

Dr. Pék Lajos:

# ANYAGSZERKEZETTAN ÉS ANYAGVIZSGÁLAT

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG  
KORMÁNYA

Európai Unió  
Európai Szociális  
Alap



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

# Anyagszerkezetten és anyagvizsgálat

Szerző:

**Dr. Pék Lajos**

Lektor: Dr. Pellényi Lajos

Kézirat lezárva: 2015. november 25.

Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó  
(kiadva a TÁMOP 4.1.1.F-14/1/Konv-2015-0014 számú, „DUÁLGÉP – A szombathelyi duális gépészmérnöki képzés fejlesztése, együttműködve a kiemelt járműipari központ gazdasági hálózatával” c. projekt keretében)  
Felelős kiadó: Prof. Dr. Németh Róbert tudományos és külügyi rektorhelyettes



A kiadásért felel a DUÁLGÉP projekt szakmai vezetője: Prof. Dr. Horváth Béla

Terjedelem: 20 ív

Szombathely, 2015.  
© Dr. Pék Lajos, 2015  
ISBN 978-963-334-272-5

# TARTALOMJEGYZÉK

TARTALOMJEGYZÉK .....	3
BEVEZETÉS .....	9
1. Az anyag szerkezetének és tulajdonságainak kapcsolata .....	11
1.1 Kristályos anyagok mikro- és makroszerkezete .....	13
1.1.1 Kristályok szerkezete, elemi cellák .....	13
1.1.2 Részecskék kapcsolódásának formái a kristályrácsokban .....	17
1.1.3 Fémek főbb kristályrács típusai .....	21
1.2 Fémek kristályrács szerkezetének hibái .....	30
1.2.1 A pontszerű rácshibák .....	31
1.2.2 Vonalszerű rácshibák (diszlokációk) .....	34
1.2.3 Felületszerű rácshibák .....	43
1.3 Fémek és ötvözetek kristályosodása .....	44
1.3.1 Ötvözetek típusai .....	45
1.3.2 Fémek, ötvözetek kristályosodási folyamata .....	49
1.3.3 Ötvözetek megszilárdulása egyensúlyi viszonyok mellett .....	53
1.3.4 A kétalkotós ötvözetrendszerek egyensúlyi diagramjának szerkesztése hűlési görbékből ..	59
1.3.5 A kétalkotós ötvözetrendszerek állapotábráinak típusai .....	67
1.4 Vas - szén ötvözetek egyensúlyi diagramja .....	76
1.4.1 A vas – szén ötvözetek metastabilis rendszer szerinti állapotábrája .....	80
1.4.2 Vas – szén ötvözetek stabilis rendszer szerinti átalakulása .....	90
1.4.3 Alumínium ötvözetek egyensúlyi diagramjai .....	97
1.4.4. Réz ötvözetek egyensúlyi diagramjai .....	99
2. Anyagvizsgálat .....	102
2.1 Roncsolásos anyagvizsgálati módszerek .....	103
2.1.1 Mechanikai vizsgálatok .....	103
2.1.2 Kémiai vizsgálatok .....	167
2.1.3 Fémtani vizsgálatok .....	173
2.2 Roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerek .....	184
2.2.1. A vizuális vizsgálat .....	184
2.2.2. Mágneses repedésvizsgálat .....	185
2.2.3. Örvényáramos repedésvizsgálat .....	186
2.2.4. Jelzőfolyadékös vizsgálat .....	188
2.2.5. Radiológiai eljárások .....	188

2.2.6. Ultrahangvizsgálat .....	191
2.2.7. Mágneses hiszterézisen alapuló eljárás .....	193
2.2.8. Akusztikus emisszió .....	194
3. Fémek, ötvözetek előállítása .....	197
3.1 Ércek előkészítése, dúsítása .....	198
3.2 Ércből, fémek kinyerésének technológiái.....	200
3.3 Alumíniumötvözetek előállítása .....	201
3.3.1 Alumíniumgyártás .....	201
3.3.2 Az alumínium finomítása (rafinálása).....	203
3.4 Rézötvözetek előállítása .....	204
3.4.1 Nyersréz előállítása .....	204
2.4.2 A réz finomítása.....	205
3.5 Vasötvözetek előállítása .....	206
3.5.1 Nyersvasgyártás.....	206
3.5.2 Acélgártás .....	217
3.6 Egyéb fémek .....	237
3.6.1 Titán.....	237
3.6.2 Magnézium .....	238
3.6.3 A horgany.....	238
3.6.4 Az ón.....	239
3.7 Porkohászati termékek előállítása .....	239
3.7.1 Fémporok előállításának módszerei.....	239
3.7.2 A porkohászati termékek sűrűségének és szilárdságának viszonya.....	241
3.7.3 A porkohászat eljárások műveletei .....	242
3.7.4 A porkohászati termékek fontosabb felhasználási területei.....	244
3.7.5 Keményfémek.....	244
4. Ötvözetek hőkezelése.....	247
4.1 Acélok szerkezetének alakulása nem egyensúlyi viszonyok között .....	247
4.1.1 A hűtési sebesség növelésének hatása az átalakulási folyamatra .....	248
4.1.2 Az idő-hőmérséklet-átalakulás (IHÁ) diagram.....	250
4.1.3 Az ausztenitnek bainitté, martenzitté alakulása .....	254
4.1.4 Az acélok IHÁ diagramjainak főbb típusai .....	258
4.1.5 Acélok izotermális IHÁ diagramja.....	258
4.1.6 Acélok folyamatos IHÁ diagramja .....	260

4.2 A hőkezelési eljárásokat befolyásoló tényezők.....	261
4.2.1 A hevítés hőfoka.....	261
4.2.2 A hűtési ideje.....	263
4.2.3 Az acél kritikus hűlési sebessége.....	263
4.2.4 A hűtés sebessége.....	263
4.3 Acélok hőkezelési eljárásai.....	264
4.3.1 Kiegyenlítő hőkezelési eljárások.....	264
4.3.2 Lágyító hőkezelések.....	267
4.3.3 Keménységfokozó hőkezelési eljárások.....	269
4.3.4 Szívósságot fokozó hőkezelési eljárások.....	278
4.3.5 Kéregötvözési eljárások.....	282
4.4 Öntöttvasak hőkezelése.....	290
4.4.1 Szürkeöntvény hőkezelése.....	290
4.4.2 A fehéröntvény hőkezelése.....	292
4.5 Alumínium ötvözetek nemesítése.....	292
5. Hőkezelés gyakorlata.....	294
5.1 Alkatrészek hevítése hőkezeléskor.....	294
5.1.1 Hevítő berendezések és kiegészítő eszközök.....	294
5.1.2 A hevítendő adagnagyság meghatározása.....	299
5.1.3 A hőkezeléseknél alkalmazott hőmérők és hőszabályozó eszközök.....	301
5.1.4A hőkezelés hőfokának, a hevítés és a hűtési idejének meghatározása.....	303
5.1.5 A munkadarabok hűtése.....	304
5.2 A lángedzés gyakorlati módszerei.....	306
5.3 Az indukciós edzés módjai, gyakorlata.....	306
5.4 A cementálás technológiái.....	307
5.5 A nitrálás menete.....	309
6. Vas-szén ötvözetek csoportosítása, szabványos anyagjelölése.....	311
6.1. Vasötvözetek csoportosításának szempontjai.....	311
6.1.1. Felhasználás, technológiai tulajdonságok szerinti csoportosítás.....	312
6.1.2. Acélok gyártási mód szerinti csoportosítása.....	313
6.1.3. Acélok ötvözöttség szerinti csoportosítása.....	313
6.1.3. Minőségi osztály szerinti csoportosítás.....	315
6.1.5. Vasötvözetek szabványos jel szerinti csoportosítása, a szabványos.....	316
6.1.5.1. Fizikai tulajdonságokra garantált acélok jelölése.....	316

6.1.5.2	Vegyi összetételre garantált acélok jelölése .....	317
6.2.	Szabványos acélcsoportok .....	318
6.2.1.	Fizikai, mechanikai tulajdonságokra garantált acélok .....	319
6.2.2.	Vegyi összetételre garantált szerkezeti acélok .....	321
6.2.4.	Ötvözött szerszámacélok .....	334
6.2.4.1.	Hidegalakító szerszámacélok.....	334
6.2.4.2.	Melegalakító szerszámacélok.....	335
6.2.4.3.	Forgácsoló szerszámacélok .....	336
6.3.	Acélöntvények.....	338
5.3.1.	Ötvöztelen acélöntvények.....	338
6.3.2.	Gyengén ötvözött acélöntvény.....	339
6.3.3.	Közepesen és erősen ötvözött acélöntvények .....	339
6.4	Öntöttvasak .....	340
6.4.1.	Az öntöttvas mechanikai és egyéb tulajdonságai.....	340
6.4.2.	Kéregvasöntvények .....	342
6.4.2.	Különleges vasöntvények .....	343
6.4.4.	Temperöntvények .....	344
7.	Nemfémes szerkezeti anyagok .....	345
7.1	Műanyagok (polimerek) .....	345
7.1.1.	A műanyagok molekuláris szerkezete .....	346
7.1.2.	Műanyagok csoportosítása .....	347
7.1.2.1.	Műanyagok csoportosítása hővel szembeni viselkedés alapján.....	347
7.1.2.2	Műanyagok eredet szerinti csoportosítása.....	349
7.1.2.3	Műanyag csoportosítása a makromolekulák előállításának módja szerint .....	349
7.1.3.	A műanyagok tulajdonságai .....	352
7.1.4	Műanyagok tulajdonságainak megváltoztatása.....	357
7.1.5	Műanyagok főbb fajtái, típusai .....	358
7.1.5.1.	Hőre nem lágyuló műanyagok.....	360
7.1.5.2.	Hőre lágyuló műanyagok.....	362
7.1.5.3.	Kaucsuk, gumi.....	366
7.1.5.4	Műkaucsuk-féleségek.....	368
7.2.	Kerámiák.....	369
7.2.1	Egyatomos kerámiák.....	370
7.2.2.	Vegyületkerámiák.....	376

7.2.2.1. Oxidmentes vegyületkerámiák.....	376
7.2.2.2. Oxidkerámiák.....	377
7.3. Fa.....	390
7.3.1. A fa szerkezeti felépítése.....	390
7.3.2. A fa fizikai tulajdonságai.....	392
7.3.3. A fa szárítása.....	394
7.3.4. Fatermékek.....	396
7.3.5. A faanyag telítése és felületi kezelése.....	397
7.4. Természetes bőr.....	397
Irodalomjegyzék.....	408





# BEVEZETÉS

Az ember történelmi fejlődésének során óriási jelentősége volt az eszközök, szerszámok használatának, amelyekhez a legkülönbébb anyagokat használta fel, amelyeket környezetében megtalált. Ezeket az anyagokat (kődarabot, botot) közvetlenül felhasználta, később átalakította megfelelő alakúra, tulajdonságúra. Ennek révén környezetét is megváltoztatta egyre nagyobb mértékben.

Az emberiség őstörténetének korszakait nem véletlenül nevezték el éppen a korszakra jellemző, általánosan használt *szerkezeti anyagról*. Ez az anyag a fejlettség fokmérője is lett. Az ember először természetesen a közvetlen környezetében, nagymennyiségben található és még alakítás nélkül is felhasználható anyagot, a követ használta eszközként. Ezt az időszakot nevezik *kőkorszaknak*. Ennek korai szakasza 600 000 évvel ezelőttre tehető és *paleolitikumnak* nevezik. A felhasznált anyag mellett az alkalmazott technológiai eljárásoknak is szerepe van a fejlődésben. Így megkülönböztetünk, pl. pattintott és csiszolt kőkorszakot. Az utóbbi, már fejlettebb korszak kezdete mintegy az i. e. 9 000 évre tehető és tartott az i. e. 1-2. évezredig.

A fémek megismerése és főleg használata új korszakot nyitott a fejlődésben. Ennek oka, hogy a fémek jó alakíthatósága, szilárdsági tulajdonságai változatosabb felhasználást tettek lehetővé.

Természetesen a fémek közül kezdetben csak azok használatára került sor, amelyek a természetben, *termésállapotban* is megtalálhatók, mint pl. a réz, a nemesfémek. Később kialakulhattak kezdetleges kohászati eljárások, amelyek során bizonyos „*kőzetekből*”, az ún. ércekből, sikerült kinyerni fémeket. Az érceken található kísérő fémek az alapfémhez hozzáadódva ötvözetet eredményeztek (pl. a réz (Cu) és az ón (Sn) bronzot). Ezek tulajdonságaikat tekintve még jobbnak is bizonyultak eszközök készítéséhez (pl. szerszámokhoz, fegyverekhez), mint a színes fém. Mezopotámiában, Indiában, Egyiptomban már a i.e. 3000 körüli időkből maradtak fenn bronz leletek. Így követte a kőkorszakot a rézkor, vagy inkább a *bronzkor*, amely Európában i.e. 700-as évekig tartott.

A már megismert fémek kedvező alakíthatósága, jó technológiai tulajdonságai elősegítették újabb, addig nem használt fémek bevonását az eszközök, szerszámok készítésébe. A színes fém a természetben nem fordul elő, legfeljebb igen kis mennyiségben, meteorvas formájában. A vas a környezetében található oxigénhez nagy affinitást mutat, így érceiben, főleg különféle oxidos, esetleg karbonátos vegyületeiben fordul elő nagy mennyiségben. A vasnak a bronznál nagyobb szilárdsága, használójának nagyobb „erőt”, hatalmat biztosított. Más anyagokat is könnyebben lehetett vele megmunkálni. Használatának elterjedése az emberiség történetének újabb fejlődési fázisát

és egyben őstörténetének lezárását hozta, mintegy átmenetet képezve a fejlődés egy új korszakába.

A vaskor eljövetele sem köthető egy konkrét időponthoz. Az emberi civilizáció különböző területein eltérő időben kezdték alkalmazni ezt a fontos fémeket. A Kárpát-medence területén a különböző népek már az i.e. 900-as évektől használtak vas eszközöket, de általánosan a kelták terjesztették el használatát az i.e. 2. évszázadban és e korszak kb. a honfoglalásig tartott.

A további fejlődés során egyre több fémeket vontak használatba és mára már elmondhatjuk, hogy a periódusos rendszer szinte valamennyi eleme szerepel az iparilag felhasznált anyagok között, a természetben található ún. természetes, és a mesterségesen előállított anyagokkal együtt. A fémek használata alapvetően felgyorsította a fejlődést. Felmerülhet a kérdés miért volt ez így? Ennek magyarázata a fémek jó alakíthatóságában, szilárdsági-mechanikai tulajdonságaiban rejlik, ami viszont a fém makro- és mikroszerkezeti felépítésével, szerkezetének megváltoztathatóságával függ össze. Az anyagszerkezeti ismeretek az anyagismerettel együtt adnak alapot a továbbiakban az alakító és más gyártástechnológiai eljárások megismeréséhez és alkalmazásához.

# 1. Az anyag szerkezetének és tulajdonságainak kapcsolata

Ahhoz, hogy egy alkatrész vagy berendezés gyártásához megfelelő anyagot választhassunk, először is ismerni kell azon anyagok összességét, amelyek alkalmasak lehetnek a műszaki felhasználásra.

Ezeket az anyagféleségeket az anyagszabványok foglalják magukba, ezek közül lehet választani. A műszaki gyakorlatban használatos anyagokat **szerkezeti anyagoknak** szokás nevezni.

Az anyag tulajdonságát befolyásolja fajtája, illetve a fajtán belül annak szerkezete. Az anyag részecskéi rendezetten vagy rendezetlenül kapcsolódhatnak egy adott tömeggé. Ennek során alakul ki *mikro- és makroszerkezetük*.

Mindez aláhúzza annak jelentőségét, hogy az anyag szerkezetének ismerete elengedhetetlenül szükséges a megfelelő anyag és alakítási technológia megválasztásához.

Azt, hogy mi az **anyag**, legáltalánosabban, mint filozófiai kategóriát lehet megfogalmazni:

*"Az emberi tudattól és mindenféle szellemi tényezőtől függetlenül létező, tudatunkban visszatükröződő objektív valóság."*

A bennünket körülvevő világ anyagai hihetetlenül sokfélék. A könnyebb áttekinthetőség miatt különféle szempontok szerint csoportosíthatjuk őket, pl. halmazállapot, természetes vagy mesterséges eredet, fémes vagy nemfémes tulajdonságok szerint, de csoportosíthatjuk felhasználás szerint is.

A gépészmérnöki gyakorlatban főleg az ún. ipari anyagokat, ezen belül a **szerkezeti anyagok** csoportját, vagyis műszaki szerkezetek előállítására alkalmas anyagokat használják.

Ezeknek vizsgálják szerkezetét, a szerkezet hatását a tulajdonságokra, magát a tulajdonságokat, illetve azok megváltoztathatóságát. Fontos kérdés, hogy egy bizonyos anyagból gyártott alkatrész milyen mértékben felel meg a szilárdsági követelményeknek, vagyis megfelelő élettartamú lesz-e a használat során és az adott anyagból az alkatrész gazdaságosan előállítható-e.

Az anyag felépítésének, szerkezetnek három eltérő szintjét vizsgálhatjuk:

- a *szubatomi szintet*,
- az anyag *mikroszerkezetének szintjét*,
- az anyag *makroszerkezetének szintjét*.

A **szubatomi szerkezet** az atommagot alkotó részecskék kapcsolódását, elektronhéjak szerkezetét foglalja magába. Ezzel főleg az atomfizika foglalkozik.

Az anyag **mikroszerkezete** az atomok kapcsolódásától, egymáshoz való viszonyától függően alakul, meghatározva az anyag tulajdonságát. Ennek vizsgálatával foglalkozik, pl. a *kristálytan* és a *fémfizika*.

Az anyag gyakran nem egységes mikroszerkezetű, pl. a kristályos anyagok legtöbbször nem tökéletes egykristályok, hanem sok kristálykából felépülő *polikristályos* szerkezetűek. Az ötvözetek, pl. egyszerre több ötvözettípusból állhatnak, így kialakítva az anyag **makroszerkezetét**.

A *makroszerkezet* alakulása jelentősen befolyásolja egy adott anyag tulajdonságait, sőt a struktúra változtatásával az anyag tulajdonságai is megváltoztathatók.

Az anyag építő elemei az atomok, a molekulák és az ionok.

Az **atom** az egyes elemeknek azon legkisebb elemi része, amely kémiai módszerekkel már tovább nem bontható, de még az elem tulajdonságaival rendelkezik.

A **molekula** a vegyületeknek az a legkisebb egysége, amely még a vegyület tulajdonságaival rendelkezik (kémiai képlettel leírható).

Az **ion** egy semleges atomból elektronleadás vagy felvétel útján jön létre, így villamos töltéssel rendelkezik.

Az anyag részecskéi egymásra kölcsönhatást gyakorolnak. A részecskék energiaállapotától függő szakadatlan mozgásban vannak. E hatásoktól és a részecskék kinetikus (mozgási) energiájától függően az anyagnak különböző megjelenési formáját, **halmazállapotát** különböztetjük meg:

- légnemű,
- cseppfolyós,
- szilárd.

A **légnemű** vagy **gáz** állapotban az anyagnak nincs határozott alakja, sem meghatározott térfogata. Az atomok, molekulák szabadon elmozdulhatnak egymáshoz képest, ütköznek egymással és a tartály falával, kitöltik a rendelkezésük álló teret. A részecskék így rendezetlen mozgást végeznek. Viselkedésük az állapotegyenletekkel írható le (állapottényezők a térfogat ( $V$ ), hőmérséklet ( $T$ ), nyomás ( $p$ )).

A **cseppfolyós** állapotban az anyagnak meghatározott alakja nincs, az atomok, molekulák egymáshoz képest viszonylag közel vannak, távolságuk állandó. Ezért gyakorlatilag összenyomhatatlanok. Kis erő hatására egymáson elmozdulhatnak. Sűrűségük adott hőmérsékleten állandó.

