázisai szintén bármely fázissal tetszőleges kombinációt hozhatnak létre. Szerkezetüket tekintve szintén lehetnek lemezések, ill. szemcsések.

A kristályosodás:

A kristályosodás, - az olvadékokban viszonylag szabadon mozgó ionok meghatározott felületeken való megkötődése két, jól elkülöníthető részfolyamatra osztható. Az első részfolyamat, a csíráképződés, a rövid távon rendezett ioncsoportok létrejötte, a másik, a kristály növekedése, amely a csírák rövidtávú rendeződését, a szilárd anyag hosszú távú rendeződésévé terjeszti ki.

A két részfolyamat nagyon szoros összefüggésben áll egymással. Értelmszerűen mindkét részfolyamatot a környezeti körülmények, mint a nyomás és a hőmérséklet továbbá az anyagi minőség határozza meg.

Az olvadék hőmérsékletének csökkenésével a rendszer energiája csökken és egyre gyakoribbak lesz az olyan ionrajok kialakulása, amelyekben az ionok helyzete egymáshoz viszonyítottan rendezett. Az olvadékban megjelenő atomrajok térfogatával arányos mennyiségű szabadentalpiának, és az új rendezetten elhelyezkedő részecskék alkotta felület kialakításához szükséges energiának egyensúlyban kell lennie. Minden hőmérséklethez hozzárendelhető egy kritikus méret, a kritikus csíraméret, amelynél kisebb méretű csoportosulások instabilisak, megszűnhetnek. A csíráképződés mechanizmusából adódik, hogy a stabilis kristálycsírák kialakulásának ott van a legnagyobb valószínűsége, ahol már eleve rendelkezésre áll stabilis részecske-csoportosulás. Például az olvadékkal érintkező szilárd anyag felületén - heterogén csírák - vagy a folyadékban már meglevő szilárd részecskék - homogén csírák - környezetében, illetve ott, ahol a hőmérséklet a legkisebb. Mindkét feltételnek - a szokásos kohászati folyamatokat feltételezve - a kristályosító, például a kokilla fala felel meg leginkább.

Ha az olvadék hőmérséklete a szilárd/folyékony rendszer stabilitását jelentő hőmérséklet, az olvadáspont alá csökken, a rendszer túlhűtté válik. A túlhűtéssel csökken a csírák mérete és számuk nő. A túlhűtés mértéke természetesen a határoló felület hőmérsékletétől és hővezető képességétől függ. Mindazok a részecske csoportosulások, amelyeknek görbületi sugara kisebb az adott hőmérsékleten stabilis, kritikus csíra görbületi sugaránál, megolvadnak, mert szabadentalpiájuk nagyobb, mint az olvadéké. Ha a görbületi sugár ennél nagyobb, növekedésnek indulnak.

A kristálynövekedés, a kristályosodási folyamat csak akkor haladhat előre, ha a rendszer a kristályosodási front környezetében túlhűtt. Kellő túlhűtéssel elkerülhető, hogy a kristályosodáskor felszabaduló energiának az a része, amely már nem szükséges az új felület képződéséhez, olyan mértékben felmelegítse a már megszilárdult anyagot, hogy az elveszítse stabilitását, vagyis megolvadjon.

A többkomponensű rendszerekben, a kristályosodott réteg összetétele eltér az olvadékétól. Az összetételbeli különbség egyben energiatartalom-különbséget is

jelent, ami a kristályosodás módjában is eltérést okozhat. A kristályosodási folyamat ennek megfelelően jellemző csoportokba sorolható:

A kristályosodást a hőmérséklet-különbség irányítja, ha az összetétel-változás csekély és ezért érdemi változást a kristályosodási folyamatban nem okoz, ami a színfémekre jellemző,

A kristályosodási folyamat fő irányítója a koncentráció-különbség, ha az összetétel-változás a szilárd/folyékony fázis határán számottevő, ami a szilárd oldatokra jellemző,

Az eutektikum kristályosodása a kristályosodás egy speciális esete, amikor a kristályosodás során az olvadék az összetétel-változása miatt válik túlhűtté.

Az eutektikum kristályosodása

Az eutektikus ötvözetek esetében olvadt állapotban az alkotók kölcsönösen szilárd állapotban azonban nem, vagy csak korlátozottan oldják egymást. Az eutektikus ötvözetek további jellemzője, hogy pontosan meghatározott összetételnél adott, minimális, úgynevezett eutektikus olvadáspontjuk van. Az eutektikum kristályosodásakor az olvadáspontot elérve a rendszerben egyensúlyi helyzet áll be. Az egyensúlyi helyzetű olvadékból az eutektikumot alkotó fázisok kristályosodása egymás mellett, egyidejűleg megy végbe. Az egyik alkotó kristályosodásával ugyanis, a visszamaradó olvadék a többi összetevő vonatkozásában dúsul, ami a likvidusz hőmérséklet növekedésével jár, vagyis ezáltal az eutektikus hőmérsékletű rendszer túlhűtté válik. A túlhűtés következtében az olvadékból a dúsult összetevő kristályosodása is megkezdődik.

Az eutektikus rendszert alkotó összetevők közül természetesen az kristályosodik elsőként, amely kevésbé hajlamos a túlhűtésre. Amennyiben az egyik alkotó csíráképződési hajlama erős, a kristályosodáskor sok csíra keletkezik, az eutektikum szövetszerkezete finomszemcsés lesz. Amennyiben a felületi feszültség nagy, akkor a második fázis globuláris, ellenkező esetben tűszerű lesz.

Csekélyebb csíráképződési hajlam mellett, ha a szilárd fázis és az olvadék közötti felületi feszültség nagy, a fejlődő kristályok oszloposak lesznek. Ha a felületi feszültség kicsi, az eutektikum egyik kristályosodó fázisa lemezszerű.

Ha az eutektikus összetételű olvadék oszlopos, vagy lemezszerű kristályok formájában szilárdul meg, a kristályosodás sebességének növekedése az oszlopok átmérőjének, illetve a lemezek vastagságának és a közöttük levő távolságnak a csökkenését, a szerkezet finomodását eredményezi.

Kristályosító eljárások

A kristályosítás befejeztével az anyag összetételét általában egyáltalán nem, szerkezetét csak jelentős ráfordítások árán lehet változtatni. Ezért a késztermék kívánt tulajdonságainak, előállítási költségeinek minimalizálása érdekében, nagy figyelmet kell fordítani a kristályosítási eljárás, ezen belül a technológia kiválasztására.