**Szilárd** halmazállapotban az atomok, molekulák egymáshoz képes nem tudnak eltávolodni, csupán az egyensúlyi helyzetük körül rezgő mozgás végeznek. Alakjuk, térfogatuk állandó.

Attól függően, hogy a szilárd test részecskéi egymáshoz képest rendezetten vagy rendezetlenül helyezkednek el, beszélünk **kristályos**, illetve **amorf** anyagokról.

Ha a szilárd test atomjai, molekulái rendezetlenül, mindenféle periodikus ismétlődés nélkül építik fel az anyagot, szerkezet nélkülinek, amorfnek nevezzük.

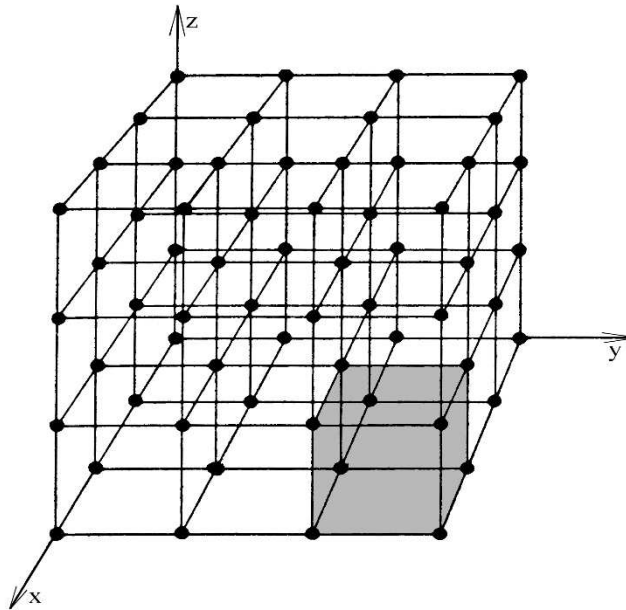
Ilyenek az üveg, a különféle oxidok stb. Különleges körülmények között még a fémek is megszilárdulhatnak üvegszerű állapotban (üvegfémek).

Az anyagok egy jelentős részében megszilárdulásakor az atomok, molekulák, ionok valamilyen geometriailag meghatározott rendszer szerint (pl. egy kocka vagy egy tetraéder stb. csúcspontjaiban) helyezkednek el és e pontban, egyensúlyi helyzetben vannak. A hőmozgás az egyensúlyi tengely körüli rezgőmozgásban nyilvánul meg, amelynek amplitúdója a hőmérséklettel, vagyis a részecske kinetikai energiájával arányos.

## **1.1 Kristályos anyagok mikro- és makroszerkezete**

### **1.1.1 Kristályok szerkezete, elemi cellák**

Az anyagot akkor mondjuk kristályosnak, ha belső szerkezete rendezett, alkotó elemei az atomok, molekulák vagy ionok periodikus szabályszerűséggel térrácsot (kristályrácsot) alkotva építik fel. A kristályrácsot lényegében a kristálytani síkok metszésvonalainak térbeli hálózataként képzeljük el, ahol a metszéspontokban helyezkednek el a rácsot felépítő részecskék (1.1. ábra). A kristály mindig síkokkal határolt soklapú test.



1.1. ábra A köbös kristályrácsban rendezetten elhelyezkedő részecskék

Mivel a síkok egymáshoz való viszonya és 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.

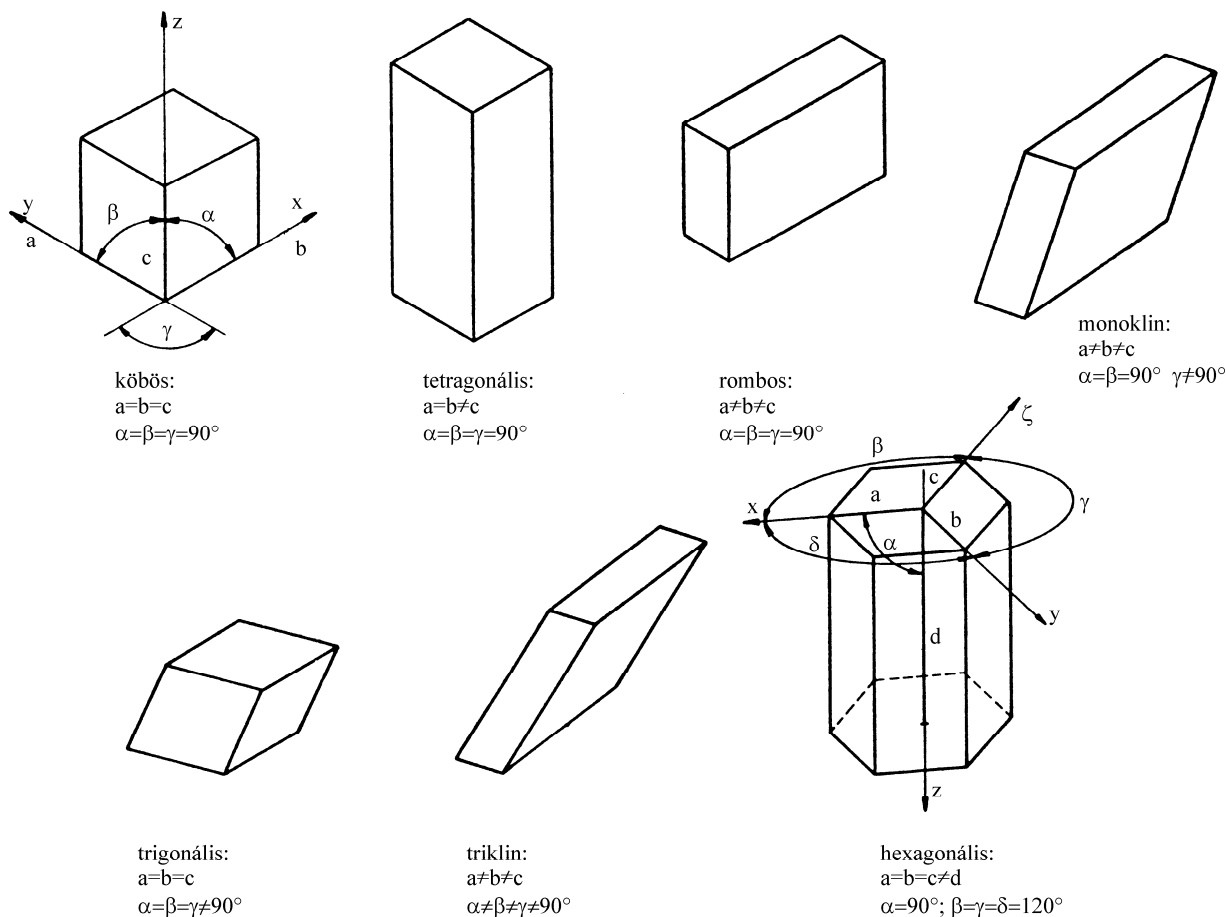
A kristályrácsnak azt a legkisebb térfogatát, amely már a kristály alakját mutatja, amelynek ismételt eltolásával (transzlációjával), sokszorozásával az egész rácsot létre lehet hozni, **elemi cellának** nevezzük. A kristály jellemzésére elegendő ennek az elemi cellának a geometriai sajátosságait vizsgálni, mivel így az összefüggések jobban követhetők és ugyanakkor ezek lesznek jellemzők egy nagyobb kristályra is.

Már az 1800-as évek közepe táján egy francia kristálykutató, Bravais kimutatta, hogy legfeljebb 14 különböző elemi cella alak létezik. A kristályrácsok ezek valamelyikéből, illetve ezek kombinációiból épülnek fel. A kristályrácsot az ún. rácsállandók jellemzik. Ezek a cella *élhosszai* és az élek által *bezárt szögek*, amelyek anyagjellemzők.

A kristályok szerkezete az egyes kristálytani irányokban nem mindig azonosak. Így azok a fizikai tulajdonságok, amelyek szerkezetfüggőek (pl. kristálynövekedés, fénytörés, keménység, hasadás, belső súrlódás stb.), egyúttal irányfüggőek, **anizotropok** is.

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

A kristályokat szimmetriaelemeik alapján **7 kristályrendszerbe** (1.2. ábra), ezeken belül **32 kristályosztályba** sorolják. Még egyéb csoportosítási szempontok is vannak, pl. optikai szempontból a fénytörés jellégét figyelembe véve 3 csoportba sorolják a kristályokat (izotropok, egy tengelyűek, két optikai tengelyűek).



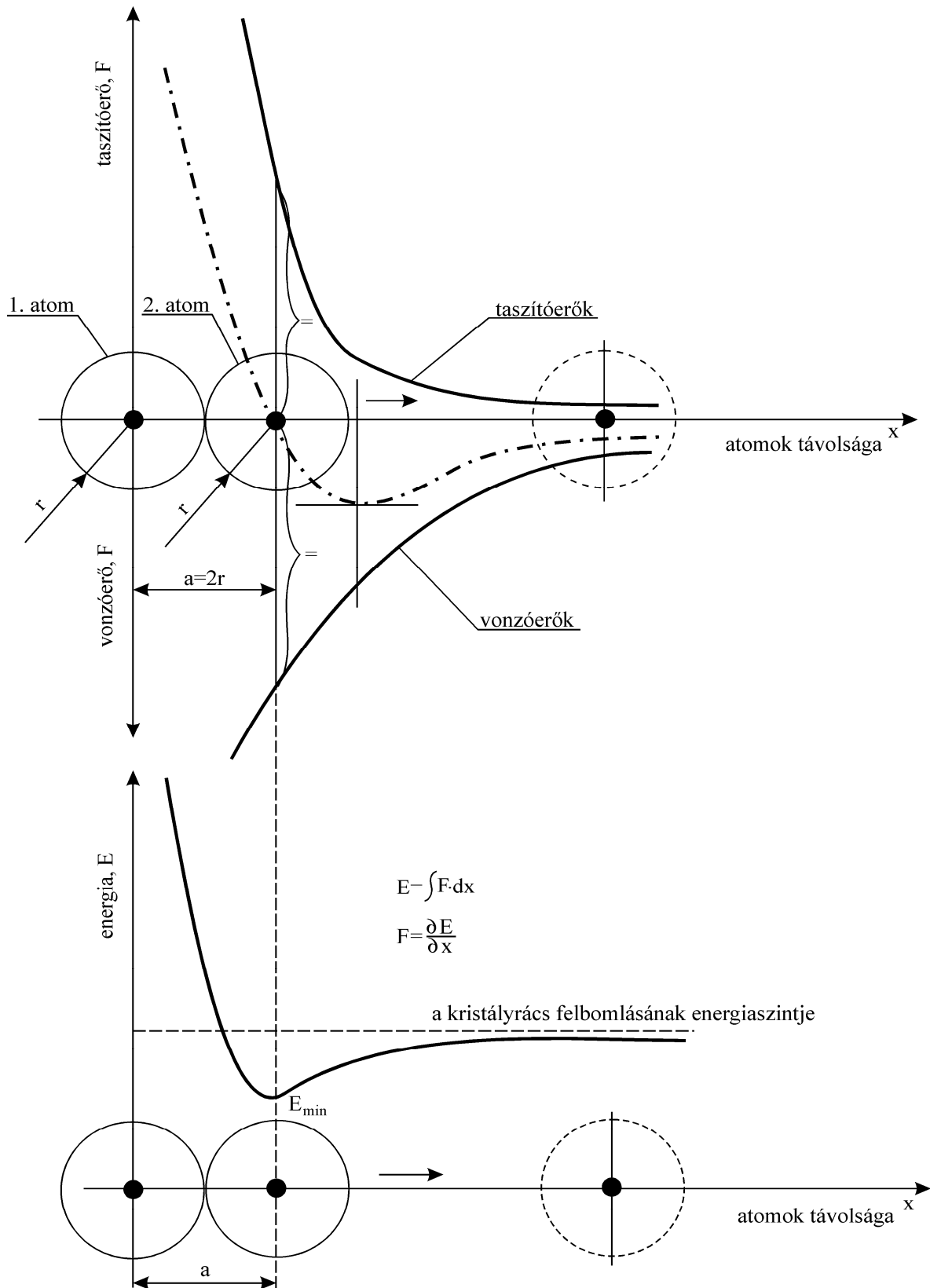
1.2. ábra A kristályok hétféle tengelyrendszere

A kristály szó hallatára általában a szépen nőtt, szabályos, ún. **egy kristályokra** gondolunk. Ilyenek azonban csak akkor keletkeznek, ha megfelelő körülmények között, szabadon nőhetnek.

Ezzel szemben a fémek esetében, szabad szemmel, első rátekintésre nem állapítható meg, hogy kristályos anyagok, mert ezek ún. **polikristályos** („sok kristályos”) szerkezetűek. 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 kristályhatárokat kialakítva.

A kristályos anyagot vizsgálva felmerülhet a kérdés, miért éppen a rácspontokban helyezkednek el a rácsot alkotó részecskék?

A jelenséget segíti megérteni a 1.3. ábra, amely bemutatja a kristályos szilárd testek atomjai, részecskéi között működő erők alakulását a közöttük lévő távolság függvényében.



1.3. ábra Kristályos szilárd testek atomjai között működő erők



Gondoljuk meg, 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, vonzó- és taszító erő. Azt, hogy végül milyen hatás érvényesül, vagyis milyen lesz a két erő eredője, azt a részecskék közötti távolság határozza meg. Ábrázolva mind a vonzó, mind, pedig a taszító erő változását bemutató függvényt, valamint összegezve ezeket, megszerkeszthető az eredő erő görbéje. 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 abszcisszatengelyt, vagyis ezen a helyen a vonzó- és taszítóerő kiegyenlíti egymást. Ez éppen a két atomsugár 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.

### **1.1.2 Részecskék kapcsolódásának formái a kristályrácsokban**

Attól függően, hogy a szilárd, kristályos anyag rácsszerkezetét atomok, molekulák vagy ionok építik fel a részecskék között ható erők, és így a kialakuló kristályok tulajdonságai is, különbözőek lehetnek. A kristályok főbb alaptípusai a részecskék között létrejött kötésmód szerint:

- kovalens kristály,
- ion kristály,
- molekula kristály,
- fémkristály.

A **kovalens kötés** úgy jön létre, hogy az atom, mint a természetben általánosan megfigyelhető folyamat, a legkisebb energiaszintű, stabil állapotra törekszik. Ez úgy állhat elő, ha igyekszik nemesgáz elektronszerkezetet felvenni. A nemesgázoknak az a sajátosságuk, hogy nincs betöltetlen elektronhéjuk. Ha egy atom külső elektronhéján, pl. két elektron van csupán, egy másiknak a külső, vegyérték elektronpályáján csupán két elektron hiányzik, akkor az ideális szerkezet létrejöhet úgy, hogy a külső pályán lévő

két elektront „közösén használják” (1.4/a. ábra). Az elektronok így mind a két atomhoz tartoznak. A kovalens kötések kötési energiája meglehetősen nagy, így magasabb hőmérsékleten is összetartja a részecskéket, a kapcsolat stabil (ilyen, pl. a gyémánt, olvadáspontja 3700 °C ).

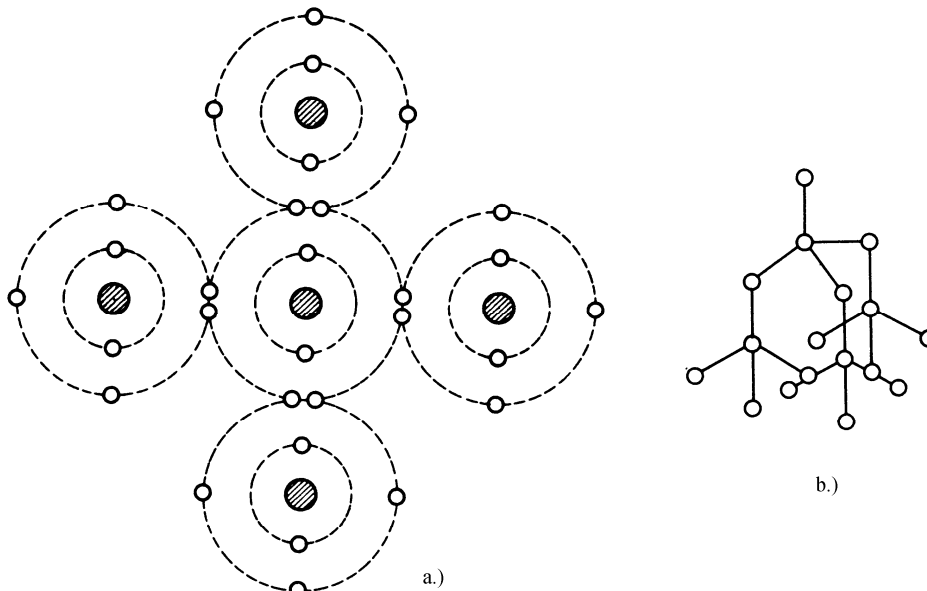
Ha különböző elemek atomjai hoznak létre ilyen kötések, vegyületekről, vegyület molekulákról beszélünk. Ha ez a kapcsolat nemcsak néhány atomra terjed ki, hanem térben átszővi az anyagot, kovalens kristályról beszélünk.

Azonos atomok között is létrejöhet kovalens kötés. Így képeznek molekulát a gázok, mint pl. hidrogén (H<sub>2</sub>), oxigén (O<sub>2</sub>) stb. Más elemek is, mint pl. a szén, képezhetnek ilyen kötések. A karbon hat elektronja közül kettő egy belső telített elektronpályán, négy pedig egy telítetlen külső pályán mozog. A külső pályát nyolc elektron telítené. A gyémántban öt szénatom, az 1.4/b. ábra szerinti formában, négy-négy elektronját közösén használja, az elektronpárok hálózatát létrehozva. A valóságban azonban nem síkban, hanem térben, egy tetraéder csúcsában helyezkedik el az öt szénatom úgy, hogy mindegyiknek négy azonos távolságban lévő szomszédja van.

A kovalens kötések tehát irányítottak. Hasonló rácsban kristályosodik a szilícium (Si), germánium (Ge) elem.

A kovalens kötések irányítottasága azt eredményezi, hogy az ilyen kristályok nem deformálhatók, alakíthatók. Az anyag alakítása ugyanis az egyes atomsíkok egymáson való elcsúszását jelenti, eközben viszont megváltozik a kötések irányultsága. A kötés irányának megváltozása a kötés szakadását eredményezi. Ez magyarázza, hogy a kovalens kristályok igénybevétel hatására maradó alakváltozás nélkül, ridegen törnek.

További sajátosságuk, hogy ha nem tartalmaznak szennyezőket, akkor elektromos szigetelők, mivel elektronjaik mozgása erősen korlátozott.



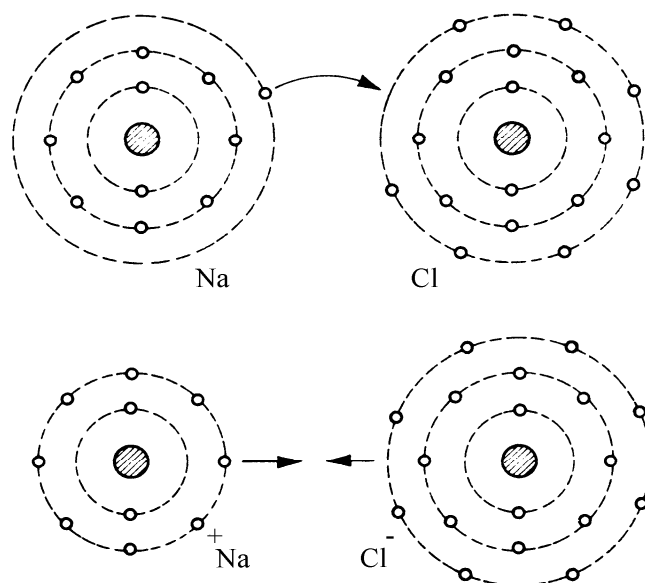
1.4. ábra Kovalens kötés

- a.) szénatomok között kialakuló kovalens kötés modellje  
 b.) szénatomok elhelyezkedése a gyémánt kristályrácsában

**Ionos kötés**, illetve ionrács úgy jön létre, hogy az atom, amelynek külső elektronhéján, pl. egy elektron van, ezt a vegyérték elektronját könnyen leadja, így kialakítva a nemesgáz konfigurációt. Az atom egy pozitív töltésű ionná alakul. Az elektront a másik atom felveszi, amelynek külső elektronhéjáról egy elektron hiányzik. Így ennek is teljessé válik az elektronhéja és egy negatív töltésű ionná válik. A kialakult pozitív és negatív ion kölcsönösen vonzzák egymást a Coulomb-törvénynek megfelelően, közöttük ún. ionos kötés jön létre (1.5. ábra).

A köztük kialakuló elektrosztatikus vonzóerő egyenesen arányos a töltések nagyságával, fordítottan arányos távolságuk négyzetével.

Az ionos kötést úgy képzelhetjük el, hogy a töltések egy gömb felületén egyenletesen oszlanak meg, ahol a gömb sugara az ion sugara. Ebből következik, hogy az elektrosztatikus tér minden irányban egyenlően hat, vagyis az ionkötés nem irányított. Ezeknek a kötéseknek az energiája nagy, a kötések stabilak. A térben kialakult kötések ionrácsokat képeznek, amelyeknek jellemzője, hogy bizonyos síkok mentén képtelenek az alakváltozásra, ezért e síkok mentén könnyen hasadnak. Más síkok mentén csekély mértékben lehetséges elcsúszás.

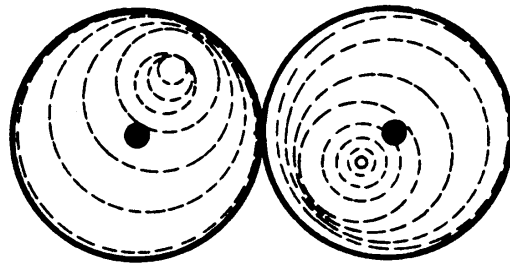


1.5. ábra Az ionos kötés kialakulása a NaCl kristályrácsban

Mechanikai tulajdonságaik alapján nincs technológiai jelentőségük. Az elektromos áramot gyengén vezetnek. Ilyen kötéssel kapcsolódnak a nátrium ( $\text{Na}^+$ ) és a klór ( $\text{Cl}^-$ ) ionok a nátriumklorid ( $\text{NaCl}$  – konyhasó) köbös kristályrácsában.

Ha elég nagy távolságban vannak egymástól az atomok, az elektronpályák koncentrikusan helyezkednek el a mag körül. Az egymás környezetében közel kerülő atomok esetében a mag valamelyik oldalán elektrontúlsúly jöhet létre.

Így az elektromosan semleges részecskék között is kialakul kötés, mint a nemesgázok atomjai között. Ez az úgynevezett **molekulakötés**. Az elektronok eltolódása töltéseltolódást, így dipólus létrejöttét eredményezi (1.6. ábra). Ez hatással lesz a szomszédos atomra is, ami szintén dipólussá alakul. A dipólusok vonzzák egymást és ez a vonzóerő, az ún. *van der Waals* erő összetartja az atomokat. Bár az erő nagysága arányos az elektronok számával, vagyis függ az elem rendszámától, mégis a két részecske távolságának növekedésével igen jelentősen csökken, az eredő távolság hatodik hatványával fordítottan arányos. Így csak laza kötések jöhetnek létre. Az ilyen kötés energiája csekély, még a részecskék hőmozgása is képes legyőzni.



1.6. ábra A molekula kötésben résztvevő atomokban pozitív és negatív töltés súlypontja nem esik egybe

A molekularácsok általában szigetelők, csak nagyon alacsony hőfokon stabilak. Mechanikai tulajdonságaik alapján szerkezeti anyagként nincs jelentőségük.

Itt kell még említést tenni az ún. **hidrogénkötésről**. Vegyületek esetében tartós dipólusok is létrejöhetnek. Ilyen jellemző dipólus-molekulák a hidrogénnek valamely erősen elektronegatív atommal alkotott vegyülete (pl. F-ral, N-nel, O-nel).

Az elektronegatívabb atom jobban vonzza a közös elektronokat, ezért a kötés a hidrogén irányában pozitívabb lesz, így köztük másodlagos kötés jön létre.

A technológiai szempontból fontos fémek kristályszerkezete eltér az eddig ismertetett típusoktól. **Fémkristályokban** a részecskéket fémes kötések kapcsolják össze. Ennek a kötésformának az energiája széles határok között változik, ezért a különböző fémek tulajdonsága, olvadáspontja is nagyon eltérő (a higanyé  $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a volfrámé  $3380\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

A fématomok leadják külső elektronhéjukon lévő vegyérték elektronjaikat és így válnak pozitív fém ionná. A megmaradt elektronhéjuk telített, ionjaik szorosan egymáshoz illeszkednek. Mivel elektronhéjuk zárt, az ionok elektromos tere független az iránytól, nagysága a távolságtól függ. A gömbszerű részecskék a tér minél tökéletesebb kitöltésére törekszenek.

Az így kialakuló fémion rácsban a leadott elektronok, úgynevezett *elektronfelhőt* képeznek, és pl. elektromos tér hatására szabadon elmozdulhatnak a rácsban. Ez biztosítja a fémek jó vezetőképességét.

A tömött kristályrácsban elhelyezkedő pozitív fémionok taszítják ugyan egymást, de eltávolodásukat a szomszédos ionok taszító ereje és az elektronok vonzó ereje megakadályozza. Külső igénybevétel hatására a fémrács ionjai könnyen elmozdulnak egymáson anélkül, hogy a kötés gyengülne, a rács atomsíkjai elcsúszhatnak egymáson, és mivel a kötő elektronok a tér bármely irányában szabadon elmozdulhatnak, ezért a fém *képlékeny alakváltozásra képes*. Mechanikai igénybevétel hatására törés nélkül megváltoztathatja alakját. Ezért foglalnak el olyan fontos helyet a fémek a szerkezeti anyagok között. Bár napjainkban egyre többféle természetes és mesterségesen előállított anyagot használunk fel, mégis a fémek a legelterjedtebben használt szerkezeti anyagaink.

### 1.1.3 Fémek főbb kristályrács típusai

A hét kristályrendszer közül azokkal foglalkozunk kicsit részletesebben, amelyekkel a leggyakrabban találkozunk a fémek alakítása, az alakítási folyamat vizsgálata során.

Közülük számunkra az egyik legfontosabb és legérdekesebb a köbös kristályrendszer.

A köbös rendszer, más néven kockarács fő jellemzői:

- a térbeli koordináta rendszer három tengelye egymásra merőleges,
- mindegyik mentén az elemi cella élhossza azonos.

A kristályrácsban egy elemi cella egy olyan kocka, amelynek éle ( $a$ ) az anyagra jellemző hosszúságú.

A kristályos anyag tulajdonságaira az elemi cella geometriáján kívül a következő paraméterek vannak hatással:

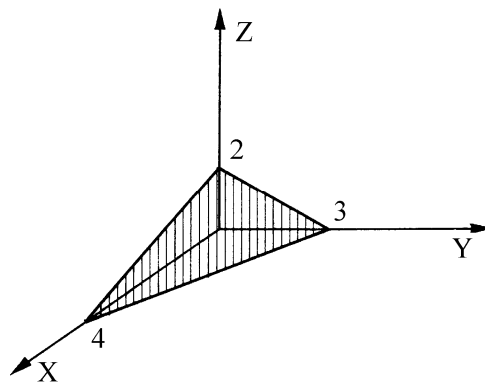
- a** **rácsparaméter**, az elemi cella élének hossza [ $10^{-10}$  m],
- A** az egy elemi cellához tartozó **atomszám**,
- N** a **koordinációs szám**, ami egy atom közvetlen szomszédainak számát jelenti,
- d** **atomátmérő** ( $a$ -paraméter függvényében kifejezve),
- r** **atomsugár** [ $10^{-10}$  m],
- T** **térkitöltés**, egy elemi cellához tartozó atomoknak és az elemi cella térfogatának aránya [%],
- $r_0$  az elemi cellát felépítő atomok közötti helyre **beírható legnagyobb gömb sugara**,
- ( $x_a; y_a; z_a$ )** az  $r_0$  sugarú gömb **középpontjának koordinátái**,
- M** **Miller-index**, legszorosabb illeszkedésű (atomokkal "legsúfoltabb") sík tengelymetszékei. E sík mentén megy végbe a fémek alakváltozása.

A Miller-index fogalmát kicsit részletesebben kell magyarázni. Egy kristálytani sík egyértelmű helyzetének meghatározásához használják. A sík metszik a

koordinátatengelyeket, de legalábbis az egyiket. Ezeknek a tengelymetszékeknek a segítségével jellemezhetjük a kristálytani síkot. Az 1.7. ábrán vonalkázva jelölt sík a x-tengelyt 4 egységnél, az y-tengelyt 3 egységnél, a z-tengelyt 2 egységnél metszi. Ha ezek reciprokát képezzük, a következő törteket kapjuk:

$$\frac{1}{4}; \frac{1}{3}; \frac{1}{2}.$$

Ha a törteket beszorozzuk a nevezők legkisebb közös többszörösével (12-vel), a törtek eltűnnek: 3; 4; 6. A kapott számhármast a Miller-index, jelölése: M (346). Valamely tengellyel párhuzamos sík esetén a Miller-index eleme „0”, pl. M (100).



1.7. ábra Vázlat a Miller-index fogalmának értelmezéséhez

A köbös rács típusnak három fajtája van:

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

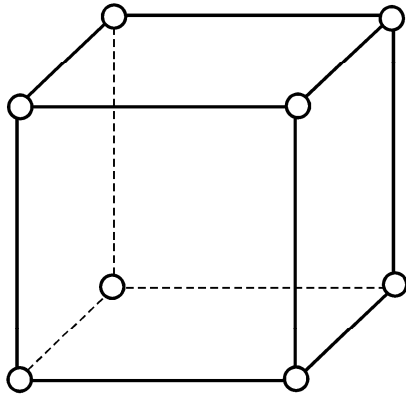
Mindhárom esetben a fémionok a kocka csúcspontjaiban helyezkednek el, de a **térközepes köbös** rácsnál (röviden - **tkk**) még a kocka térátlóinak metszéspontjában is, a **lapközepes köbös** rács esetén (röviden - **lkk**) még a lapátlók metszéspontjaiban is fémionok vannak.

A tengelyek által bezárt szögek:  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ .

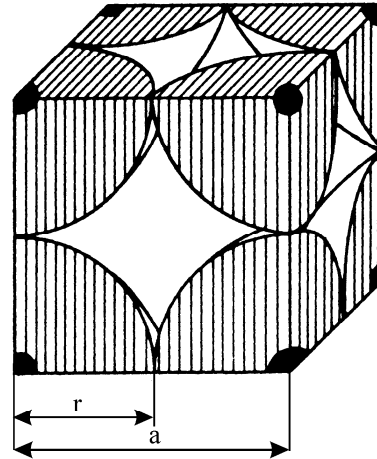
### Az egyszerű köbös rendszer jellemzői

Az egy elemi cellához tartozó atomok számát a kocka csúcsaiban helyet foglaló atomok számából lehet meghatározni (1.8. ábra). Ezek száma ugyan nyolc, de az egyes atomok nemcsak egy, hanem az összes szomszédos (összesen nyolc) elemi cellához tartoznak. Így az egy elemi cellához tartozó atomok száma:

$$\mathbf{A} = 8 \frac{1}{8} = 1.$$

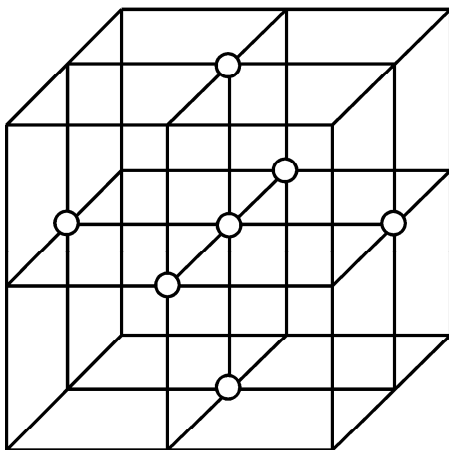


a.)

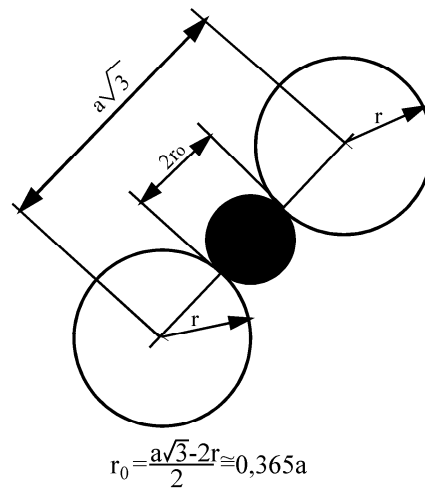


b.)

Koordinációs szám  $N=6$



c.)



d.)

1.8. ábra Egyszerű köbös térrács jellemzői

Könnyen belátható, hogy minden atomnak a három tengely mentén az egyik és a másik oldalon is van egy-egy szomszédja. Így a koordinációs szám:

$$N = 3 \cdot 2 = 6.$$

Ha a rácsot alkotó atomok az élek mentén érintkeznek, az atom sugara a rácsparaméterrel kifejezve:

$$r = \frac{a}{2}.$$

Egy atom térfogata egy  $r$  sugarú gömb térfogatával egyenlő:

$$V_a = \frac{4r^3\pi}{3} = \frac{4\left(\frac{a}{2}\right)^3\pi}{3} = 0,52a^3.$$

A térkitöltés az elemi cellának és a cellához tartozó atomok térfogatának arányát fejezi ki:

$$T = \frac{V_a}{a^3} = \frac{0,52a^3}{a^3} = 0,52 \Rightarrow 52\%.$$

Az elemi cellában a legnagyobb üres hely középpontja a kocka középpontjában, vagyis a térátlók metszéspontjában van, amelynek koordinátái:

$$\left(\frac{1}{2}a; \frac{1}{2}a; \frac{1}{2}a\right).$$

Erre a helyre beírható legnagyobb gömb sugara:

$$r_0 = \frac{a\sqrt{3} - 2r}{2} = 0,365a.$$

A legszorosabb illeszkedésű sík Miller-indexe:  $M(100)$ .

### A térközepes köbös rács jellemzői

Egy elemi cellához tartozó atomok száma az egyszerű köbös cellához képest eggyel több, mivel a térközépen is van egy saját atom, és ez csak ehhez az egy cellához tartozik (1.9. ábra):

$$A = 8 \cdot \frac{1}{8} + 1 = 2.$$

Ha a kocka közepén lévő atomot választjuk a vizsgálathoz, könnyű belátni, hogy egy atom közvetlen szomszédjainak száma, vagyis a koordinációs szám:

$$N = 8$$

Mivel az atomok a testátló mentén érintkeznek (1.9/c. ábra), az atomsugár:

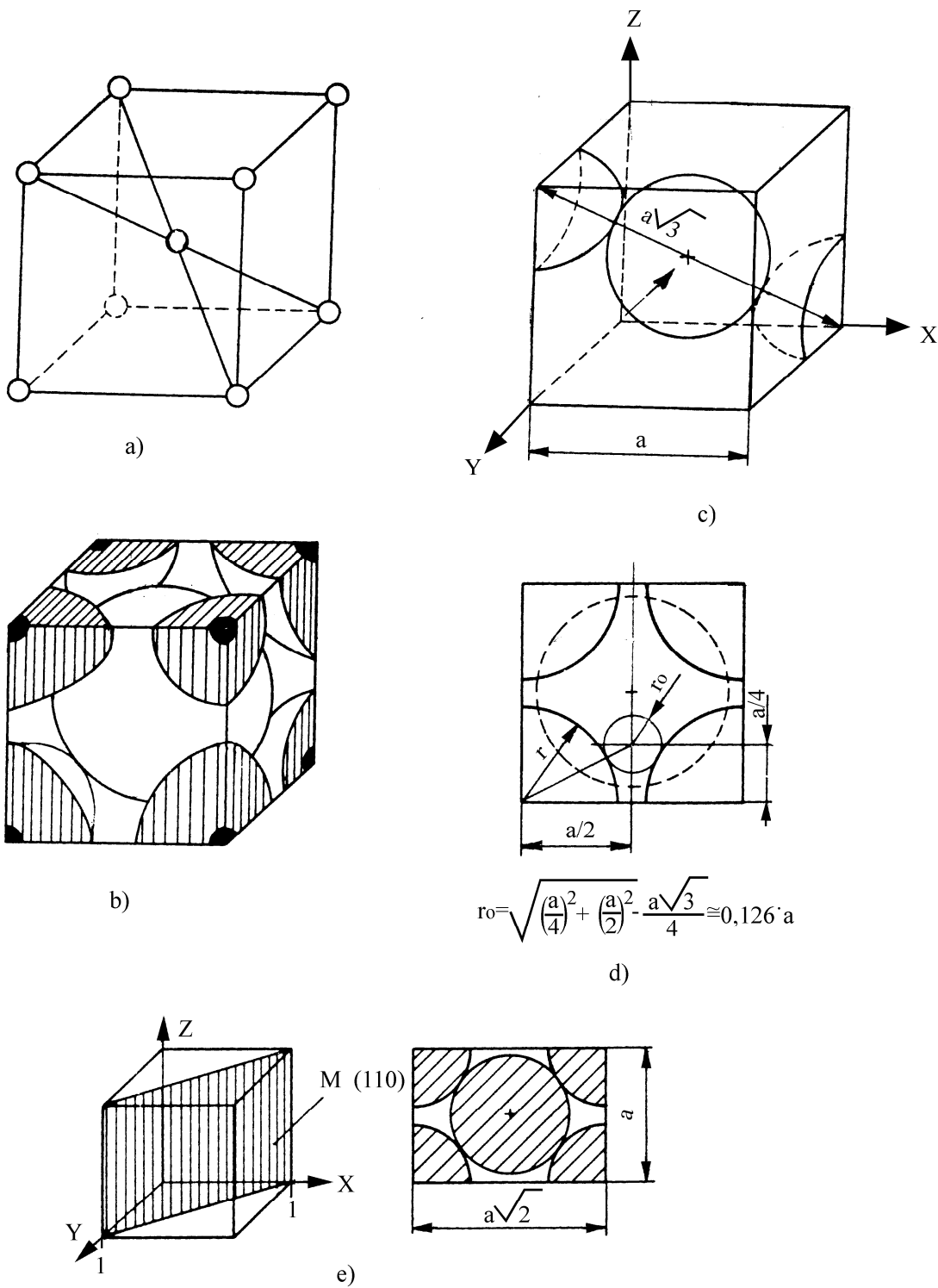
$$4r = a \cdot \sqrt{3},$$

$$r = \frac{a \cdot \sqrt{3}}{4} = 0,43 a.$$

Az atom térfogata:

$$V_a = \frac{4 \cdot r^3 \pi}{3} = \frac{4 \cdot \left(\frac{a \cdot \sqrt{3}}{4}\right)^3 \cdot \pi}{3} = 0,34 \cdot a^3.$$





1.9. ábra Térközepes köbös rács jellemzői

Egy elemi cellához két atom tartozik, így a térkitöltés:

$$T = \frac{2 \cdot V_a}{a^3} = \frac{2 \cdot 0,34a^3}{a^3} = 0,68 \Rightarrow 68 \%$$

A térközepes köbös rácsban a beírható legnagyobb gömb középpontjának koordinátái:

$$\frac{1}{2}a, \frac{1}{4}a, 0.$$

A legnagyobb beírható gömb sugara az 1.9 ábra összefüggései alapján:

$$r_o = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{a}{4}\right)^2} - \frac{a\sqrt{3}}{4} \cong 0,126a.$$

A rács legsűrűbb atomsíkjának Miller-idexe: M(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 volfrám (W) és ilyen a vas  $\alpha$ -módosulata.