A fémolvadékok kristályosítása néhány, tömegszerűségét nézve, elhanyagolható eljárástól - mint az egykristály-, fémüveg-, és fémporgyártástól -, eltekintve tuskóöntéssel, folyamatos öntéssel vagy öntvehengerléssel történik.

Tuskóöntés:

Az acél tuskóöntésekor az olvadékat vastag falú, öntöttvas anyagú kokillában kristályosítják. A kokilla lekerekített, általában négyzet szelvényű, szemben levő oldalfalai kis szöget zárnak be egymással, hogy a lehűlt tuskóról a kokillát viszonylag egyszerűen le lehessen húzni. Az öntés végezhető alulról és felülről.

Két típusát különböztetjük meg:

- Alsó öntés
- Felső öntés

A nagyon gyors és a nagyon lassú kristályosodási sebességnél a makroszkopikus dúsulás mértéke kisebb. Ennek magyarázata az, hogy a gyors kristályosodáskor, a szilárd fázisban az oldott anyag mennyisége meghaladhatja az oldhatóságot is. A lassú kristályosodáskor a kialakuló dendrit oldalágak a bezáródó olvadék térfogatokban megakadályozzák az olvadék koncentráció-különbségének diffúzióval, de különösen a keveredéssel való kiegyenlítődését.

A fémek gázoldó képessége olvadt állapotban közel egy nagyságrenddel nagyobb, mint a kristályosodási hőmérsékletnek megfelelő szilárd fázisban. Természetesen egy megfelelően tisztított fémolvadék oldott gáztartalma meg sem közelíti az oldhatósági határt, de a kristályosodáskor a visszamaradó olvadék gáztartalma mindig növekszik, míg végül a túltelítetté váló oldatból a gáztartalom buborékok formájában kiválik. A szilárd fázis jelenléte kedvez a buborék képződésének, ezért a túltelített oldatból a buborékok legnagyobb valószínűséggel a szilárd/folyékony fázis határán képződnek és a hidrofób tulajdonságnak megfelelően a felülethez tapadnak.

Ha a kristályosodási sebesség nagy, a megszilárduló fémekben az egyensúlyinál nagyobb mennyiségű gáz marad oldott állapotban. Ilyen esetben a kiváló gáz mennyisége viszonylag csekély, a síkszerű fázishatáron kiváló apró buborékokat a kristályosodási front maga előtt tolva, az olvadék belsejébe juttatja. Eközben a buborékok a folyamatos gázkiválás és a buborékok egyesülése miatt, egyre növekednek. A buboréktérfogat növekedésével arányosan nő a felhajtó erő, ami egy kritikus átmérőnél már képes leküzdeni a felületi feszültségből származó, a szilárd fázishoz tapasztó erőt. A felülettől így elszabadult buborék az olvadék felszínére törekszik, s ott a kristályosodó rendszerből távozik. Ha a rendszer felülete befagy, ezek a nagyobb méretű buborékok a szilárd felső kéreg alatt gyűlnek össze, egymással egyesülve egyre nagyobbá válnak, végül gömb alakú pórust képeznek.

Ha a kristályosodási sebesség gyors, de a kristályosodási front tagolt, a piciny pórusok beékelődhetnek a növekvő oszlopok közé, ahol a gyorsan növekvő kristályok közé befagyva, de még mindig növekedve, tömlő alakú pórust hoznak létre.

Ha a kristályosodási sebesség lassú, a kristályosodás a dendrites kristályosodással megy végbe. A dendritek növekedési iránya jó közelítéssel párhuzamos a legnagyobb hőmérséklet-gradiens irányával, vagyis merőleges a kokilla falára. Ez irányított, sugaras szemcseszerkezethez vezet. Lassú kristályosodáskor a szilárd fázisban csak az egyensúlyi oldhatóságnak megfelelő gáztartalom marad vissza, ami viszont nagyobb mértékű gázkiválással jár együtt. Ennek következtében a gáztartalom nagy része buborékok formájában képes elszakadni a kristályosodási fronttól, kisebbik része mikropórusok formájában befagy a dendrit oldalágai közé. A nagyobb keresztmetszetű tuskókban a sugaras, dendrites réteg vastagsága olyan nagy is lehet, hogy a magban már az egyes irányokban a hőmérséklet gradiens nem, vagy csak lényegtelen mértékben tér el. Ilyen körülmények között a kristályosodási sebesség nagyon lassú, az olvadékban szabadon lebegő kristálycsí-

rák képződnek, amelyek megközelítően minden irányban azonos méretű szemcsék formájában kristályosodnak meg.

Az acél kristályosításakor egy sajátos folyamat megy végbe. Ez azzal van összefüggésben, hogy a dúsuló karbon- és oxigéntartalom az olvadékban reakcióba lép egymással és a vasban oldhatatlan szén-monoxid képződik.

Folyamatos öntés és kristályosítás:

A folyamatos öntés a kristályosítás korszerűbb eljárása, mint a kokillába végzett öntés, mert:

- az intenzív hűtés miatt a dendrites kristályosodás elkerülhető,
- a gyors kristályosodásnak köszönhetően lényegesen kisebb a makrodúsulás és a porozitás,
- a kristályosítás során a zsugorodás okozta fogyást a folyamatosan meglevő olvadék pótolja, ezáltal a levágási veszteség nincs, jobb a kihozatal,
- az öntés folyamatosra tehető és automatizálható,
- a kristályosított buga profilja és mérete viszonylag tág határok között változtatható, alkalmazkodva ezzel a további feldolgozási műveletek igényeihez.

A folyamatos öntés számos, felsorolt előnye mellett az egyik hátránya, hogy az intenzívebb hőelvonás miatt számolni kell a termikus feszültségek kiváltotta repedések keletkezésének veszélyével. Másik hátránya a csillapítatlan acélok öntésekor jelentkezik, nevezetesen a kristályosodáskor a heves gázkiválás megzavarhatja az öntési folyamatot és jelentős mennyiségű porozitással kell számolni a bugában.

A folyamatos öntés elrendezését tekintve lehet vízszintes íves, vagy függőleges.

Az öntőüstből az olvadt fémet egy átmeneti tárolóba, az öntővályúba vezetik, ahonnan az , az öntőnyílás szabaddá tétele után a vízzel hűtött kristályosító(k)ba jut. A folyamat kezdetén a kristályosító alját a kristályosító rúddal lezárják, majd az öntőnyílást felszabadítva, az olvadék a félig zárt kristályosítóba folyik, ahol elkezdi megszilárdulni.