### A lapközepes köbös rács jellemzői

Mivel itt a hat lap közepén lévő atomok két szomszédos cellához tartoznak (1.10. ábra), így az egy elemi cellához tartozó atomok száma:  $A =$

$$8 \cdot \frac{1}{8} + 6 \cdot \frac{1}{2} = 4.$$

Az 1.10/e. ábra szerint egy lapközépen lévő atomot kiválasztva látható, hogy a három koordinátatengely irányában négy-négy, tehát  $3 \cdot 4 = 12$  közvetlen szomszédja van, így a koordinációs szám:  $N = 12.$

Az atomok a lapátló mentén érintik egymást, így az atomsugár:

$$4r = a \cdot \sqrt{2},$$

$$r = \frac{a \cdot \sqrt{2}}{4} \cong 0,35a.$$

Így az atom térfogata:

$$V_a = \frac{4 \cdot r^3 \pi}{3} = \frac{4 \left(\frac{a \cdot \sqrt{2}}{4}\right)^3 \pi}{3} = 0,185a^3$$

Az elemi cellához négy atom tartozik, így a térkitöltés:

$$T = \frac{4 \cdot V_a}{a^3} = \frac{4 \cdot 0,185a^3}{a^3} = 0,74 \Rightarrow 74 \%$$

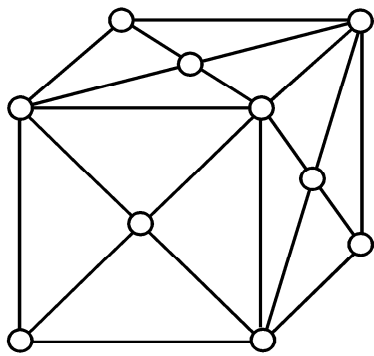
A legnagyobb beírható gömb középpontjának koordinátái:

$$\left(\frac{1}{2}a; \frac{1}{2}a; \frac{1}{2}a\right).$$

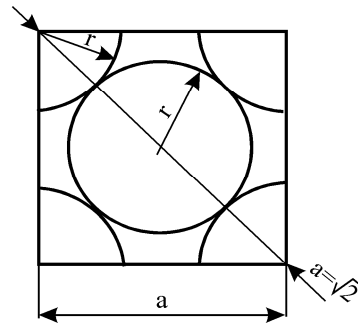
A beírható gömb sugara:

$$r_o = \frac{a}{2} - r \cong 0,145a.$$

A szoros illeszkedésű sík Miller-indexe:  $M(111)$ .



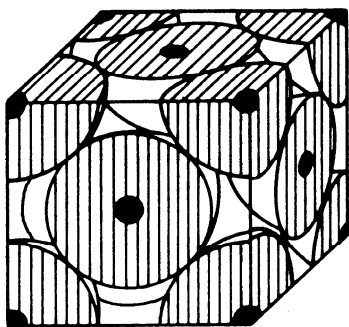
a.)



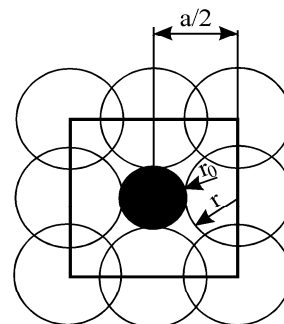
atomsugár:

$$r = \frac{a\sqrt{2}}{4} = 0,35a$$

c.)

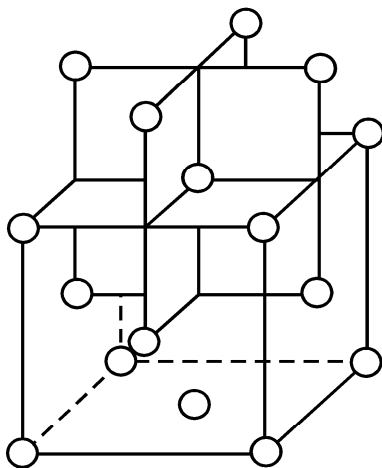


b.)



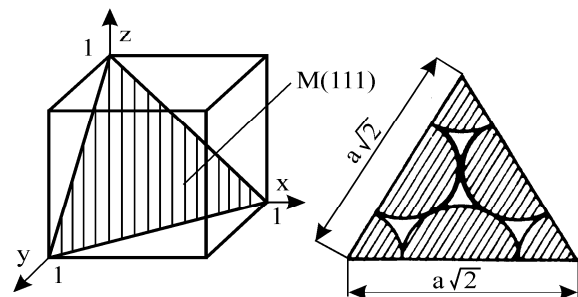
$$r_0 = \frac{a}{2} - r = 0,145a$$

d.)



koordinációs szám:  
N=12

e.)



f.)

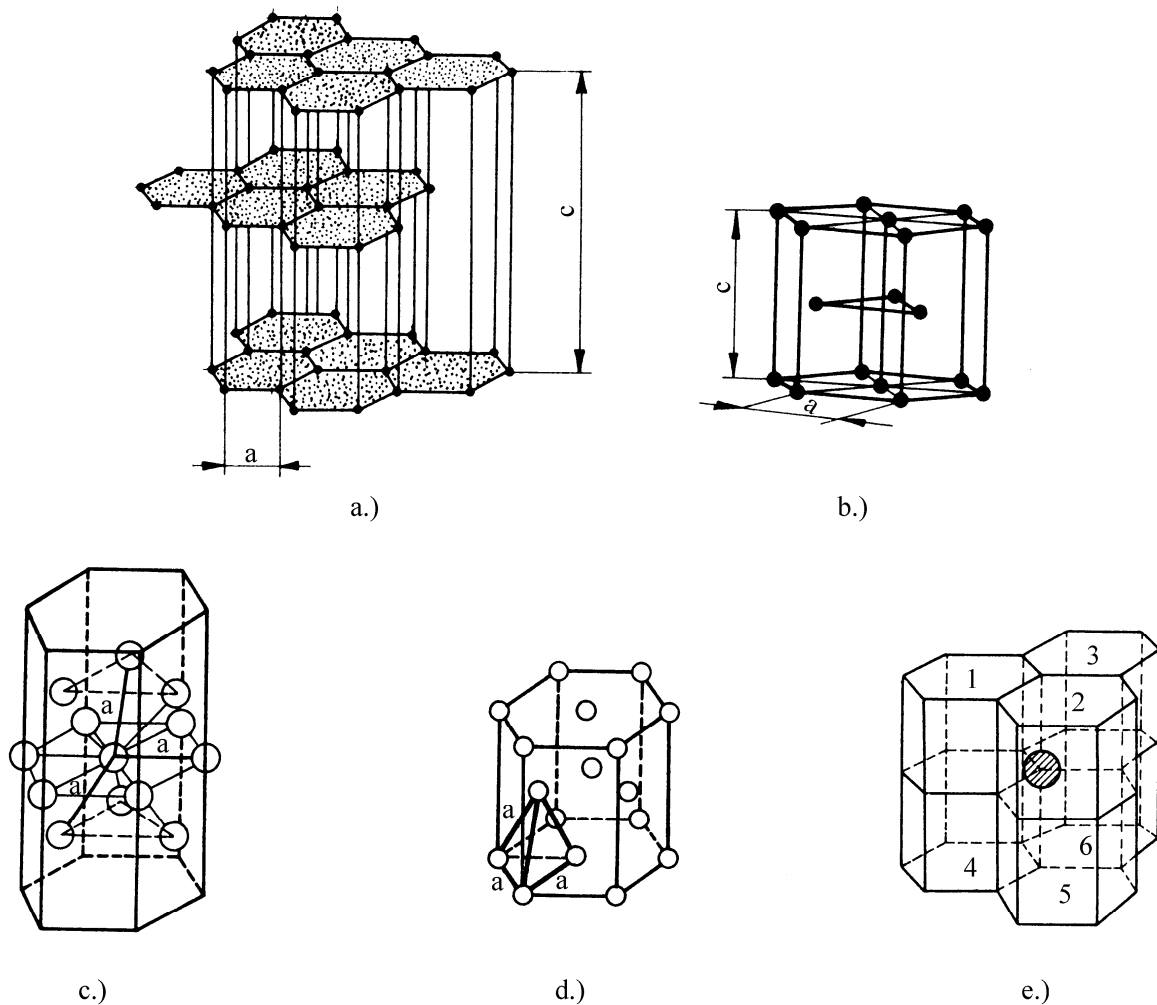
1.10. ábra Lapközepes köbös térrács jellemzői

Ilyen rendszerben kristályosodnak a legfontosabb gyakorlati fémek, pl. a réz (Cu), alumínium (Al), nikkél (Ni), Ólom (Pb) és a nemesfémek. A vas  $\gamma$ -módosulata szintén lapközepes köbös szerkezetű.

### A hatszöges (hexagonális) kristályrács jellemzői

A gyakorlatban használt fémek szempontjából kisebb jelentőséggel bír a hatszöges (méhsejt szerű) vagy hexagonális rács (1.11. ábra). Az egyszerű módosulat esetén a fématomok a szabályos hatszögletes hasáb sarokpontjaiban helyezkednek el (1.11/a. ábra). Ilyen rácsban kristályosodik, pl. a grafit (C).

Ennél sűrűbb illeszkedésű hexagonális rendszerben nemcsak a sarokpontokban, de az alap- és fedőlapon, valamint a hasáb belsejében is található fématom (1.11/b. ábra). Ilyen rendszerben kristályosodik a horgany (Zn), a magnézium (Mg), a kadmium (Cd) és ilyen a titán (Ti) egyik módosulata.



1.11. ábra A hexagonális rács felépítése  
 a.) egyszerű (primitív) hatszöges rács  
 b.) szoros illeszkedésű hatszöges rács elemi cellája

A kristálysíkokban az atomok szabályos hatszögeket alkotnak, köztük lévő 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:

$$A = \frac{12}{6} + \frac{2}{2} + 3 = 6 \text{ atom.}$$

A koordinációs szám ebben a rendszerben  $N = 12$ , a térkitöltés 74%. A legsűrűbb illeszkedésű sík Miller-indexe:  $M(0001)$

A különböző rácstípusok jellemzőit a jobb áttekinthetőség érdekében, táblázat foglalja össze (1.1. táblázat).

1.1 táblázat Rácstípusok jellemzői

Sor-sz.	Kristályrácstípusok				
	Rácsjellemzők jele	Egyszerű köbös	Térközepes köbös	Lapközepes köbös	Hexagonális
1.	<b>a</b>	a	a	a	a
2.	<b>A</b>	1	2	4	6
3.	<b>N</b>	6	8	12	12
4.	<b>r</b>	0.5 a	0.43 a	0.35 a	-
5.	<b>V<sub>a</sub></b>	0.52 a <sup>3</sup>	0.34 a <sup>3</sup>	0.185 a <sup>3</sup>	-
6.	<b>T</b>	52 %	68 %	74 %	74 %
7.	<b>r<sub>0</sub></b>	0,365 a	0,126 a	0,145 a	-
8.	<b>(x<sub>a</sub>; y<sub>a</sub>; z<sub>a</sub>)</b>	$\left(\frac{1}{2}a; \frac{1}{2}a; \frac{1}{2}a\right)$	$\left(\frac{1}{2}a; \frac{1}{4}a; 0\right)$	$\left(\frac{1}{2}a; \frac{1}{2}a; \frac{1}{2}a\right)$	-
9.	<b>M</b>	(100)	(110)	(111)	(0001)

a – mindenkorai ráczállandó, nagysága egy adott fémre jellemző [ $10^{-10}$  m]

Van még egy rácstípus, amely éppen a vasötvözetekkel kapcsolatosan fog felmerülni a későbbiekben. A **tetragonális rács** lényegében a köbös rácsból származtatható. Ha a kocka az egyik tengely irányban megnyúlik valamilyen rácsstorzító hatás, pl. beékelődő szénatom miatt, kialakulhat a tetragonális (*négyszetes oszlop*) szerkezet. Erről részletesebben az acélok hőkezelésénél lesz szó.

## 1.2 Fémek kristályrácstípusainak szerkezetének hibái

Az egyes fémek kristályrácstípusa a már megismert elemi cellák térbeli, periodikus ismétlődéséből jön létre. A fémionok szabályos elrendeződése és a részecskék távolságának fizikai tulajdonságainak ismeretében, elméleti úton is meghatározható, kiszámítható az egyes fémek szilárdsága. Amikor kutatók megvizsgálták a maradó alakváltozást létrehozó feszültség nagyságát és összevetették az elméleti, számított értékkel, azt tapasztalták, hogy a maradó alakváltozás megindításához lényegesen, mintegy két-három nagyságrenddel kisebb feszültség szükséges, mint a számítások alapján, az várható lenne. Az 1930-as években, különböző laboratóriumokban kezdték keresni a jelenség

magyarázatát. Szinte egy időben jutott hasonló következtetésre a magyar *Orowán Emil*, *Polányi Mihály* és az angol *G. J. Taylor*. Arra a megállapításra jutottak, hogy szemben az elméleti tökéletes rácsszerkezettel, a gyakorlatban használt fémek rácsszerkezete közel sem hibátlan. Bennük rendezetlenségek, folytonossági hiányok, torzulások alakulnak ki. Ennek oka, mint később látni fogjuk, a kristályosodási folyamatban, a környezeti tényezők hatásában keresendő.

A kutatók következtetései akkor váltak bizonyítottá, amikor az 1930-as években sikerült tökéletes szerkezetű ún. egykristályokat növeszteni. Bár ezeknek a fémkristályoknak átmérője csak néhány ezred milliméter hosszúságú, csupán néhány milliméter volt, alkalmasak voltak annak igazolására, hogy a hibátlan kristályrác szilárdsága megfelel a számított értéknek. Ezeket a sörte alakú kristályokat *whiskernek* nevezték el. A gyakorlatban fémek előállításakor nem keletkeznek tökéletes kristályok, hanem az idegen, ötvöző vagy szennyező atomoktól, esetleg rendellenesen elhelyezkedő saját atomoktól, a képlékeny alakítástól vagy hőkezeléstől különféle típusú rácshibák jönnek létre. Ezek kialakulása törvényszerű. A különféle típusú rácshibákat kiterjedésük szerint lehet csoportosítani.

Ezek lehetnek:

1. pontszerűek,
2. vonalszerűek (diszlokációk),
3. felületszerű hibák.

### **1.2.1 A pontszerű rácshibák**

Pontszerű rácshiba esetén a rendellenesség a kristályrácsnak csak egy-két atomátmérőnyi részére korlátozódik. A hiba kis mértékben megváltoztatja a környező atomok helyzetét részben rugalmas, részben elektrosztatikus erőhatások révén.

A pontszerű hibák jellegüket tekintve lehetnek:

- üres rácshelyek,
- szubsztitúciós (helyettesítéses) atomok,
- intersztíciós (beékelődéses) atomok.

**Üres helyek** a kristályrácban az abszolút nulla foktól eltérő hőfokon mindig kialakulnak. Számuk függvénye a hőmérsékletnek. Legkönnyebben a kristály szabad felszínén és a szemcsehatáron hagyják el a helyüket az atomok. Szobahőmérsékleten közelítőleg minden  $10^{18}$  rácshely üres, de 1000 K-nál már minden  $10^5$  hely, az olvadáspont közelében, pedig minden ötezredik ( $5 \cdot 10^3$ ) rácspont üres. Az üres helyek száma növeli a rác energiátartalmát, vagyis létrejöttükhöz energiát kell befektetni. A mechanikai energia befektetésével, pl. képlékeny alakítással is növekszik az üres helyek száma. Egyébként a statisztikus fizika szerint,  $T$  hőmérsékleten az  $N$  atomból álló kristályban meghatározható az üres helyek száma:

$$n = N \cdot e^{-\frac{W}{kT}},$$

n	üres helyek száma,
N	a kristályban lévő atomok száma,
e	a természetes alapú logaritmus alapszáma ( $e \approx 2,73$ ),
W	a szomszédos atomok visszatartó ereje ellen végzendő munka [ $10^{-23}$ J]
k	Boltzmann-féle állandó ( $k = 1,38 [10^{-23}$ J/K)
T	hőmérséklet [K]

A keletkező üres helyek még a hőtágulás mértékét is befolyásolják. A rácslukak helye a kristályban nem állandó, hanem az üres helyekre ugró atomok révén mindig máshol keletkeznek lyukak, így az üres helyek mintegy vándorolnak az anyagban. Ez a kaotikus mozgás előbb-utóbb oda vezet, hogy pl. idegen atomok okozta inhomogenitások a kristályban szétszóródnak, kiegyenlítődnek a rácslukak mozgása révén. Ezt a folyamatot *kristálydiffúzió*nak nevezzük.

A pontszerű rácshibáknak két fő fajtájuk van, amelyek további alcsoportokra oszthatók.

Attól függően, hogy milyen atom okozza a rácshibát, beszélhetünk:

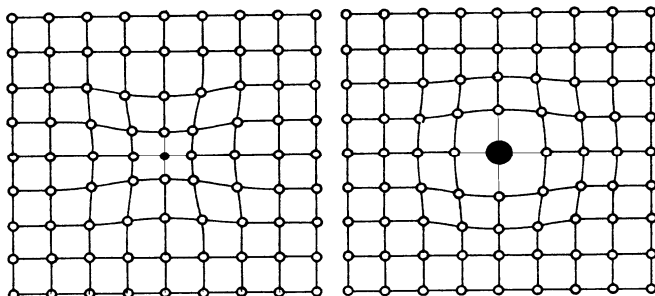
1. idegen atom okozta pontszerű rácshibáról,
2. saját atom okozta pontszerű rácshibáról.

Az **idegen atom okozta pontszerű rácshibáknak** két fajtája van:

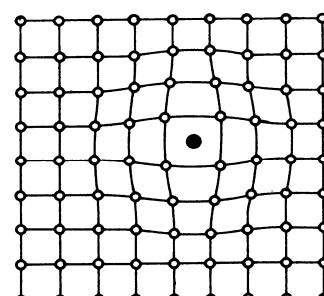
- szubsztitúciós (helyettesítéses),
- interosztíciós (beékelődéses) rácshiba.

A **szubsztitúciós** vagy más néven helyettesítő atomok úgy okoznak rácshibát, hogy a rács atomjai helyére egy idegen atom épül be. Mivel az idegen atomnak mindig eltérő a mérete az eredeti atom méretétől (kissé nagyobb vagy kicsit kisebb), így torzítja a rácsot (1.12. ábra).

Az **interosztíciós** atomok a rácsot alkotó atomok közé ékelődnek be, ha kellően kicsik. Ezek is torzítják a rácsot (1.13. ábra).



1.12 ábra Szubsztitúciós rácshiba



1.13. ábra Intersztíciós rácshiba

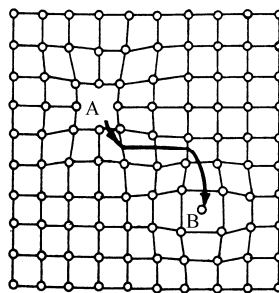
A **saját atom is** okozhat pontszerű rácshibát úgy, hogy a rácsot alkotó atom valamilyen oknál fogva elhagyja a helyét.



E hibák fajtái a következők:

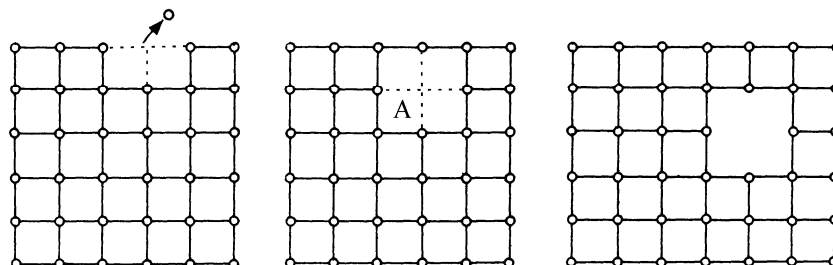
- Frenkel-féle rácshiba,
- Schottky-féle rácshiba.

**Frenkel-féle** hiba úgy jön létre, hogy a kristályt nagy energiájú, pl. neutronsugárzás éri. A nagy sebességgel rendelkező, nagy tömegű és semleges részecske ki tudja lökni a rácspontból, a rácsot alkotó atomot (1.14. ábra). A helyéről „kilökött” atom valahol beékelődik a többi atom közé, egyszerre létrehozva egy üres helyet és egy interstíciós hibát. E hibának létrejöttéhez nagy energiára van szükség, amit a tény is fokoz, hogy a beékelődő atom jóval nagyobb méretű, mint az üres helyek nagysága. Amikor neutronsugárzással az alumínium folyáshatárát mintegy másfélszeresére növelik, ezt Frenkel-féle rácshibák létrehozása révén érik el.



1.14. ábra Frenkel féle rácshiba

A **Schottky-féle** rácshiba kialakulásának sokkal nagyobb a valószínűsége. Ennek oka az, hogy lényegesen kisebb energia kell létrejöttéhez. Ha figyelembe vesszük, hogy a kristályrács felszínén vagy a szemcse határán elhelyezkedő atomot nem minden irányból éri ugyan az a hatás, hiszen a felszínen nincs szomszédja, belátható, hogy egy-egy közülük olyan mozgásenergiára tehet szert, hogy kiléphet a rácsból egy üres helyet hátrahagyva (1.15. ábra). Az üres helyre egy szomszédos atom, hasonló okok miatt, könnyen beléphet, diffundálhat. Ezzel az üres hely mintegy vándorolni kezd az anyagban. A jelenséghez elegendő az atomok termikus energiája.



1.15. ábra Schottky-féle rácshiba  
(üres rácshelyek képződésének és vándorlásának mechanizmusa)

### 1.2.2 Vonalszerű rácshibák (diszlokációk)

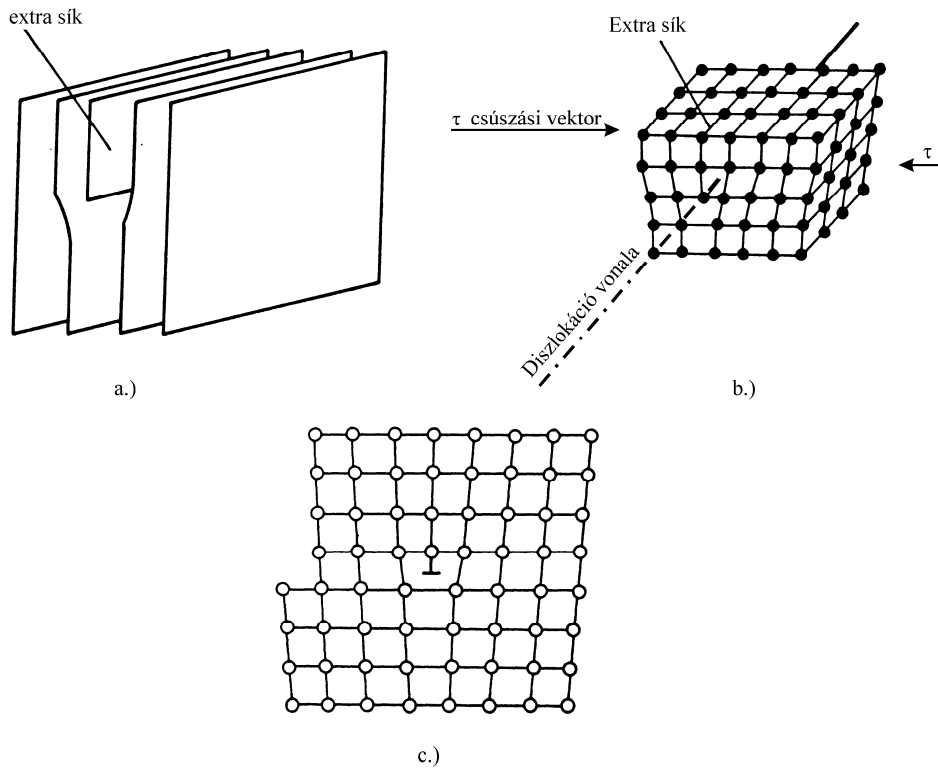
Ha egy köbös kristályrács rendszert szemlélünk, megállapíthatjuk, hogy egymással párhuzamos és egymásra merőleges síkok alkotják, feltéve, hogy a rács szabályos és hibátlan. Ebben a szabályos rendszerben azonban nemcsak helyi, pontszerű hibák keletkezhetnek, hanem olyanok is, amelyek egy vagy két kiterjedésűek, az atomok sorára, síkjára terjednek ki. Ilyenek a **vonalszerű (egyméretű) rácshibák**, más néven **diszlokációk** (1.16. ábra). A hibát egy olyan atomsík hozza létre, amely mint egy kés éle a vajba, bemerül a párhuzamos síkok közé, szétfeszítve azokat, de a többi síknál rövidebb. Mivel ez sík a többi síktól eltérő, *extra félsíknak* nevezik. Az **extra sík** éle a párhuzamos síkok között húzódik, az él mentén rácstorzulás lép fel (1.16/a. ábra).

A bonyolult térbeli ábrázolás helyett általában a rácshibát a kristályrács egy merőleges síkmetszetével szokás ábrázolni. Az extra félsík végét, vagyis a diszlokáció vonalát „ $\perp$ ”

jellel tüntetik fel. Ennek a rajz síkjára merőleges hossza a *diszlokáció hosszúsága*. A rácsban a hibasor, az XY éldiszlokáció mentén rácstorzulás lép fel és ez a kristályban rugalmas deformációt hoz létre. Ennek következtében a diszlokáció síkja felett nyomó, alatta húzó feszültség ébred.

A éldiszlokáció kialakulása egy egyszerűsített módszer szerint a következő képen képzelhető el. Egy kiragadott, téglatest alakú szabályos kristályrács részletét vizsgálva az 1.16/b. ábra szerint  $\tau$  csúsztatófeszültséggel terhelünk, aminek hatására az ABCD csúszósík mentén a sík feletti rész egy-két atomátmérőnyi részt elcsúszik, míg az XY vonal alatti rész helyben marad. A csúszás iránya párhuzamos a diszlokáció síkjával. Ha megvizsgáljuk az előállt állapotot, azt tapasztaljuk, hogy az elcsúszás úgy jött létre, hogy az egyes atomsíkokban az atomok közötti kapcsolat megszakadt és más síkok atomjaival kapcsolódtak, miközben olyan sík is létrejött, amelynek az elcsúszás síkja alatt nincs folytatása, vagyis extrasík. A diszlokációnak ezt a fajtáját **éldiszlokációnak** nevezik.

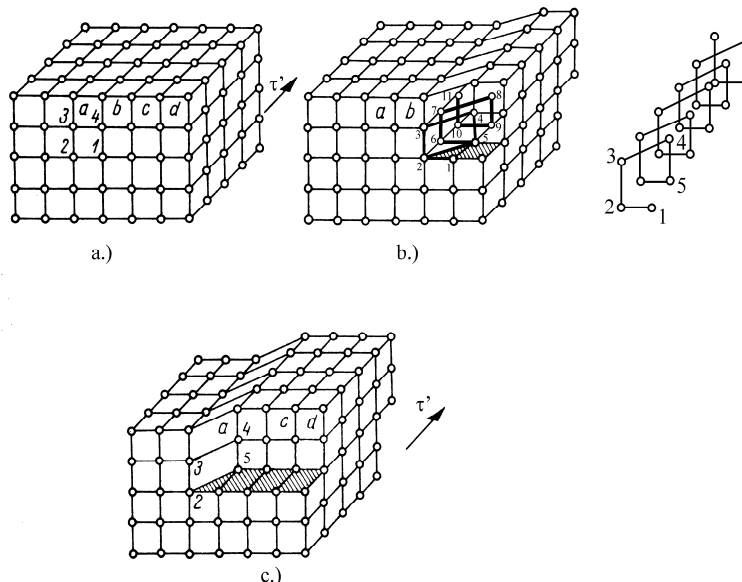
Van a diszlokációknak egy másik fajtája is, amit **csavardiszlokációnak** neveznek. Ez úgy jön létre, hogy az előbbi példában bemutatott elcsúszás a  $\tau$  csúsztatófeszültség hatására nem a teljes keresztmetszetben megy végbe, hanem úgy, hogy a sík egyik vége helyben marad. Itt a csúszás iránya párhuzamos a diszlokáció vonalával (1.17. ábra).



1.16. ábra Éldiszlokáció

a.) extra sík, b.) az éldiszlokáció keletkezésének modellje,  
c.) egyszerűsített metszeti vázlat.

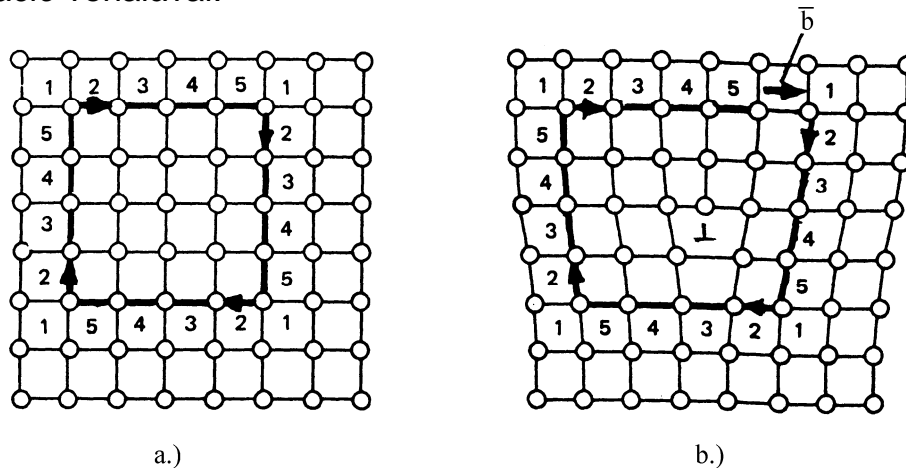
Az kristályrácsokban az éldiszlokációk, illetve a csavardiszlokációk kombináltan vagy egymást váltogatva fordulnak elő.



1.17. ábra Csavardiszlokáció modellje

A kristályrács metszeti ábráját szemlélve könnyen megállapíthatjuk, hogy egy vizsgált területen található-e diszlokáció, ha bármely atomtól elindulva körben járunk egy területet úgy, hogy jobbra, majd lefelé, utána balra, majd felfelé

ugyanannyi lépést teszünk. Ha a rács hibátlan, természetesen ugyan oda kell visszajutnunk, ahonnan elindultunk. Ez a **Burgers-kör** (1.18. ábra). Ha a körbejárás kezdő- és végpontja között különbség van, ez a bejárt területen található diszlokációra (extra síkra) utal. A kezdő- és végpontot összekötő egyenes szakasz a **Burgers-vektor**. Iránya a zárás irányába mutat. A Burgers-vektor kifejezi az elcsúszás mértékét, irányát, sőt még a diszlokáció típusát is, mivel éldiszlokációnál merőleges, csavardiszlokációnál párhuzamos a diszlokáció vonalával.



a.)  
b.)  
1.18. ábra A rácshiba megállapítása Burgers-körrel  
a.) hibátlan rácsrészlet, b.) diszlokációs rácshiba.

Diszlokációk keletkezhetnek kristálynövekedés során, továbbá az említett képlékeny deformáció alkalmával. A termikus feszültségek, valamint az ötvözők, szennyezők kiválása során keletkező feszültségek, mind hozzájárulnak a meglévő diszlokációk sokszorozódásához.

Mennyiségüket a **diszlokáció sűrűségével** szokás kifejezni, ami a felvett síkmetszet  $1 \text{ cm}^2$ -ét metsző diszlokációk számával fejezhető ki. Ez a felületi mérőszám a leginkább használatos, mivel elektronmikroszkóppal a mérés elvégezhető (20 000-szeres nagyításnál). Kifejezhető még a diszlokációk mennyisége a  $\text{cm}^3$ -kénti diszlokációk hosszával is.

A különböző állapotú fémekben lévő diszlokáció sűrűség nagyon eltérő lehet:

- szabályosan nőtt, nagyon tiszta egykristályokban  $< 10^3 / \text{cm}^2$ ,
- polikristályos, gyakorlati fémekben  $10^6 - 10^7 / \text{cm}^2$ ,
- hidegen, erősen alakított fémekben  $10^{11} - 10^{12} / \text{cm}^2$ .

Térfogati jelzőszámmal kifejezve a gyakorlati fémekben a diszlokációk hossza köbcéntiméterenként mintegy 500 km, de képlékeny alakítással 10 millió km-re is növekedhet.

A diszlokációk természetesen a kristályrács különböző irányú síkjaiban egyaránt léteznek.

### Diszlokációk mozgása

A vonalszerű rácshibák jelentőségét az a tulajdonságuk adja, hogy képesek elmozdulni a kristályrácsban. Ez a tulajdonságuk biztosítja a fémek jó alakíthatóságát. Mozgásuk két irányban is lehetséges.

A diszlokációknak külső terhelés hatására létrejövő, az extrasíkra merőleges mozgását **csúszásnak** (*transzlációnak*), az üres helyek kialakulása révén az extrasík irányában történő elmozdulást **kúszásnak** nevezik.

A **csúszás** mechanizmusa jó magyarázatot ad arra, hogy a fémek alakításához, miért szükséges az elméletileg meghatározottnál több nagyságrenddel kisebb terhelés.

Vizsgálat céljából emeljük ki egy hibátlan kristályrác egy kocka alakú részét, és az 1.19. ábra szerint  $\tau$  feszültséggel próbáljuk a felső részét elcsúsztatni egy **a** rácsparaméternyi az alsó részhez képest.

Ez elméletileg úgy lehetséges, ha az  $L \cdot L = L^2 = A$  [mm<sup>2</sup>] csúszósík felületén lévő összes atompár között fellépő erőt leküzdve csúsztatjuk egy rácsméretnyi az atomokat. Az ehhez szükséges erő:

$$F = L^2 \cdot \tau \text{ [N]}.$$

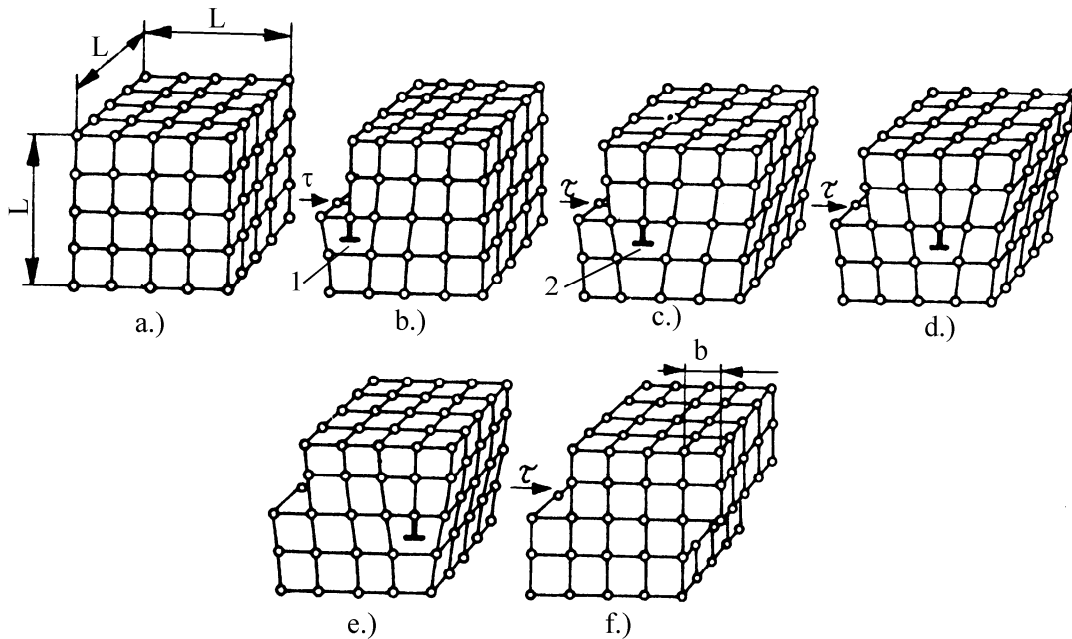
Ha az  $L^2$  területű atomsíkok egy **a** rácsparaméternyi elcsúsztatásához  $F$  erő szükséges, akkor az ehhez felhasznált munka:

$$W = F \cdot a = L^2 \cdot a \cdot \tau \text{ [J]}.$$

A valóságban ez az egységnyi elcsúszás nem így jön létre. A folyamatot a 1.19. ábra mutatja be. A  $\tau$  csúsztató feszültség hatására a felső kristályrész igyekszik elcsúszni, és kissé elmozdul. Ez azt jelenti, hogy az első atomsík a csúszás síkjánál megszakadt és így egy extrasík keletkezett. Kellően nagy csúsztató feszültség hatására az elcsúszás fokozódik, de ekkor a második atomsík szakad ketté és csúszik el, válik a sík felső része extrasíkká, az első atomsík felső, elcsúszott része, pedig találkozik, és kapcsolódik a második atomsík helyben maradt alsó részével, így képezve egy normális síkot. A folyamat addig tart, míg az utolsó sík is kettéválik. Így az extrasík a diszlokációt csúsztató erő ( $F_{\text{diszl.}}$ ) hatására, mintegy lépésről lépésre végigvonult a kristályrácson és fokozatosan jön létre az egy „a” rácsméretnyi elcsúszás, maradó deformáció.

Az ehhez szükséges munka mennyisége ( $W^*$ ) :

$$W^* = F_{\text{diszl}} \cdot L \text{ [J]}$$



1.19. ábra Éldiszlokáció csúszó mozgása, egyszerű köbös rácsban (a csúszás fázisai)

A két ismertetett elcsúszási folyamat közötti különbség jól érzékelhető egy példa alapján. Képzeljünk el egy nagyon nagy méretű szőnyeget, melyet 100 mm-rel kell arrébb húzni. Ez a feladat úgy is megoldható, hogy belekapaszkodunk a szőnyegbe, és nagy erővel elhúzzuk, de eljárhatunk úgy is, hogy egy megfelelő méretű redőt képezünk rajta, majd ezt végigvezetjük a szőnyeg végéig. Így ugyanakkora munka árán, bár több lépésben, de lényegesen kisebb erővel oldottuk meg a feladatot.

Visszatérve a kristályrács képlékeny deformációjának kérdésére, az elmozdulás akár több lépésben, a diszlokáció vándorlásával, akár egyszerre történő elcsúszással jött létre, a munka mindkét esetben természetesen azonos nagyságú:

$$W = W^* ;$$

$$L^2 \cdot \tau \cdot a = F_{\text{diszl.}} \cdot L,$$

$$F_{\text{diszl.}} = \tau \cdot L \cdot a.$$

A két erő között a különbség jelentős, a kettő aránya:  
(korábban már meghatároztuk  $F = L^2 \cdot \tau$ )

$$\frac{F}{F_{\text{diszl.}}} = \frac{\tau L^2}{\tau L a} = \frac{L}{a}.$$

Mivel  $L$  a vizsgált kristályban a csúszósík hossza, ez, pedig egy kristalliton belül az azonos rácsorientációjú kristályrészben a tér mindhárom irányában

$10^2 - 10^3$  rácsparaméternyi méretű, az  $a$  pedig egy rácsparaméter. A kettő aránya:

$$\frac{L}{a} \cong 10^2 - 10^3 .$$

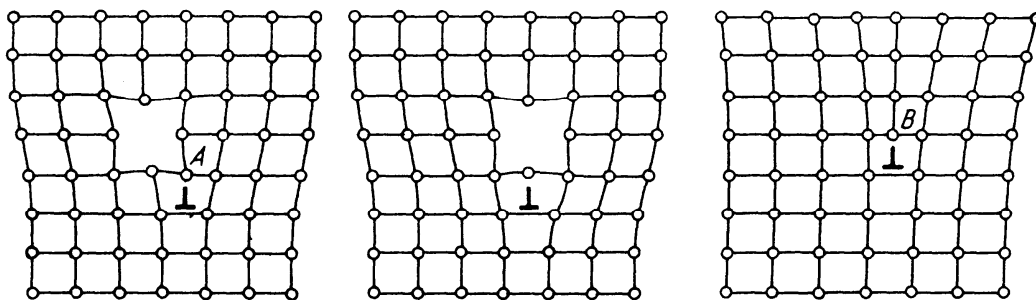
Így két erő aránya is:

$$\frac{F}{F_{diszl.}} \cong 10^2 - 10^3 .$$

Ez a számítás csak szemléltető jellegű, de jól bemutatja azt a tényt, hogy nagyságrendekkel kisebb erő kell a gyakorlatban előforduló, sokkristályos szerkezetű fémek képlékeny alakításához, mint a tökéletes rácsszerkezetű egykristályokhoz.