A kristályosító rudat egyenletes sebességgel lassan süllyesztik, s vele mozog a kristályosító is. A gyors hőelvonás következtében kialakul egy szilárd kéreg, ami a kristályosodást kísérő zsugorodás miatt elválk a kristályosító falától. A fém- rúdnak a már megszilárdult kérgű szakaszáról a kristályosítót a süllyesztési sebességnél sokkal gyorsabban, felfelé elmozdítják. Ezzel mintegy kihúzzák a fémrudat a kristályosítóból.

Öntvehengerlés:

Az alumínium, de különösen a réz félkészgyártmányok egyre nagyobb hányadát az öntés és a meleghengerlés műveletét egyesítő, öntvehengerléssel állítják elő. Az eljárás előnye, hogy műveletek összevonása révén csökkenthetők a gyártási költségek.

Öntvehengerléssel szalag, illetve huzal gyártható. Az öntvehengerlő berendezésnél a kristályosító szerepét forgó, viszonylag nagyméretű dob látja el. A henger palástjára olyan profilú hornyot munkálnak, amely megfelel a gyártandó termék keresztmetszetének.

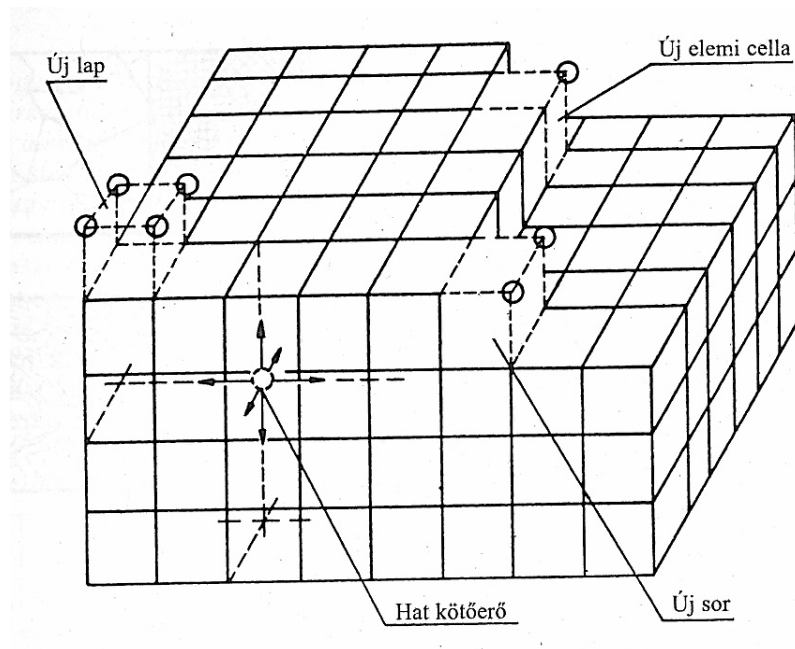
Az olvadt fémet bevezetik az öntőforma szerepét betöltő horonyba, ahol a forgó dob az olvadékot magával ragadja. A dobon egy acélszalag van átvetve, amely a fém kifolyását megakadályozza. A fém, a dob elfordulása közben megszilárdul az intenzív - vízzel való -, hűtés hatására. A mintegy 200-250°-os elfordulás után a

megszilárdult huzal kellő szilárdsággal rendelkezik ahhoz, hogy a tároló dobra felcsévélhető legyen.

A szalag gyártására alkalmas öntvehengerlő berendezés annyiban tér el a huzalgyártásra szolgálótól, hogy a kristályosító a láncalpas járművek láncalpára emlékeztet. A hűtőtömbök mintegy láncszemek kapcsolódnak össze a kétpár hajtó- és feszítőkerekek között. A láncok egymással szemben haladva az öntőcsatorna vonalában két párhuzamos síkot formáznak. Az így kialakított térbe befolyó fém - a hűtött tömbök hőelvonása következtében megszilárdul. A felületén szilárd anyagot a mozgó tömbök magukkal vonszolják. A szalag áthaladva a kristályosítón feltekercselhetővé válik.

Kristályrács típusok:

1. Fémrács : Rácspontokban fémionok , összetartó erő fémes kötés.
Alaptípusok :
 - egyszerű köbös
 - lapcentrált köbös
 - tércentrált köbös
 - hexagonális szoros illeszkedésű
2. Ionrács: Rácspontokban pozitív(+) és negatív(-) töltésű ionok. Anion/kation arány a töltésarány szerint. Koordinációs-szám a méretarány és töltésarány szerint
3. Atomrács: Az egész kristályban kovalens kötések térhálója található. Kötések vegyértékszög , kis koordinációs szám , rossz térkihasználás és kis sűrűség jellemzi.
4. Molekularács: Rácspontokban molekulák. Kristályt összetartó erő: másodlagos kötés. Nem irányított erő, az elrendezést a geometriai viszonyok szabják meg. Pl.: víz, CO₂, NH₃, szerves vegyületek, polimerek, O₂, nemesgázok.



Kristálvrács keletkezése

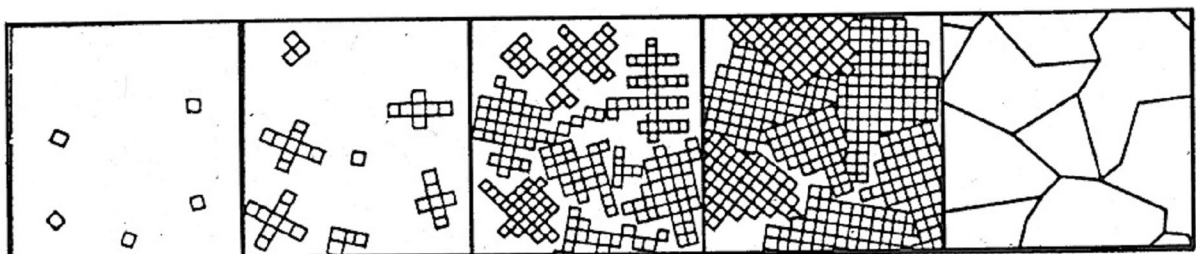
Krisztallitok fejlődése , típusai

Krisztallit :

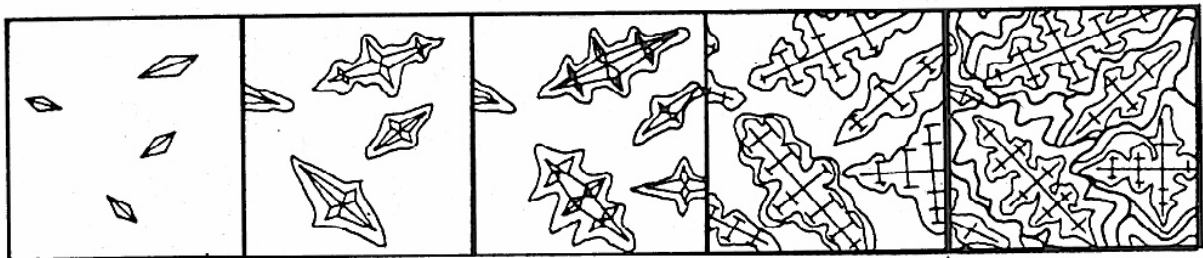
Azok a rendkívül kisméretű gömbölyded, pálcika-alakú vagy hajszálvékony kristályok, kristálykezdemények, amelyek mikroszkópban láthatóak, de közelebbről nem meghatározhatóak.

A krisztallitoknak, kialakulásuk jellege és ebből kifolyólag alakjuk szerint, két típusa van. Ha a krisztallitok növekedésekor nincs kitüntetett irány, vagyis a kis kristályok a tér minden irányában közel azonos módon, egyenlő mértékben növekednek, akkor sok síkkal határolt, úgynevezett poliéderez kristályok fejlődnek.

Ha a krisztallitok növekedésekor a kristályosodás sebessége nem egyenlő a tér minden irányában, hanem van a növekedés szempontjából kitüntetett kristálytani irány, melyben a növekedés nagyobb, a kialakuló kristályok megnyúltak, tűs szerkezetűek, elágazóak lesznek. Ezeket dendrites krisztallitoknak nevezik. Mindenki által jól ismert hókristályok is ilyenek.



Poliéderez krisztallit



Dendrites krisztallit

A krisztallitok egy harmadik, ritkábban előforduló alak a szferolitos vagy sugaras szerkezetű krisztallit. Fémek kevésbé, de például az öntöttvasban a grafit bizonyos körülmények között így kristályosodik. A grafitcsírákból sugár irányú kristálykák nyalábja fejlődik ki, melyeket növekedés közben megközelítően gömbfelület határol (pl. gömbgrafitos vasöntvényekben).

A keletkező krisztallitok alakját a hőelvonás jellege befolyásolja. Ha a hőelvonás a tér minden irányában egyenletes, akkor poliéderez, ha nem, akkor dendrites kristályok keletkeznek.

A fémeknek azt a tulajdonságát, hogy az olvadékban vagy más néven ömledékben a hűtés hatására kristálycsírák keletkeznek, kristályosodási képességnek (K_k) nevezzük. A kristályosodási képességet a térfogategységnyi ömledékben, egységnyi idő alatt képződő kristálycsírák számával fejezhetjük ki.

A kristályosodás pontosan a dermedési hőmérséklet elérésekor még nem indul meg, hanem az olvadékot kissé e hőfok alá kell hűteni. Ezt a hőmérsékletkülönbséget túlhűtésnek nevezzük. A túlhűtés mértékének növelésével a kristályosodási képesség előbb nő, majd egy maximum elérése után csökken.

A kristályosodási képesség növekedését nemcsak a túlhűtés mértéke, hanem a hűtés sebessége ($v_{hűtés}$, $^{\circ}\text{C}/\text{min}$), is jelentősen befolyásolja. Lassú lehűlés esetén a csíráképződés csak nagyobb mértékű túlhűtés hatására indul meg és lassabban nő. Ha a hűtés sebessége nagyobb, már kisebb mértékű túlhűtés is megindítja a csíráképződést és annak fokozódása is intenzívebb lesz.

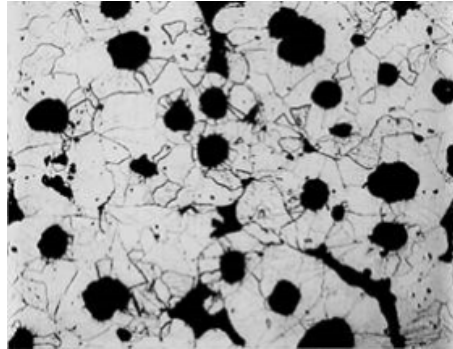
A krisztallitok növekedésére hatással van még a kristályosodási sebesség, ami a kristályok lineáris növekedésének mértékét jelenti időegység alatt (K_s [cm/min]). A kristályosodás sebessége a túlhűtés mértékének fokozásával eleinte nő, majd egy maximális értéken állandósul. A hűtés sebességének változása ezt a tényezőt nem befolyásolja.

Azt, hogy a kristályosodás során az ötvözet durva, nagy krisztallitokból fog állni vagy finom szerkezetű lesz, esetleg közepes méretű szemcsék alkotják, a kristályosodási képesség és a kristályosodási sebesség együttes hatásaként alakul ki.

Lassú hűtés esetén a csíráképződés lassan indul meg és még nagyobb túlhűtés esetén sem nő nagymértékben. A fémfürdőben még kevés a kristályosodási középpont, amikor a kristályosodási sebesség már elég nagy. Így a krisztallitok nagyobbra nőnek, az ötvözet durvaszemcsés szerkezetű lesz. A nagyobb krisztallitok között ható kötőerő kisebb, az ötvözet szilárdsága kisebb lesz. Gyorsan hűlő ömledékben a csíráképződés még kisebb túlhűtés esetén is viszonylag nagy. Ezért az egyes csírák növekedéséhez kevés hely áll rendelkezésre, növekedésük hamar befejeződik. Így az ötvözet finomszemcsés

szerkezetű lesz. A kisebb krisztallitok között ható kötőerő nagyobb, az ötvözet szilárdabb lesz.

Az ömledékben keletkező saját fajtájú kristálycsírák mellé idegen fajtájú csírák is be-
vihetők, például ötvöző atomok formájában. Ezt az eljárást beoltásnak vagy
modifikálásnak nevezzük. Ezeknek a csíráknak a hatása hasonló, mint a saját
fajtájúaké, de számuk nem függ a túlhűtés mértékétől, csak az ötvözés fokától. Így
lassú hűtés mellett is létrehozhatunk finomszemcsés szövetszerkezetet.



A szferolitos kristályosodás
a gömbgrafitos öntöttvas kristályosodása

Fémek főbb kristályrács típusai:

A kristályos anyag tulajdonságaira az elemi cella geometriáján kívül a következő pa-
raméterek vannak hatással:

- a rácsparaméter, az elemi cella élének hossza, 10^{-10} m,
- A az egy elemi cellához tartozó atomszám,
- N a koordinációs szám, ami egy atom közvetlen szomszédainak számát jelenti,
- d atomátmérő (a-paraméter függvényében kifejezve),
- r atomsugár, 10^{-10} m,
- T térkitöltés, egy elemi cellához tartozó atomoknak és az elemi cella tér-
fogatának aránya, [%]
- r_0 az elemi cellát felépítő atomok közötti résekbe beírható legnagyobb
gömb sugara,
- (x_a ; y_a ; z_a) az r_0 sugarú gömb középpontjának koordinátái
- M Miller-index, A kristálysíkok helyzetének jelölésére szolgáló számok vagy
betűk. A lap térkoordinátáit (tengely-metszetét) kifejező paraméterek reciprok
értéke.