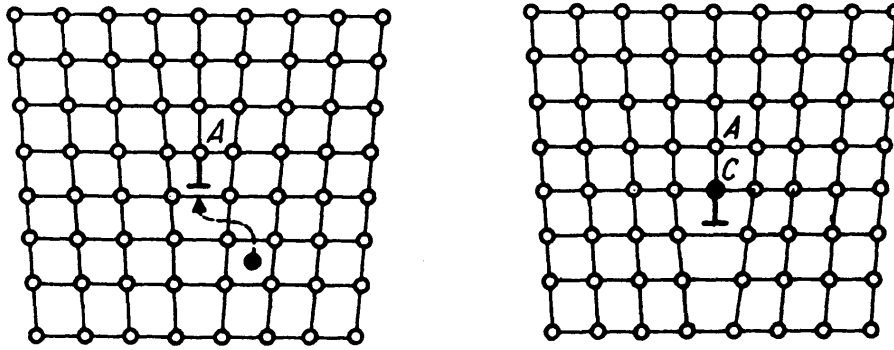
A diszlokációk mozgásának másik fajtája a **kúszás**, amikor a mozgás a csúszósíkra merőleges. Ez másként kifejezve azt jelenti, hogy a diszlokáció vonala az egyik síkból „átugrik” a másikba (az extra sík hosszabb vagy rövidebb lesz).

Ez létrejöhet üres helyeknek a kristályrácsban való mozgása (1.20. ábra) vagy interstíciós atomok (saját vagy idegen) mozgása révén (1.21. ábra).



1.20. ábra Éldiszlokáció kúszása, üres rácshely közvetítésével

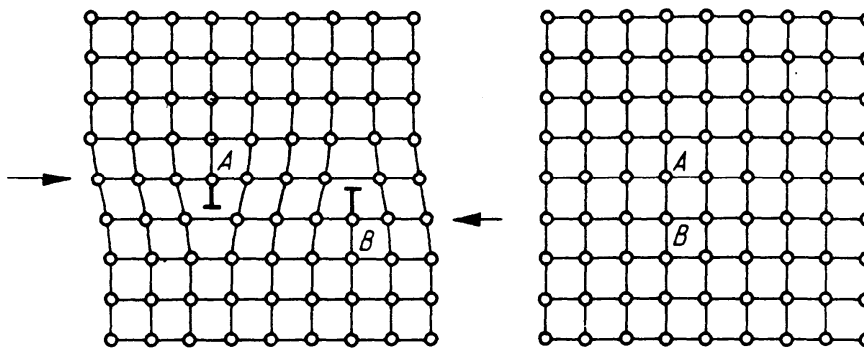
Az oldott vagy kivált idegen atomok mérete eltér a rácsot alkotó fématomok méretétől. Ezek főleg a diszlokációk környékén helyezkednek el. Ennek magyarázata az, hogy az extrasík szétfeszíti az atomsíkokat, alatta, pedig a síkok összeszűkülnek. Így a nagyobb oldott atomok a diszlokáció tágabb részének környezetébe, míg a kisebbek a leszűkült részen helyezkednek el. Ezek az atomok így nagymértékben stabilizálják a diszlokációt, gátolják annak mozgását. A csúszás megindításához emiatt jóval nagyobb feszültségre lesz szükség, a mozgásban lévők sebességét pedig csökkentik.



1.21. ábra Éldiszlokáció kúszása a diszlokáció alá beépülő atom (atomsor) közvetítésével

A diszlokációk egymásra is kölcsönösen hatnak. Az azonos csúszási síkban lévő két diszlokáció attól függően, hogy Burgers-vektoraik iránya azonos vagy ellentétes, taszítják, vagy vonzzák egymást.

Ha azonos csúszósíkban fekvő, két ellentétes irányú, de azonos nagyságú Burgers-vektorral rendelkező diszlokáció egymástól atomtávolságnyira van, találkozáskor normális síkká egyesülnek (1.22. ábra).



1.22. ábra Két diszlokáció egyesülése és megsemmisülése

Ha köztük két atomtávolság van, akkor találkozáskor üres hely keletkezik (1.23. ábra).

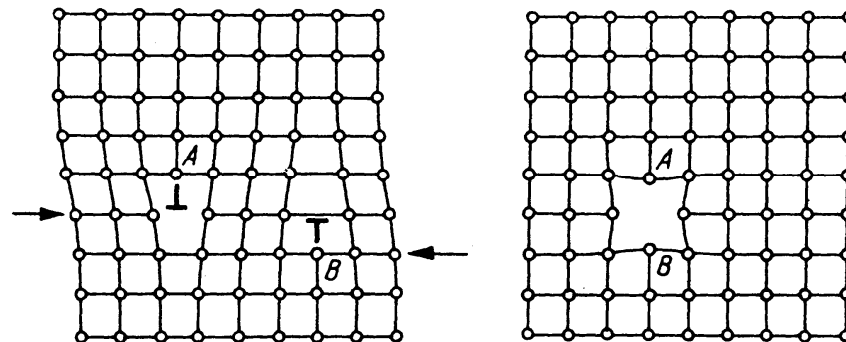
Abban az esetben, ha a két diszlokáció között több atomtávolság van, szabadon mozognak egymás mellett, de ha egymást keresztezik, gátolják egymás mozgását.

Ha két különböző síkban fekvő diszlokáció mozgás közben találkozik, mintegy *összeakadnak*, a találkozás vonalában lévő atomok mind a két diszlokációhoz tartoznak, törekednek mind a két irányba elmozdulni, így helyben maradnak. A két diszlokáció *lehorgonyzódik*. Ez azonban csak a diszlokáció vonalára vonatkozik, az extrasík többi részének mozgásképessége megmarad, tovább csúszik. Így a lehorgonyzódott pont, mint középpont körül spirálissá görbülnek a diszlokációk.

A fémek jó alakíthatóságát a bennük, nagyszámban előforduló és szabadon elmozduló diszlokációknak köszönhetik. Az alakítás során a



mozgásképtelenné vált diszlokációknak pótlódni kell. A gyakorlati tapasztalatok azt mutatták, hogy a fémekben a képlékeny alakítás során jelentős diszlokáció források működnek. Ilyen például a **Frank-Read diszlokáció forrás** (1.24. ábra).



1.23. ábra Üres rácshely keletkezése két éldiszlokáció találkozásakor

Ha egy CD diszlokáció két, vele nem egy síkban fekvő AB; EF diszlokációval találkozik úgy, hogy a két végpontja (1.; 2.) rögzítődik, akkor a CD diszlokáció többi pontja még mozgásképes marad és az F erő hatására előbb ívvé, majd egyre jobban meghajlik (1.24b ábra). Ez az ív tulajdonképpen a két rögzített (1.; 2.) pontból kiinduló spirális, melyeknek a két pont közötti része találkozik és összeolvad, így képezve ívet.

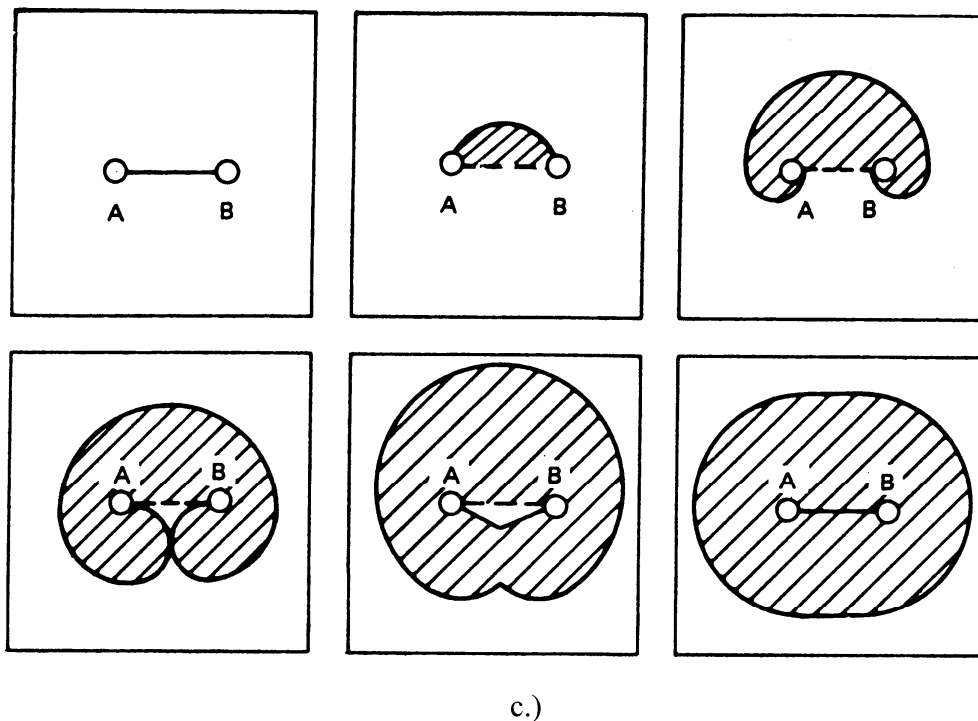
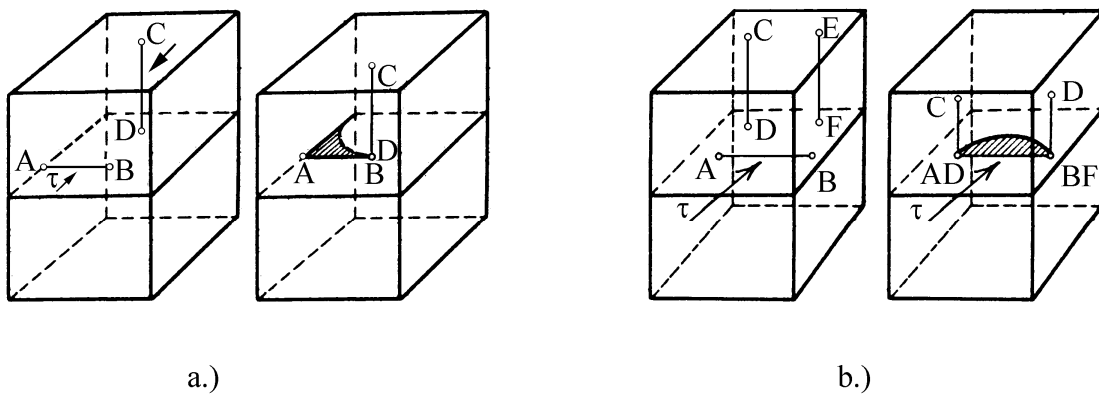
Ha ugyan ezt a folyamatot egy felülnézeti vázlaton szemléljük, nyomon kísérhetjük az F erő hatására folytatódó elcsúszás fázisait (vonalkázott terület) és az ívnek hurokká, majd zárt görbévé záródását. A két rögzített pont között újra kialakuló diszlokáció megismételheti az előző folyamatot. A leírt jelenség tulajdonképpen egy diszlokációt sokszorozó folyamat, amit felfedezőiről Frank-Read mechanizmusnak, a CD diszlokációt Frank-Read forrásnak neveznek.

A diszlokációk mozgásának határa van. Legfeljebb a krisztallitok határáig mozoghatnak, de sokszor a szemcse belsejében lévő egyéb akadályok is megállítják. Ezek főleg a kivált vagy oldott atomok a rácásban, valamint a diszlokációknak az egymásra gyakorolt hatása. A diszlokációk az akadály megközelítésekor azt rugalmasan deformálják, ezért energiára van szükségük az akadály megközelítéséhez. Így az akadály és a diszlokáció környezetében ez az energia rugalmas feszültség formájában tárolódik. Nagysága az akadály és a diszlokáció távolságának *negyedik hatványával* fordítottan arányos.

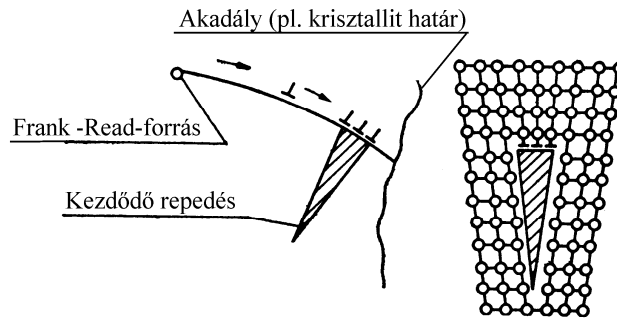
Az így fellépő nagy feszültség miatt a diszlokációk nem jutnak el az akadályokig, hanem azok előtt bizonyos távolságban felsorakoznak. Akkor is ez történik, ha ismétlődő, változó igénybevétel hatására a diszlokációk ide-oda mozognak, és eközben közelítik meg a krisztallithatárokat. Ennek során kezdő repedéseket, később kifáradásos törést okozva. Mivel az extrasíkok rövidebbek a normális rácssíkoknál, a diszlokációk vonala alatt atomhiány lép fel, mégpedig legalább annyi, amennyi diszlokáció felsorakozott (1.25. ábra). A hiányzó atomok a vonalkázott részen anyaghiányt, egy kezdődő repedést

képeznek. A hiányzó atomok helyének üreggé egyesülését tekintjük a fémek törését megindító folyamat kezdetének.

A kristályokat alkotó atomok energiaszintje akkor a legkisebb, amikor az atomok éppen rácsméretnyi távolságban vannak egymástól. A diszlokációk közelében ez nem valósul meg, az atomok energiaszintje így mindig nagyobb. A diszlokációk csak akkor tűnhetnek el a kristályrácsból, ha mozgásuk során kijutnak a kristály felületére, vagy összetalálkozva kioltják egymást. A diszlokációk ilyen mozgását számos tényező gátolja (például az akadály közelében növekvő rugalmas feszültség), így **a fémkristályok mindig tartalmaznak diszlokációkat.**

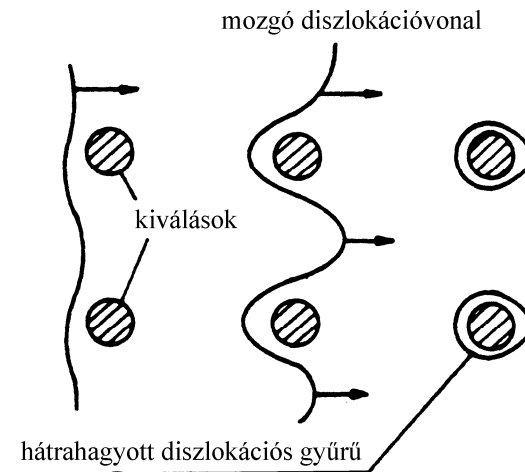


1.24. ábra A Frank-Read diszlokáció forrás működése  
a.) egy pontban rögzített éldiszlokáció mozgása, két pontban (A,B) rögzített éldiszlokáció mozgása, c.) felülnézeti vázlat.



1.25. ábra A diszlokációk vándorlása és felsorakozása az akadály előtt

A diszlokációk mozgásának gátlása lehet szándékos is. Ötvözetekben gyakran úgy növelik a keménységet, szilárdságot, hogy a lágy, jól alakítható anyagban kiválásokat hoznak utólag létre, amelyek gátolják a diszlokációk mozgását. Ezt nevezik kiválásos keményedésnek (1.26. ábra).

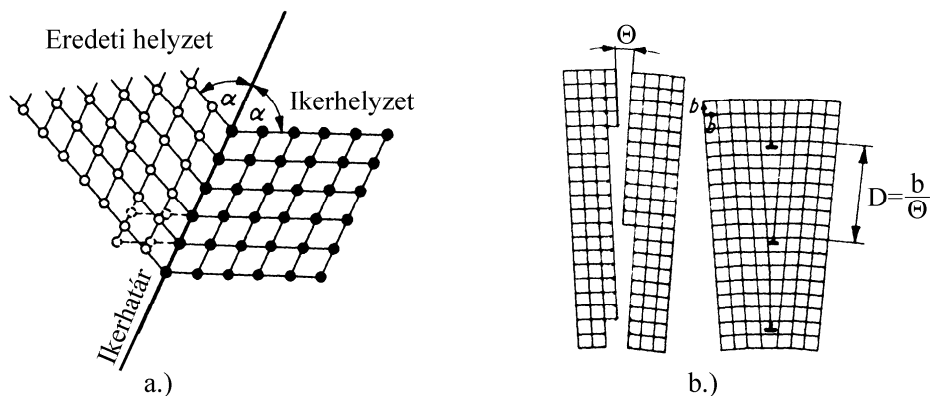


1.26. ábra A kiválások hatása a diszlokációk mozgására

### 1.2.3 Felületszerű rácshibák

A felületszerű vagy más néven két kiterjedésű rácshibáknak két fő csoportja van: a *rétegződési hibák* és a *szemcsehatár menti hibák* (1.27. ábra).

A **rétegződési hibáról** akkor beszélünk, ha egy adott típusú rácstervezetben egy-két atomsornyi más rácstípusnak megfelelő réteg helyezkedik el, pl. lapközepes köbös rendszerben hexagonális szerkezetű réteg. A rétegződési hibának van olyan fajtája is, amikor azonos szerkezetű, de egy elválasztó határ mentén a szerkezet egymásnak tükörképei. Ilyenkor az elválasztó sík atomjai mind a két szomszédos kristallit rácstervezetéhez tartoznak. A kristályhatárt *ikerhatárnak*, az elválasztott kristallitokat **ikerkristálynak** nevezik.



1.27. ábra Felületi rácshibák  
a.) ikerkristályok, b.) kisszögű szemcsehatár.

A felületszerű hibáknak másik csoportja a **szemcsehatár menti** hibák.

A sok pontban meginduló kristályosodás során a kis kristályok, úgynevezett krisztallitok addig növekedhetnek, amíg a szomszédos krisztallitokkal össze nem érnek. A szomszédos krisztallitok rácssíkjainak irányultsága (orientációja) a térben más és más. Így a krisztallitok határán az összenövéseknél rácsrendezetlenség alakul ki. Attól függően, hogy a szomszédos krisztallitok atomsíkjai milyen mértékben térnek el egymástól, milyen szöveget zárnak be egymással, beszélhetünk **kisszögű** és **nagyszögű** szemcsehatárokról.

Ha az orientációkülönbség kisebb  $1^\circ$ -nál a kristálytartományokat **szubszemcséknek**, a határt **szubhatárnak** nevezik. Ezek a kristálynövekedés során, illetve alakítás hatására jöhetnek létre.

A  $30^\circ$ -nál kisebb eltérés esetén **kisszögű** határszerkezetről beszélünk. Az ilyen szemcsehatár diszlokációk sorozatának tekinthető. A diszlokációk  $D$  távolságából (1.27. ábra) és a Burgers-vektorból, vagyis a  $b$  nagyságából (itt  $b \div a$  rácsparaméternek) a határok szögeltérése  $\Theta$  meghatározható:

$$\text{tg } \Theta = \frac{b}{D} = \frac{a}{D}.$$

A  $30^\circ$ -nál nagyobb orientációs szögeltérés esetén **nagyszögű szemcsehatárokról** beszélünk, amelyek felépítése még kevésbé ismert, de tudjuk róla, hogy a határok néhány rácsparaméternyi vastagságú, erősen rendezetlen átmeneti rétegből áll.

### 1.3 Fémek és ötvözetek kristályosodása

Egy általános megfogalmazás szerint az ötvözet egy fémnek, egy vagy több, fémes vagy nemfémes elemmel alkotott (legalább látszatra) homogén rendszere.