A köbös rács típusnak három fajtája van:

1. egyszerű köbös,
2. térközepes köbös,
3. lapközepes köbös rács.

Mindhárom esetben a fémionok a kocka csúcspontjaiban helyezkednek el, de a tér-
közepes köbös rácsnál (röviden - tkk) még a kocka térátlóinak metszéspontjában is,
a lapközepes köbös rács esetén (röviden - lkk) még a lapátlók metszéspontjaiban is
fémionok vannak.

Egyszerű köbös rendszer jellemzői:

Az egy elemi cellához tartozó atomok számát a kocka csúcaiban helyet foglaló atomok számából lehet meghatározni. Ezek száma ugyan nyolc, de az egyes atomok nem csak egy, hanem az összes szomszédos (összesen nyolc) elemi cellához tartoznak. Könnyen belátható, hogy minden atomnak a három tengely mentén az egyik és a másik oldalon is van egy-egy szomszédja. Így a koordinációs szám 6. A térkitöltés az elemi cellának és a cellához tartozó atomok térfogatának arányát fejezi ki. Az elemi cellában a legnagyobb üres hely középpontja a kocka középpontjában, vagyis a térátlók metszéspontjában. A legszorosabb illeszkedésű sík Miller-indexe: (100).

Térközepes köbös rács jellemzői:

Egy elemi cellához tartozó atomok száma az egyszerű köbös cellához képest eggyel több, mivel a térközépen lévő atom csak ehhez az egy cellához tartozik. Ha a kocka közepén lévő atomot választjuk a vizsgálathoz, könnyű belátni, hogy egy atom közvetlen szomszédainak száma, vagyis a koordinációs szám: 8. Mivel az atomok a testátló mentén érintkeznek. A rács legsűrűbb atomsíkjának Miller-indexe: (110). Ilyen térközepes köbös rendszerben kristályosodik a lítium (Li), a nátrium (Na), a kálium (K), a vanádium (V), a króm (Cr), a molibdén (Mo), a wolfram (W) és ilyen a vas α -módosulata.

A lapközepes köbös rács jellemzői:

Mivel itt a hat lap közepén lévő atomok két szomszédos cellához tartoznak, így az egy elemi cellához tartozó atomok száma: 4. Koordinációs szám: 12. A szoros illeszkedésű sík Miller-indexe: (111).

Ilyen rendszerben kristályosodnak a legfontosabb gyakorlati fémek közül a réz (Cu), alumínium (Al), nikkel (Ni), Ólom (Pb) és a nemesfémek. A vas γ -módosulata szintén lapközepes köbös szerkezetű.

A hatszöges (hexagonális) kristályrács jellemzői:

A gyakorlatban használt fémek szempontjából kisebb jelentőséggel bír a hatszöges vagy hexagonális rács. Az egyszerű módosulat esetén a fématomok a szabályos hatszögletes hasáb sarokpontjaiban helyezkednek el. Ilyen rácsban kristályosodik a grafit (C).

Ennél sűrűbb illeszkedésű hexagonális rendszerben nemcsak a sarokpontokban, de az alap- és fedőlapon, valamint a hasáb belsejében is található fématom. Ilyen rendszerben kristályosodik a horgany (Zn), a magnézium (Mg), a kadmium (Cd) és ilyen a titán (Ti) egyik módosulata.

A kristálysíkokban az atomok szabályos hatszögeket alkotnak, köztük a távolságok egyenlők, kapcsolatuk stabil. Ennél a síkok távolsága nagyobb, ezek egymáson könnyebben elcsúszhatnak.

A sarokpontokban lévő atomok hat cellához tartoznak, a lapokon lévők kettőhöz, a hasáb belsejében lévő értelemszerűen csak egy cellához. Így az elemi cellához tartozó atomok száma: 6. A koordinációs szám ebben a rendszerben: 12, a térkitöltés 74%. A legsűrűbb illeszkedésű sík Miller-indexe (0001).

A tetragonális rács lényegében a köbös rácsból származtatható. Ha a kocka az egyik irányban megnyúlik valamilyen ráctorzító hatás, pl. beékelődő szénatom miatt kialakulhat a tetragonális (négyzetes oszlop) szerkezet.

Kristályrács típusok				
Rácsjellemzők jele	Egyszerű köbös	Térközepes köbös	Lapközepes köbös	Hexagonális
a	a	a	a	a
A	1	2	4	6
N	6	8	12	12
r	$0,5 a$	$0,43 a$	$0,35 a$	–
V_a	$0,52 a^3$	$0,34 a^3$	$0,185 a^3$	–
T	52%	68%	74%	74%
r_0	$0,365 a$	$0,126 a$	$0,145 a$	–
$(xa; ya; za)$	$\left(\frac{1}{2}a; \frac{1}{2}a; \frac{1}{2}a\right)$	$\left(\frac{1}{2}a; \frac{1}{4}a; 0\right)$	$\left(\frac{1}{2}a; \frac{1}{2}a; \frac{1}{2}a\right)$	–
M	(100)	(110)	(111)	(0001)

a – mindenkorí rácsállandó, nagysága egy adott fémre jellemző, 10^{-10} m.

Gibbs-féle fázisszabály:

A **Gibbs-féle fázisszabály** a többkomponensű, heterogén rendszer komponenseinek (K), fázisainak (F), szabadsági fokainak (SZ) száma és a külső állapotjelzők (nyomás, hőmérséklet, koncentráció stb.) száma között állapít meg viszonylag egyszerű és általános érvényű összefüggést. A törvény az 1870-es években fogalmazódott meg és Josiah Willard **Gibbs** amerikai elméleti fizikus, kémikus és matematikus – a kémiai termodinamika egyik megalapozójának – nevéhez fűződik.

Komponensnek (K) nevezzük a rendszer kémiailag független alkotórészeit (egymástól függetlenül létező anyagfajtákat: atom- és molekulafajtákat). Ha a rendszer különféle molekulái között reakciók játszódhatnak le, a komponensek számát a jelenlevő anyagfajták és a köztük lehetséges független reakciók számának különbségeként kell figyelembe venni.

Fázisnak (F) nevezzük a rendszer azonos fizikai és kémiai paraméterekkel rendelkező (homogén) légnemű, folyadék vagy szilárd halmazállapotú részeit. Nem egyszerűen a halmazállapot fajtákról van szó, mert mind folyadék, mind szilárd fázis többféle is lehet jelen a rendszerben.

Szabadsági foknak (SZ) a szabadon változtatható intenzív paraméterek számát nevezzük.

Ezen intenzív állapotjelzők értékét egy bizonyos folytonos intervallumon belül szabadon választhatjuk meg anélkül, hogy a fázisok száma megváltozna: fázis eltűnne vagy új keletkezne.

$$F + SZ = K + 2$$

A fázistörvénynek ez az alakja akkor érvényes, ha a rendszer állapotát a nyomás, a hőmérséklet és a koncentrációk határozzák meg. Ha a rendszer egyensúlyát más intenzív állapotjelzők is befolyásolják, akkor azok számát is figyelembe kell venni.

Ha viszont a rendszer egyensúlyi viszonyaira például a nyomás gyakorlatilag nincs hatással – bizonyos esetekben a kondenzált rendszereknél –, akkor a szabadsági fokok száma csökken 1-gyel, s a Gibbs-féle fázistörvénynek az alábbi alakja lesz érvényes:

$$F+SZ= K+1 \quad (\text{a nyomás állandó})$$

Bravais rácsok:

Rácsvektor ($\underline{R}_n$): olyan vektor, mely mentén ha eltoljuk a rácsot, önmagába megy át. (ez a translációs vektor is)

Ez felbontható elemi rácsvektorok lineáris kombinációjára: $\underline{R}_n = n_1 \underline{a}_1 + n_2 \underline{a}_2 + n_3 \underline{a}_3$
Az ilyen $\underline{R}_n$ vektorral való eltolását *transzlációs műveletnek* nevezzük. Az ilyen műveletek összessége a translációs csoportot alkot.

Pontrács: pontok olyan háló szerű elrendeződése, amelyben minden kiszemelt pont környezete minden szempontból azonos akármelyik másik pont környezetével.

Kristályszerkezetet akkor kapunk, ha a rács minden pontjában azonos összetételű irányítású atomcsoportot helyezünk el.

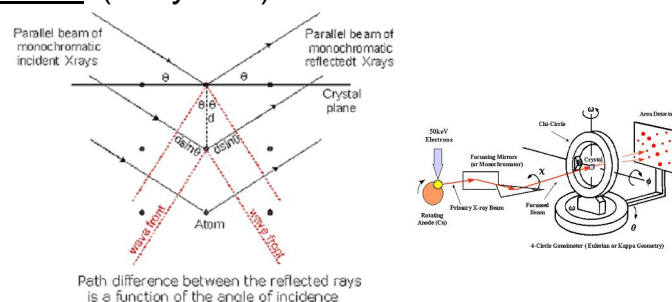
Ideális kristály: olyan test, amelynek atomjai rácsszerűen úgy helyezkednek el, hogy létezik három ($\underline{a}_1, \underline{a}_2, \underline{a}_3$) vektor, hogy az atomi elrendeződés minden pontból ugyanolyannak látszik.

Elemi cella: elemi rácsvektorok által kifeszített paralelepipedon. $\underline{a}_1$ ($\underline{a}_2 \times \underline{a}_3$) Az elemi cella *primitív*, ha csak a csúsaiban tartalmaz rácsponthoz. Wigner-Seitz cella: Azon pontok halmaza, melyek közelebb vannak egy adott rácsponthoz, mint bármely másikkhoz. (Ha a kristálynak van valamilyen szimmetriája, akkor ez a WS-cellának is megvan, míg az elemi cellának nincs!)

230 tércsoport és 32 pontcsoport (7 osztályba sorolva) létezik 3D-ben, 10 pontcsoport 2D-ben 14 Bravais rács létezik 3D-ben, 7 Bravais rács létezik 2D-ben.

A kristályszerkezet meghatározása:

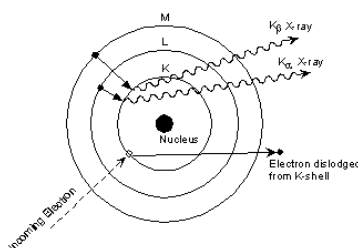
Röntgen-diffraktométer (X-ray diffr.)



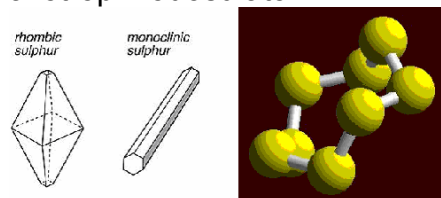
A Bragg-törvény

θ irányban erősítés van, ha: $2 d \sin \theta = n \lambda$

A röntgensugár előállítás: elektromos térben felgyorsított nagy energiájú elektronokat fémlamezbe ütköztetünk: egy belső pályáról gerjesztődik egy elektron, ennek a helyére valamelyik magasabb pályáról kerül egy elektron; az energiacsökkenést Röntgen fotonként sugározza ki az atom.



Polimorfia: ugyanazon kémiai anyag, különböző kr. szerkezet
 Elemek esetében: allotróp módosulatok



Rombos és monoklin kén; (molekularács S_8 gyűrűkből)

Kristályrendszer	Bravais-cella tulajdonságai	Bravais-rácsok
triklin (háromhajlású, triclinic)	$a \neq b \neq c \quad \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq \pi/2$	P
monoklin (egyhajlású, monoclinic)	$a \neq b \neq c \quad \alpha = \gamma = \pi/2 \neq \beta$	P, B
rombos (derékszögű, orthorhombic)	$a \neq b \neq c \quad \alpha = \beta = \gamma = \pi/2$	P, I, F, C
tetragonális (négyzetes, tetragonal)	$a = b \neq c \quad \alpha = \beta = \gamma = \pi/2$,	P, I
romboéderes (háromszöges, trigonal)	$a = b = c \quad 2\pi/3 > \alpha = \beta = \gamma \neq \pi/2$	R
hexagonális (hatszöges, hexagonal)	$a = b \neq c \quad \alpha = \beta = \pi/2, \gamma = 2\pi/3$	P
köbös (cubic)	$a = b = c \quad \alpha = \beta = \gamma = \pi/2$,	P, I, F

Kristálynövesztés

Közönséges laboratóriumban nem könnyű olyan körülményeket teremteni, amelyek között a múzeumokban kiállított egykristályok kialakultak a természetben. Mivel azonban a kutatómunka igen sok területén szükség van ezekre a nagy tisztaságú anyagokra, több módszert is kidolgoztak mesterséges előállításukra.