Ötvözeteket tehát mindig fémek alkotnak vagy fémekkel, mint például vas (Fe) a krómmal (Cr); réz (Cu) a horgannyal (Zn) stb. vagy metalloid elemekkel, mint a vas a szilíciummal (Si); réz az antimonnal (Sb). Fémek nemfém elemekkel is alkotnak ötvözeteket, például a vas a szénnel (C); kénnel (S); foszforral (P), sőt gázokkal is, például a vas a nitrogénnel (N<sub>2</sub>); réz az oxigénnel (O<sub>2</sub>).

Ha csak két alkotót veszünk is figyelembe, akkor is a két alkotóból, akár végtelen sok különböző összetételű ötvözet hozható létre. Adott két alkotóból létrehozható ötvözetek összességét **ötvözetrendszernek** nevezzük.

Az ötvözetrendszer nemcsak kétalkotós (binér), hanem lehet három (ternér) vagy többalkotós rendszer is.

### 1.3.1 Ötvözetek típusai

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

Ha ezek a fázisok önállóan fordulnak elő, egyfázisú **szövetelemnek** nevezzük őket. Ha két vagy több fázis együtt, egymás mellett van jelen, összetett szövetelemekről beszélünk.

A **szövetelemnek** az ötvözet kristályosodási folyamatának meghatározott szakaszában egy, vagy több fázisból felépülő, azonos tulajdonságú részeit nevezzük.

Attól függően, hogy a fém az ötvözőjével milyen módon képez közös rendszert az ötvözeteknek négy típusát különböztethetjük meg, amelyek lehetnek:

1. *szilárd oldatok* (egyfázisú ötvözet),
2. *fémvegyületek* (egyfázisú ötvözet),
3. *eutektikumok* (többfázisú ötvözet),
4. *eutektoidok* (többfázisú ötvözet).

#### 1.3.1.1 Szilárd oldatok

Az oldat típusú ötvözetek megismeréséhez célszerű előbb megvizsgálni az oldás folyamatának lényegét. Egy oldat mindig *oldó* és *oldott* anyagból áll. Az oldó anyagnak, oldószernak azt az alkotót tekintjük, amelyik mennyisége meghaladja az 50 %-ot. A másik alkotó az oldott anyag. Az oldás, illetve az oldódás fizikai folyamat, *az alkotók fizikai eljárással szétválaszthatók*. A mindennapi életben, ha oldásról beszélünk, általában valamilyen folyadék, például víz old valamilyen szilárd anyagot, sót, cukrot stb. Az oldat ilyenkor folyékony halmazállapotú. Az oldás szilárd állapotban is végbemehet. Ilyenkor **szilárd oldatokról** beszélünk. A kristályos fémek is így képezhetnek oldat típusú ötvözeteket. *Ekkor a fém és az oldott elem atomjai közös kristályrácsban foglalnak helyet, mégpedig az oldó anyag rácsszerkezetének megfelelő rácsszerkezetben.*

Az oldódó anyag atomjai két módon épülhetnek be a fém kristályrácsába:

- a rácsban helyettesítheti a rácsot felépítő fématomokat, helyükre beépülhet,
- elfoglalhatja a rácsban az atomok között lévő üres helyeket.

A helyettesítéses, más néven **szubsztitúciós szilárd oldatok** kialakulása csak bizonyos feltételek teljesülése esetén lehetséges:

1. Az oldott anyag atomjai csak akkor helyettesíthetik a rácsban a fématomot, ha méretük (atómátmérő) 15 %-nál nagyobb mértékben nem tér el a fématom átmérőjétől.
2. Egymáshoz való affinitásuk nem halad meg egy bizonyos határértéket, különben az alkotók vegyületet alkotnak.
3. Az oldó fémnek és az oldott elemnek azonos vegyértékűnek kell lennie.
4. Az oldó fém és az ötvözőelem atomszerkezetének hasonlóknak kell lennie, vagyis a periódusos rendszerben közel kell állniuk egymáshoz.
5. Az oldó fémnek és az oldott anyag rácsszerkezetének azonos típusúnak kell lennie.

Ha a feltételek bármelyike nem teljesül, nem jön létre szubsztitúciós szilárd oldat.

Mivel az oldás során a kristályrács akárhány fématomját lehet helyettesíteni, az oldatban az oldott anyag aránya nem korlátozott, vagyis a szubsztitúciós szilárd oldatokra a **korlátlan oldhatóság** a jellemző.

A gyakorlatban használatos fémek között viszonylag ritka az ilyen oldás, de a réz (Cu) a nikkelt (Ni), az arany (Au) az ezüstöt (Ag), például így oldja.

Ha az oldott anyag atomja elég kicsi ahhoz, hogy elfoglalja a kristályrácsban a fématomok között meglévő üres helyeket, úgynevezett beékelődéses (*intersztíciós*) oldás jön létre. Mivel az üres helyek száma és mérete a rácsban korlátozott, így az intersztíciós szilárd oldatban az **oldódás mértéke is csak korlátozott lehet**. Az üres helyek mérete a hőmérséklet csökkenésével csökken (az atomok hőmozgásának változása következtében), így az oldóképesség is hasonlóképpen csökken. Intersztíciósan oldódik például a vasban (Fe) a szén (C).

Az intersztíciós szilárd oldat kialakulásának feltétele, hogy az oldott anyag atomjának átmérője kellően kicsi legyen. Ez azonban nem jelenti azt, hogy az atomsugár ( $r$ ) mindig kisebb az üres hely sugaránál ( $r_0$ ), így az oldott atom megnöveli a rács méretét, feszültséget idézve elő a beékelődés körzetében. A beékelődés nem minden üres helyen következik be, minden üres helyen nem található beékelődött atom. Ha az atomok eloszlása a rácsban egyenletes, az anyagban kisebb helyi feszültséget idéz elő, mintha rendezetlen, a beékelődések egy-egy helyre koncentrálnak. E fokozott feszültségnövekedés az egyensúlyra törekvés következtében kiegyenlíthető és (néhány rácselemnyi területre kiterjedő) **rövid távú rendezettség** jöhet

létre. A rács **hosszú távú rendezettsége** csak akkor jöhet létre, ha az egyes atomfajták számának aránya egyszerű, egész számokkal kifejezhető. A rendezett rácsú oldatokban az oldott atomok a lehető legtávolabb helyezkednek el egymástól. A beékelődött atomok annál kisebb feszültséget hoznak létre az anyagban, minél távolabb vannak egymástól. Ezeket **szuperrácsoknak** nevezik. A rendezettség nem mindig terjed a kristallit határáig, hanem egy szemcsén belül is különböző rendezettségű tartományok lehetnek. Azokat a tartományokat, amelyeken belül a rendezettség azonos, **domeneknek** nevezik. A szilárd oldat típusú ötvözetek általában **jól alakíthatóak**.

### 1.3.1.2 Fémvegyületek

Vegyületről akkor beszélünk, ha két vagy több elem atomjai kémiai reakció során molekulákká egyesülnek és egy új, az alkotóktól eltérő tulajdonságú anyagot hoznak létre.

*A fémvegyületek tehát két- vagy többalkotós fázist alkotnak, amelynek alkotó elemei közös kristályrácsba rendeződnek. Ez a rácsszerkezet független az alkotók rácsszerkezetétől.*

A fémvegyületek lehetnek:

- ionvegyületek,
- elektronvegyületek,
- intersztíciós vegyületek.

*Ionvegyületet* képezhetnek egymással a nemfémes, a metalloid és az átmeneti elemek az erősen fémes elemekkel. A kristályos fázisban kémiai vegyértéküknek megfelelő arányban egyesülnek. A kémiai vegyületekhez hasonlóan pozitív és negatív ionok alkotják a vegyület rácsát. A vegyületkristályok jellemzői:

- stabilak,
- nehezen olvadnak,
- nagyon kemények.

Köbös rendszerben kristályosodó ionvegyületek, pl. NaCl, MgSe, CaF<sub>2</sub>, MgSi, ZnS, CdS stb.

Hexagonális rendszerben kristályosodik a FeS, FeSn, NiS.

*Az elektronvegyületek* összetételét és egyúttal a rácstípusát nem az alkotóik vegyértéke, hanem a vegyület molekulájában lévő szabad elektronoknak és az atomok számának hányadosa szabja meg. A rácsszerkezet típusokat három csoportba lehet sorolni:

- $\beta$ - fázis,
- $\gamma$ - fázis,
- $\epsilon$ - fázis.

Elektronvegyületet a nehezen olvadó, egy vegyértékű fémek és az átmeneti elemek alkotnak a könnyen olvadó fémekkel. Az elektronvegyületek jellemzői:

- az ionvegyületeknél kevésbé stabilak,
- viszonylag könnyen oldódnak,
- keménységük is kisebb az ionvegyületeknél.

Köbös rácsban kristályosuló elektronvegyület, mint a CuZn, AgCd, Fe<sub>5</sub>Zn<sub>21</sub>, míg a CuZn<sub>3</sub>, Ag<sub>5</sub>Al<sub>3</sub> rácsszerkezete hexagonális.

*Intersztíciós* vegyületeket a nagy atomsugarú fémek képeznek kis atomsugarú nemfémes vagy metalloid elemekkel. A két alkotóelem atomjainak átmérő aránya befolyásolja a molekula képletének alakulását:

- ha a fématom és ötvözőjének átmérő aránya nagyobb 1,7-nél, viszonylag egyszerű képletű molekulák jönnek létre: TiN, Ti<sub>2</sub>C, MoC,
- ennél kisebb arány esetén bonyolultabb képletű intersztíciós vegyületeket kapunk: Fe<sub>3</sub>C, Mn<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> stb.

Az Fe<sub>3</sub>C keménysége közel 15-szöröse a szénvas keménységének, a TiN-é 30-szorosa a titán keménységének.

A vegyülettípusú ötvözetek **ridegek, kemények**, ezért általában **kopásállóak**.

### 1.3.1.3 Eutektikum

Az eutektikumban két- vagy több kristályos fázis helyezkedik el egymás mellett. E többfázisú szövetelem folyékony fázisból jön létre. A kristályos fázisok (színfém, 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 fázisú ötvözet.** Az eutektikum szó **könnyen olvadót** jelent. A szövetelem azért kapta ezt a nevet, mert olvadáspontja a *legalacsonyabb olvadáspontú* alkotóénál is alacsonyabb. További sajátossága az eutektikumnak, hogy bár ötvözet mégis *hőfokon szilárdul* meg. Ezért *kicsi a zsugorodása, vagyis jól önthetőek*.

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.

### 1.3.1.4 Eutektoid

Az eutektoid (eutektikumszerű) az eutektikumhoz hasonlóan összetett szövetelem. Attól azonban alapvetően eltér abban, hogy nem folyékony fázisból keletkezik, 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 lemezesek, illetve szemcsések.

### 1.3.2 Fémek, ötvözetek kristályosodási folyamata

A különböző ötvözeteket legtöbbször olvasztással állítják elő. Az alkotókat folyékony állapotban, egy rendszerben egyesítik, majd a kristályosodási folyamat során az ötvözet megszilárdul.

*Anyagszerkezetben a halmazállapot-változást, az atomok rendezettségének változásaként foghatjuk fel.*

Szilárd anyagban a részecskék rendezettsége hosszú távú. A részecskék mozgása a rácspont körüli rezgőmozgásra korlátozódik, amelynek amplitúdója a részecskék mozgásenergiájától, tehát a hőmérséklettől függ. Vasatomok esetében ez szobahőmérsékleten 4,4% a rácsparaméter nagyságú, az olvadáspont közelében, már a rácsparaméternek a 12 %-a .

A *folyékony* halmazállapot azt jelenti, hogy az anyag részecskéi egymáshoz képest, egymáson elmozdulhatnak, legfeljebb rövid távú, néhány rácsméretnyi területre kiterjedő rendezettség alakulhat ki ideiglenesen.

*Gázokban* semmilyen rendezettség sem alakulhat ki, mivel a részecskék nagy mozgásenergiával rendelkeznek. A részecskék statisztikusan rendezetlenül helyezkednek el.

A *halmazállapot-változás*, mint a megszilárdulás vagy az olvadás a rendezettség mértékének megváltozásaként fogható fel.

Az anyagnak megfigyelés céljából a külvilág ellenőrizhetetlen hatásaitól elkülönített részét *zárt rendszernek* nevezzük. Ilyen lehet például egy tégelyben megolvasztott, adott mennyiségű ötvözet.

Egy zárt rendszeren belül, melegítésre vagy hűtésre (vagy egyéb fizikai, kémiai hatásra) a rendezettség megváltozásával járó átalakulásokat, *fázisátalakulásnak* nevezzük.

A fázisátalakulások során a rendszer *egyensúlyi állapotra* törekszik, ami a rendszer legkisebb energiaállapotát jelenti.

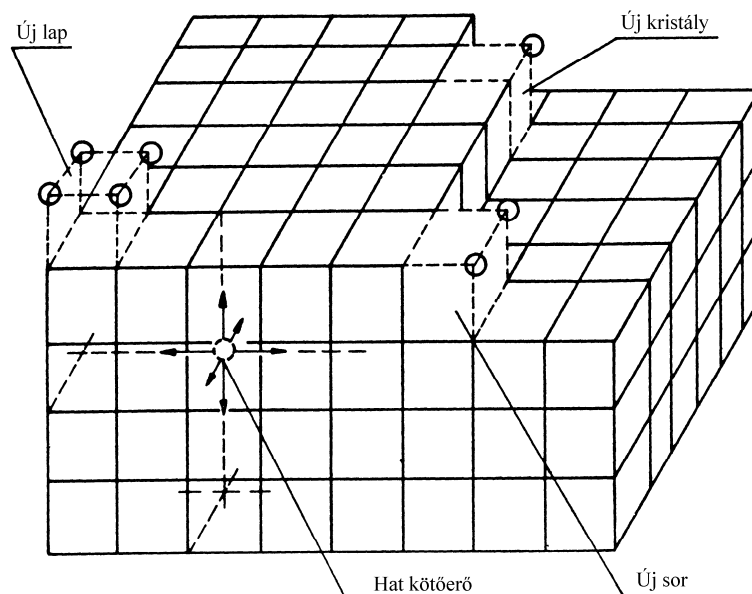
Egy zárt rendszer mindaddig nincs egyensúlyi állapotban, amíg azon belül energiaváltozással járó folyamatok mennek végbe.

#### 1.3.2.1 Ötvözetek megszilárdulása

A gyakorlati fémek, fémötvözetek megszilárdulása során sokkristályos, úgynevezett polikristályos szerkezet alakul ki. Ennek oka, hogy a folyékony fémfördőben nem egy, hanem sok pontban indul meg a kristályosodás. Egyszerre több pontban kerülnek részecskék a hűtés hatására egymáshoz képest olyan relatív helyzetbe, ami megfelel a rácsban elfoglalt helyzetnek. Mivel ez a részecskék legkisebb energiaszintű helyzete, így itt stabilizálódnak és elemi cellák alakulnak ki, majd innen indul ki a kristályosodási folyamat. Ezeket kristályosodási *középpontoknak*, **kristálycsíráknak** nevezzük. Ezek a saját fajtájú csírák. Lehetnek az anyagban idegen kristálymagok is, például ötvözők és szennyezők.

A kristálynövekedésnek érdekes sajátossága, hogy bármekkora nő is a kristály (megfelelő feltételek között) alakja nem változik, megegyezik az elemi cella alakjával. Ennek magyarázatául vizsgáljuk meg a 1.28. ábrán látható rácsszerkezet vázlatát. A rács atomokból, épül fel, amelyek elemi cellákat, az elemi cellák sorokat, a sorok kristálysíkokat képeznek. Addig új sor nem kezdődik, míg a megkezdett be nem fejeződik, és új lap növekedése sem indul meg, míg a megkezdett teljessé nem válik. Ez a jelenség szintén a minimális energiaszintre törekvéssel magyarázható. Láthatjuk, hogy az első elemi cella létrejöttéhez nyolc atomnak kell elfoglalni a legkisebb energiaszintű helyet, a rácspontot. Ahhoz, hogy egy sor kezdjen növekedni az elemi cellából, már elegendő csupán újabb négy-négy atomnak elfoglalni a rácspontoknak megfelelő helyzetet. Az ábrán látható az is, hogy a rács növekedése során egy épülő sorban egy atomnak a rácsba épülésével már egy új cella keletkezik, míg egy új sor megkezdéséhez két atomnak kell beépülnie, egy új lap megkezdéséhez, pedig négy atom szükséges. Ezért a kristály növekedése során addig új sor és új lap növekedése nem kezdődik, míg a megkezdett be nem fejeződik.

Olvadáskor a folyamat ellentétesen megy végbe. Az olvadási folyamat a felületen lévő atomok leválásával megy végbe, hiszen a rájuk ható erő kisebb, mint a kristály belsejében lévő atomokra ható kötőerő. Itt ugyanis minden atomnak egy kockarácspan hat közvetlen szomszédja van ( $N = 6$ ), míg a felületen lévőknek csak három.



1.28. ábra Kristályrács kialakulása

Mivel a kristályosodó rendszerben nagyszámú kristálycsíra alakul ki, amelyek mindegyike növekedésnek indul, ezért ezek számára rendelkezésre álló tér korlátozott. Növekedésük során ezek előbb vagy utóbb elérik egymást. Ekkor növekedésük leáll, mivel a másik rácsba beépült részecskéket már saját

rácsukba nem építhetik be. A kristály növekedése ott fejeződik be, ahol a többi kis kristállyal éppen összenőtt, ezért alakja nem az adott kristályra jellemző, hanem szabálytalan, *annyi síkfelülettel határolt* lesz, ahány szomszédja van. Ezeket a sokszögletű, de belül szabályos szerkezetű kis fémes kristálykákat *krisztallitoknak, kristályszemcséknek* nevezik.

A gyakorlatban használt ötvözetek esetében azért nem szembetűnő azok kristályos szerkezete, mert krisztallitjaik átmérője igen kicsi, általában  $10^{-2} - 10^{-5}$  milliméter nagyságrendű.

### 1.3.2.2 Krisztallitok fejlődése, típusai

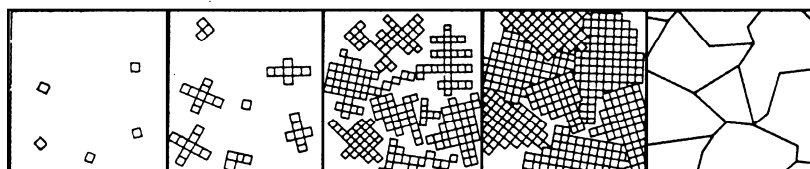
A krisztallitoknak kialakulásuk jellege és ebből kifolyólag alakjuk szerint két típusa van. Ha a krisztallitok növekedésekor nincs kitüntetett irány, vagyis a kis kristályok a tér minden irányában közel azonos módon, egyenlő mértékben növekednek, akkor sok síkkal határolt, úgynevezett **poliéderes** kristályok fejlődnek (1.29. ábra).

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

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



Szferoiditos szövetszerkezet



a.)



b.)

1.29. ábra A krisztallitok kialakulása  
a.) poliéderes b.) dendrites

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

A fémeknek azt a tulajdonságát, hogy az olvadékban vagy más néven *ömladékben* a hűtés hatására kristálycsírák keletkeznek, **kristályosodási képességnek** ( $K_k$ ) nevezzük. A *kristályosodási képességet* a térfogategységnyi ömladékben, egységnyi idő alatt képződő kristálycsírák számával fejezhetjük ki:  $(K_k) \left[ \frac{\text{kristálycsíra}}{\text{cm}^3, \text{min}} \right]$ .