A szokásos módja a legegyszerűbb megvalósításnak, hogy először is keresünk egy olyan oldószert (lehetőleg vizet), amelyben a kristályunk szilárd alapanyagát feloldjuk, majd hagyjuk ebből az oldatból kikristályosodni. (Kristályosítást egyébként anyagtisztítás céljából is végezhetünk, ezt kristályosításnak nevezzük.

Ha egy kristályt szeretnénk készíteni egy bizonyos anyagból, az első dolgunk egy szobahőmérsékleten telített oldatot készíteni, melyhez szükségünk van az illető anyag oldhatósági adataira. Ha hagyjuk az oldószert elpárologni, az edényben szilárd anyag fog kiválni, a túltelítettség elkerülésére.

Az oldatkészítés menetét a timsó példáján keresztül követhetjük. A táblázatból kiolvassuk, hogy a timsó oldhatósága 20 °C-on 11 g 100 ml vízben. Így egy 20 °C-on telített oldat készítéséhez lemérünk kb. 15 g timsót és 100 ml vizet (vagy ezen mennyiséget kívánt többszörösét ill. törtrészét), kissé melegítjük és kevertetjük, a timsó teljes feloldásáig. Ha a kiindulási anyag nem volt teljesen tiszta, a forró oldatot megszűrjük egy tiszta edénybe, és hagyjuk kihűlni. Mikor szobahőmérsékletűre hűlt az oldat, az edény alján kis kristálykák alakjában kevés timsó kikristályosodik. Ezeket le kell szűrniük.

Egyet közülük egy vékony pamutszállal az edénybe lógatunk úgy, hogy se az alját se az oldalát ne érintse és könnyedén letakarjuk. Napokba, sőt hetekbe beletelhet, amíg lassan annyi víz elpárolog, hogy a kristálykák látható oktaéder alakúra növekedjék. A timsó példája sok egyéb más anyagra is alkalmazható. Lehetőleg olyat válasszunk, amelyek vízzel oldhatók, mert az oldószer nem gyúlékony és kellemetlen szagot sem terjeszt a laboratóriumban, míg hetek alatt elpárolog.

Ötvözetek megszilárdulása egyensúlyi viszonyok mellett:

A hűtés akkor felel meg az egyensúlyi viszonyoknak, ha sebessége egyenletes és kellően lassú (pl. vas-szén ötvözetek esetén $v_{\text{hűtés}} < 1 \text{ °C/min}$). Valamilyen rendszer hűlési folyamatát úgy kísérhetjük figyelemmel legegyszerűbben, ha a hőmérsékletének változását ábrázoljuk az elvont hőmennyiség függvényében:

$$\Delta T = f(Q).$$

Mivel a hőmennyiség mérése bonyolultabb, mint az idő mérése, az elvont hőmennyiség viszont arányos a hűtési idővel, ezért a folyamat vizsgálatához hőmérséklet-hűtési idő függvényt használunk:

$$\Delta T = f(t)$$

A függvényt hűlési görbének nevezik.

Ha egy adott, folyékony halmazállapotú anyagnak, pl. fémnek vagy ötvözetnek a hűlési folyamatát vizsgáljuk, a kapott hűlési görbe különféle lehet. Ezeknek négy alaptípusát különböztetjük meg:

- átalakulás nélküli (pl. halmazállapot-változás nélküli) hűlési folyamat görbéje,
- színfém hűlési görbéje,
- ötvözet hűlési görbéje,
- eutektikum hűlési görbéje.

Átalakulás nélküli hűlési folyamat diagramja:

Az első típusnál a hűlési folyamatot egy logaritmikus görbe írja le. A görbén semmiféle olyan átalakulás, törés nem figyelhető meg, ami az anyag hőtartalmában hirtelen változásra utalna, tehát sem halmazállapot-változás, sem kristályrács átalakulás nem következik be.

Egy gyakorlati példát véve, ilyen függvény írja le azt a folyamatot, amikor például a kifejt tejet 35 °C-ról, 10 °C-ra hűtik egy hőcserélőben vízhűtéssel. A hűtés kezdetén nagy a hűtőközeg és a hűtendő anyag hőfokkülönbsége (ΔT), ekkor nagyobb a hűtési sebesség (a görbe érintője meredekebb). A hőmérséklet csökkenésével a görbe egyre inkább ellaposodik és tart a hűtőközeg hőmérsékletét jelző vonalhoz. A folyamat során halmazállapot-változás nem következett be, a görbe folyamatos.

Színfém hűlésgörbéi:

Ha felrajzoljuk egy színfém hűlési folyamatának görbét, a kezdetben az előbbihez hasonlóan alakul, de egy, a fémre jellemző hőfokon törés mutatkozik a görbén. A hűtés (az elvont hőmennyiség) ellenére a hőmérséklet állandósul. Ezen a hőmérsékleten szilárdul meg a fém. Addig nem hűl tovább, míg az egész anyagmennyiség meg nem szilárdul. Ezt a jelenséget nemcsak halmazállapot-változáskor, hanem minden olyan átalakuláskor is tapasztalhatjuk, amikor az anyag szerkezetének rendezettsége megváltozik, például egy térközepes köbösből rács lapközepes köbös rácsszerkezetűvé átkristályosodik. Csak néhány fém, pl. a vas (Fe), az ón (Sn), a króm (Cr), a titán (Ti) rácsszerkezete megy át ilyen átalakuláson a hűlés, ill. hevítés során. Az ilyen rácsszerkezet változást allotrop átalakulásnak nevezik.

Ez a jelenség nem csupán érdekes, de látszólag ellentmondást is rejt magában: az elvont hőmennyiség ellenére sem változik a rendszer hőmérséklete, tehát úgy tűnhet mintha energia „született” volna a folyamat során. Természetesen erről szó sincs. Ez az ún. rejtett hő a kristályosodás során szabadul fel, mivel a részecskék a rácsba épülésükkor vagy az átrendeződés során a kisebb energiaszintű helyet foglalják el és így leadják a plusz energiájukat. A leadott hőmennyiséget az anyag megolvasztásakor kell befektetni, mint olvadási hőt. Ennyi energia szükséges ahhoz, hogy az atomok a rácspontokat elhagyhassák, a kristályrács összeomoljon vagy átrendeződjön, az anyag megolvadjon. A halmazállapot-változásnak vagy a rács átrendeződésének befejeződésével a görbe lefutása ismét logaritmikus jellegű lesz. Összefoglalva, a színfémek egy meghatározott hőfokon szilárdulnak vagy olvadnak meg, más szóval határozott olvadáspontjuk van.

A színvas hűlési folyamatát, az egyes átalakulásokat célszerű külön is megvizsgálni, mivel még ma is ezt a fémeket használjuk a legelterjedtebben és a hűlési görbéje számos sajátossággal rendelkezik. A színvas hűlési görbéjén nem egy, hanem három törés található. Ez azt jelenti, hogy megszilárdulás után a vas kristályszerkezetében még két átkristályosodás, ún. allotrop átalakulás is bekövetkezik.

A megszilárdulás hőmérséklete 1536 °C. A színvas hőmérséklete addig nem csökken tovább a hűtés ellenére, míg teljes egészében térközepes köbös rács formájában ki nem kristályosodik. Ez az állapot a hűlés során 1392 °C-ig nem változik, csak a fém hőmérséklete csökken. Itt azonban átkristályosodik lapközepes köbös rácsszerkezetű vassá, melynek rácsmérete nagyobb, mint az előző módosulaté volt.

A hűlési folyamatot tovább vizsgálva látható, hogy még ez a módosulat sem állandósul, hiszen 898 °C-nál ismét allotrop átalakulás következik be. Itt a rácsszerkezet ismét átalakul térközepes köbös ráccsá, melynek rácsmérete a módosulatok közül a legkisebb. Ez a rács típus már az alacsonyabb hőfoktartományokban állandósul.

A hűlési görbén szaggatott vonallal még további két töréspontot is jelöltünk, aminek magyarázata a következőkben foglalható össze röviden. Az első 769 °C-nál látható. E hőfok felett a ferromágneses anyagok elvesztik mágnesességüket, ill.

mágnesezhetőségüket (paramágnesezé válnak), csak e hőfok alatt mágnesezhetők. A jelenséget Pierre CURIE vizsgálta, ezért a mágnesezhetőség határátjelző, 769 °C-nál megrajzolt hőfokjelző vonalat Curie-vonalnak nevezték el. A kor anyagvizsgálatának technikai szintjén feltételezték, hogy a mágneses változás egy újabb kristálmódosulat kialakulásával hozható összefüggésbe. Mindezt a mérések és a fejlettebb anyagszerkezeti vizsgálatok nem támasztották alá, nincs újabb (úgynevezett β módosulat) allotróp átalakulás. A mágneses változás helyét ezért szaggatott vonallal jelöljük csupán a hűlési görbén, ill. majd az állapotábrában. Egyébként nagyon leegyszerűsítve, a mágneses változás azzal magyarázható, hogy a ferromágneses anyagok rendezetlen kis dipólusai a mágneses tér hatására rendezettekké válnak, az elemi kis mágnesek ereje összegződik, így az anyag kifelé mágneses hatást mutat. A Curie-hőmérsékletnél már a részecskék olyan mozgási energiával rendelkeznek, hogy rendezettségük még mágneses térben is újra és újra felbomlik; tehát nem mágnesezhetők.

A hűlési görbén még egy szaggatott vonallal jelölt törés látható 723 °C-nál. Ennek magyarázata az, hogy korábban kevésbé tudtak nagytisztaságú vasat előállítani. Mivel a vizsgált „színvas” tartalmazott egy kevés szenet, a vas-szén ötvözetekben pedig 723 °C-nál egy eutektoidos átalakulás megy végbe, itt is feltételezték egy allotróp átalakulást. Az allotróp módosulatokat ennek megfelelően, a görög ábécé kisbetűivel jelölték meg alacsonyabb hőfoktól felfelé. Így az egyes vasmódosulatok jele a következőképp alakult: 723 °C alatt α vas, 723-898 °C-ig β vas, 898-1392 °C- γ vas, 1392-1536 °C-ig δ vas.

A valóságban tehát nincs β módosulat, de a jelölések sorrendjét már nem változtatták meg. Így a vas tényleges allotrop módosulatai:

898 °C-ig α vas (tkk),

898-1392 °C között γ vas (lkk),

1392-1536 °C között δ vas (tkk).

Az egyes átalakulási hőmérsékleteket a szakirodalom külön is jelöli A betűvel (arret-megállást jelent). Mivel több, különböző hőmérsékleten történik átalakulás ezért ezeket számindekszel különböztetjük meg. Tudni kell, hogy az átalakulási hőmérsékletek, attól függően, hogy hevítéskor vagy hűtéskor érjük el, néhány fokkal eltolódnak, hűtéskor lefelé, hevítéskor felfelé. Ezt úgy jelöljük, hogy az átalakulási hőmérséklet hevítéskor további c indexet kap (c - chauffe - fűtést, hevítést jelent). Hűtéskor az index r (refroidissement).

Ezek alapján a lényegében öt átalakulási hőmérséklet kell megkülönböztetni a hűtés során:

1536 °C, A_{r5} a szín vas megszilárdulása,

1392 °C, A_{r4} a szín vas α - γ átalakulása,

898 °C, A_{r3} a szín vas γ - α átalakulása,

769 °C, A_{r2} a vas elveszti mágnesezhetőségét (nincs rácsszerkezet változás),

723 °C, A_{r1} eutektoidos átalakulás (csak vas-szén ötvözetben).

Ötvözetek hűlésgörbéi:

Az ötvözetekre általában az jellemző, hogy hőközben szilárdulnak. Ilyen esetekben a megszilárduló fázissal egyensúlyt tartó folyékony fázis összetétele folyamatosan változik.

Például a szilárd oldatok hőközben szilárdulnak. T₁ hőfokon kezdődik és csak T₂ hőfokon fejeződik be a megszilárdulás. Az ötvözetnek nincs határozott

dermedéspontja. T1- T2 hőközben a már szilárd és a még folyékony fázis együtt alkotja az ötvözetet. A T2 hőmérsékleten már elfogy a folyékony fázis, az egész ötvözet homogén fázissá, szilárd oldattá dermed.

Eutektikum hűlési görbéje:

Az elmondottakkal ellentétben azonban vannak olyan ötvözetek, amelyek színfém módjára, egy adott hőfokon szilárdulnak. Ezek az eutektikumok.

Az eutektikumnak további sajátossága, hogy olvadáspontja még az ötvözetet alkotó alacsonyabb olvadáspontú elemnél is alacsonyabb. Például a 660 °C-on olvadó alumíniumból és az 1083 °C-on olvadó rézből 33% réztartalomnál létrejövő eutektikum olvadáspontja csupán 547 °C. A 13,4% ónból (Sn), 50% bizmutból (Bi), 26,6% ólomból (Pb), 10% kadmiumból (Cd) álló többalkotós eutektikum (Wood-fém) pedig már 60 °C-on megolvad.