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 (1.30. ábra).*

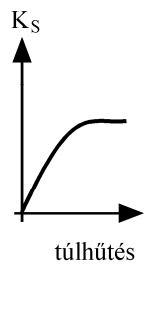
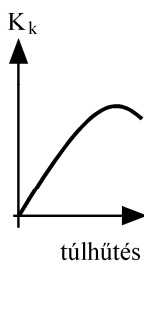
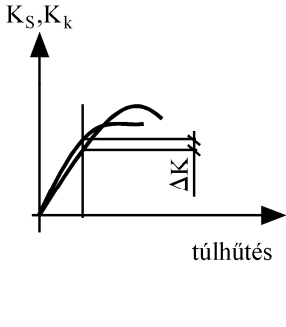
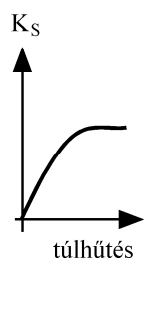
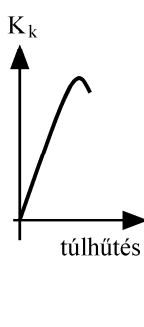
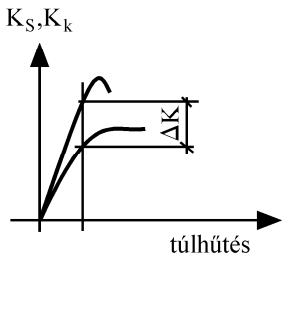
A kristályosodási képesség növekedését nemcsak a túlhűtés mértéke ( $\Delta T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]), hanem a hűtés sebessége ( $V_{\text{hűtés}}$  [ $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ]), is jelentősen befolyásolja. Lassú lehűlés esetén a csíráképződés csak nagyobb mértékű túlhűtés hatására indul meg 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** ( $K_s$ ), ami a kristályok lineáris növekedésének mértékét jelenti időegység alatt ( $K_s$  [ $\text{cm}/\text{min}$ ]). A kristályosodás sebessége a túlhűtés mértékének fokozásával eleinte nő, majd egy maximális értéken állandósul (1.30. ábra). A hűtés sebességének változása ezt a tényezőt nem befolyásolja.

*Azt, hogy a kristályosodás során az ötvözet durva, nagy krisztallitokból fog állni vagy finomszemcsés 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 ömladékben 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.

A hűtés módja	$K_s$ [cm/min]	$K_k$ [1/cm <sup>3</sup> ·min]	$K_s \cdot K_k$	Szemcse- méret
Lassú hűtés				Nagy
Gyors hűtés				Kicsi

1.30. ábra A szemcseméret kialakulását befolyásoló tényezők

Az ömledékben keletkező saját fajtájú kristálycsírák mellé idegen fajtájú csírák is bevihetők, 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.

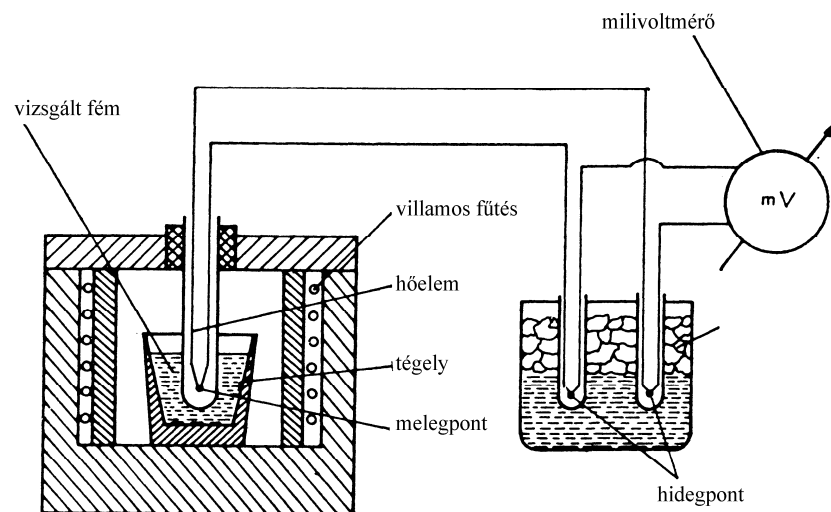
### 1.3.3 Ötvözetek megszilárdulása egyensúlyi viszonyok mellett

Valamilyen rendszer hűlési folyamatát úgy kísérhetjük figyelemmel legegyszerűbben, ha a hőmérsékletének változását ábrázoljuk az elvont hőmennyiség függvényében ( $Q$  [kcal]). A hőmennyiség mérése bonyolultabb feladat. Mivel egyenletes hűtés során, az elvont hőmennyiség arányos a hűtési idővel, ami viszont egyszerűen mérhető, ezért a folyamat vizsgálatához a **hőmérséklet-hűtési idő** függvényt használjuk. A  $T$  [°C] =  $f(t$  [min]) függvényt **hűlési görbének** nevezik. A hűlési folyamat vizsgálatához az 1.31. ábrán bemutatott berendezés alkalmas.

Ha egy adott, folyékony halmazállapotú anyagnak, pl. fémnek vagy ötvözetnek a hűlési folyamatát vizsgáljuk, a kapott hűlési görbe különféle lesz összetételtől függően (1.32. ábra). A hűlési görbéknek négy alaptípusát különböztetjük meg.

Az első típusnál (1.32/a. ábra) a hűlési folyamatot egy logaritmusos 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.



1.31. ábra Berendezés a hűlési görbék felvételéhez

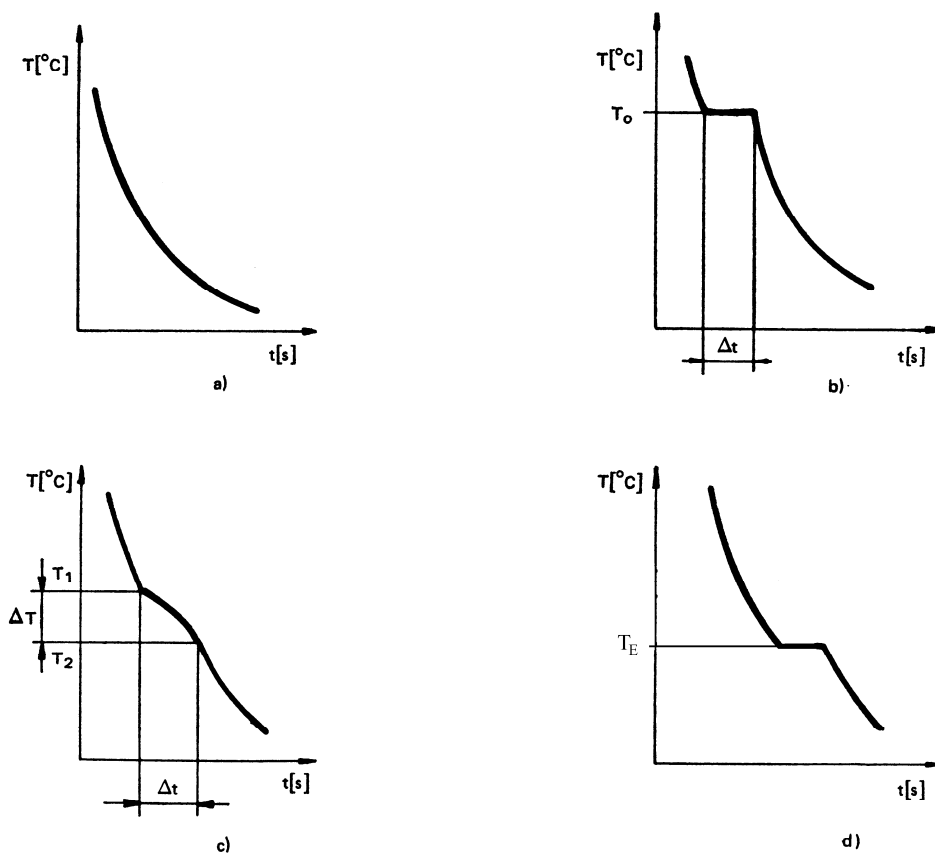
Ilyen függvény írja le azt a folyamatot, amikor egy acél alkatrészt, pl. 200 °C-ról környezeti hőmérsékletre hűtünk. A hűtés kezdetén nagy a hűtőközeg és a hűtendő anyag hőfokkülönbsége ( $\Delta T$ ), ekkor nagyobb a hűtési sebesség (a görbe érintője meredekebb). A hőmérséklet csökkenésével a görbe egyre inkább ellaposodik és tart a hűtőközeg hőmérsékletét jelző vonalhoz. A folyamat során halmazállapot változás, szerkezeti átalakulás nem következett be, a görbe folyamatos.

### 1.3.3.1 Színfémek hűlési görbéi

Ha felrajzoljuk egy színfém hűlési folyamatának görbét, kezdetben az előbbihez hasonlóan alakul, de egy, a fémre jellemző hőfokon törés mutatkozik a görbén (1.32/b. ábra). 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 rendezettségének mértéke megváltozik, például egy tércsoepes 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, illetve 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 úgynevezett **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 be kell fektetni, mint **olvadási hőt**. Ennyi energia szükséges ahhoz, hogy az atomok a rácspontokat elhagyhassák, a kristályszerkezet összeomoljon, vagy átrendeződjön, az anyag megolvadjon. A halmazállapot-változásnak vagy a rács átrendeződésének befejeződésével a görbe lefutása ismét logaritmus jellegű lesz. *Összefoglalva, a színes fémek hőfokon szilárdulnak vagy olvadnak meg, más szóval határozott olvadáspontjuk van.*



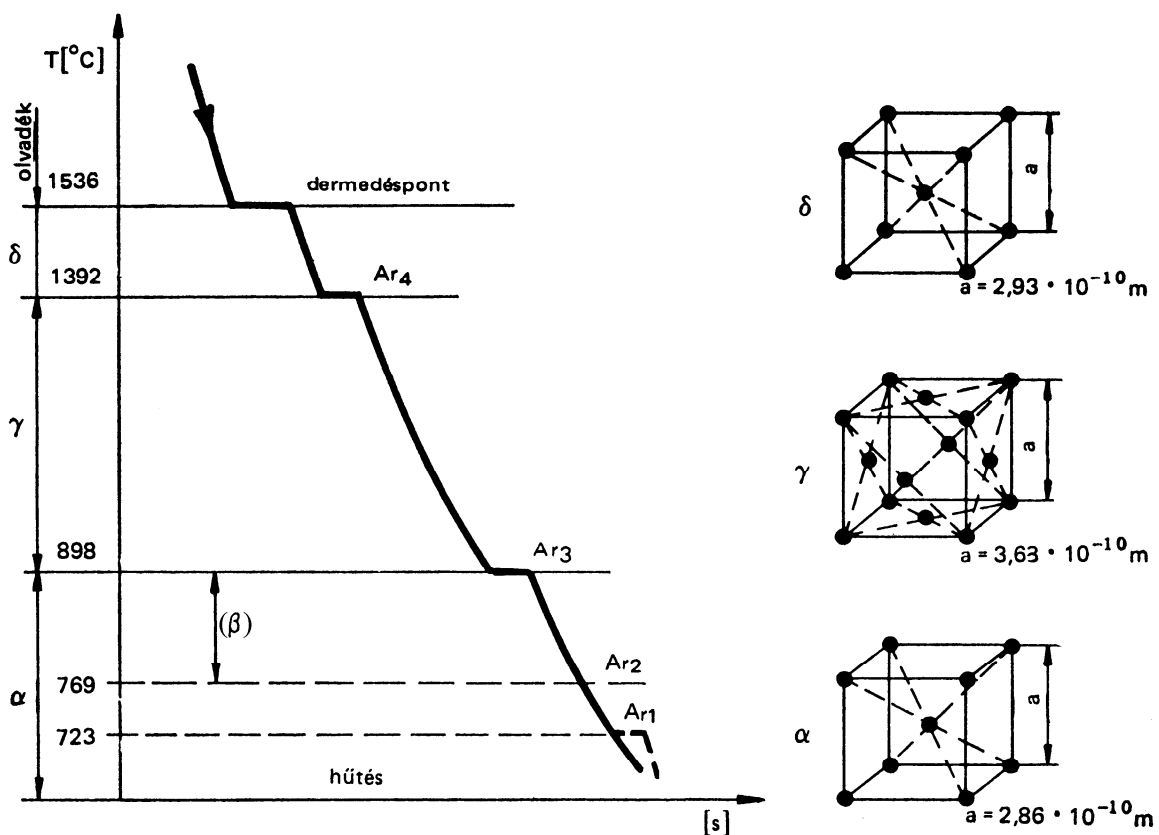
1.32. ábra Hűlési görbék

a.) halmazállapotváltozás-nélküli, b.) színes fém, c.) ötvözet (szilárd oldat) d.) eutektikum (ötvözet)

### 1.3.3.2 A színes hűlési görbéje

Az 1.33. ábra a még ma is legfontosabb fémnek, a vasnak a hűlési görbéjét ábrázolja. A színes hűlési görbéjén nem egy, hanem három törés található. Ez azt jelenti, hogy megszilárdulás után még két allotrop átalakulás is bekövetkezik.

A megszilárdulás hőmérséklete 1536 °C. A színvas hőmérséklete addig nem csökken tovább a hőelvonás ellenére, míg teljes egészében *térközepes köbös* rács formájában ki nem kristályosodik ( $\delta$  rács -  $a = 2,93 \cdot 10^{-10}$  m). Ez az állapot a hűlés során 1392 °C-ig nem változik, csak a fém hőmérséklete csökken. Itt azonban átkristályosodik lapközepes köbös rácsszerkezetű vassá, amelynek rácsmérete nagyobb, mint az előző módosulaté volt ( $\gamma$  rács -  $a = 3,63 \cdot 10^{-10}$  m). 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, amelynek rácsmérete a módosulatok közül a legkisebb ( $\alpha$  rács -  $a = 2,86 \cdot 10^{-10}$  m). 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.



1.33. ábra A színvas hűlési görbéje

Az első 769 °C-nál látható. E hőfok felett a ferromágneses anyagok elvesztik mágnesességüket, illetve mágnesezhetőségüket (paramágnesessé válnak), csak e hőfok alatt mágnesezhetők. A jelenséget Pierre CURIE vizsgálta, ezért a mágnesezhetőség határát jelző, 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  $\beta$  módosulat), allotrop átalakulás. A mágneses változás helyét ezért szaggatott



vonallal jelöljük a hűlési görbén, illetve 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, rendezetlenné válik, tehát nem mágnesezhetők.

A hűlési görbén még egy szaggatott vonallal jelölt törés látható 723 °C-nál. Ennek magyarázata az, hogy korábban kevésbé tudtak nagy tisztaságú vasat előállítani. Mivel a vizsgált „színvas” tartalmazott egy kevés szenet, a vas-szén ötvözetekben pedig 723 °C-nál egy eutektoidos átalakulás megy végbe (már 0,025% széntartalom környékén), itt is feltételeztek egy allotrop átalakulást.

Az allotrop módosulatokat a görög ábécé kisbetűivel jelölték meg, alacsonyabb hőfoktól felfelé. Így az egyes vasmódosulatok jele a következőképp alakult: 723 °C alatt  $\alpha$  vas, (723-898 °C-ig  $\beta$  vas), 898-1392 °C-ig  $\gamma$  vas, 1392-1536 °C-ig  $\delta$  vas.

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

- 898 °C-ig  $\alpha$  vas (tkk),
- 898-1392 °C között  $\gamma$  vas (lkk),
- 1392-1536 °C között  $\delta$  vas (tkk).

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

Ezek alapján az öt átalakulási hőmérséklet a hűtés során:

1. 1536 °C **A<sub>r5</sub>** - a szín vas megszilárdulása,
2. 1392 °C **A<sub>r4</sub>** - a szín vas  $\delta$  -  $\gamma$  átalakulása,
3. 898 °C **A<sub>r3</sub>** - a szín vas  $\gamma$  -  $\alpha$  átalakulása,
4. 769 °C **A<sub>r2</sub>** - a vas elveszti mágnesezhetőségét (nincs rácsszerkezet változás),
5. 723 °C **A<sub>r1</sub>** - eutektoidos átalakulás (csak vas-szén ötvözetben ausztenit-perlit átalakulás).

### 1.3.3.3 Ötvözetek hűlési görbéi

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 a ábrának megfelelően. A megszilárdulás  $T_1$  hőfokon kezdődik és csak  $T_2$  hőfokon fejeződik be (1.32/c.). Tehát az ötvözetnek nincs határozott dermedéspontja.  $T_1T_2$  hőközben a már szilárd és a még folyékony fázis együtt alkotja az ötvözetet. A  $T_2$  hőmérsékleten már elfogy a folyékony fázis, az egész ötvözet homogén fázissá, szilárd oldattá dermed.

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

Az eutektikumnak további sajátossága, hogy olvadáspontja még az ötvözetet alkotó alacsonyabb olvadáspontú elemnél is alacsonyabb (1.32/d. ábra). Például a  $660\text{ }^\circ\text{C}$ -on olvadó alumíniumból és az  $1083\text{ }^\circ\text{C}$ -on olvadó rézből 33% réztartalomnál létrejövő eutektikum olvadáspontja csupán  $547\text{ }^\circ\text{C}$ . A 13,4% ónból (Sn), 50% bizmutból (Bi), 26,6% ólomból (Pb), 10% kadmiumból (Cd) álló többalkotós eutektikum (Wood-fém) pedig már  $60\text{ }^\circ\text{C}$ -on megolvad.

A hűlési görbék ismeretében nyomon lehet követni az egyes fémek, ötvözetek egyensúlyi (egyenletes, lassú hűtésre vonatkozó) kristályosodási folyamatának különböző szakaszait. Az ötvözetrendszer egyensúlyi állapotát, az energiatartalmát meghatározó, úgynevezett **állapot tényezők** szabják meg:

- az ötvözetrendszer alkotóinak száma,
- az átalakulási hőmérséklet,
- a nyomás, amelyen az átalakulás végbemegy.

Az állapot tényezők és a fázisok száma között, egyensúlyi viszonyok mellett, összefüggés áll fenn, amelyet **Gibbs-szabálynak** neveznek. E szabály szerint a **fázisok számának** (F) és a **szabadsági fokok számának** (SZ) összege kettővel több, mint a rendszer alkotóinak száma (K). (a *kettő* a nyomást és a hőmérsékletet, mint független változót jelenti, a rendszer szabadsági foka, pedig azoknak az állapot tényezőknek a számával egyenlő, amelyek szabadon változtathatók, bizonyos határok között anélkül, hogy a rendszer egyensúlya megváltozna.)

Általános képlettel felírva:

$$F + SZ = K + 2.$$

Az általános szabály ötvözetekre alkalmazva úgy módosul, hogy a nyomást, mint független változót el lehet hagyni, mivel kondenzált rendszereknél a nyomásnak alig van hatása az egyensúlyi állapotra.

Tehát a Gibbs-szabály a metallográfiában:

$$F + SZ = K + 1.$$

Egy példa a Gibbs-szabály alkalmazására (1.32/b. ábra) szín fém kristályosodásának különböző fázisaiban:

A hűlés I. szakaszában csak ömledék fázis van ( $F = 1$ ) és színfém esetén a komponensek száma is egy ( $K = 1$ ):

$$F + SZ = K + 1.$$

Behelyettesítve:  $1 + SZ = 1 + 1,$   
 $SZ = 1,$

Vagyis, egy állapot tényező változtatható szabadon, és ez a hőmérséklet. A megszilárdulás hőmérsékletén, a II. szakaszon a fázisok száma kettő, mert szilárd és folyékony fázis együtt van jelen ( $F = 2$ ), a komponensek száma most is egy ( $K = 1$ ):

$$\begin{aligned} F + SZ &= K + 1, \\ 2 + SZ &= 1 + 1, \\ SZ &= 0, \end{aligned}$$

vagyis a szabadságfok zérus, egyik állapot tényező sem változtatható. A  $\Delta t$  átalakulási idő alatt így a hőmérséklet sem változik, állandó.

A mikor a dermedés befejeződött kezdődik a folyamat III. szakasza. Ismét csak egy fázis van ( $F=1$ ) és a komponensek száma továbbra is egy ( $K = 1$ ):

$$\begin{aligned} F + SZ &= K + 1, \\ 1 + SZ &= 1 + 1, \\ SZ &= 1, \end{aligned}$$

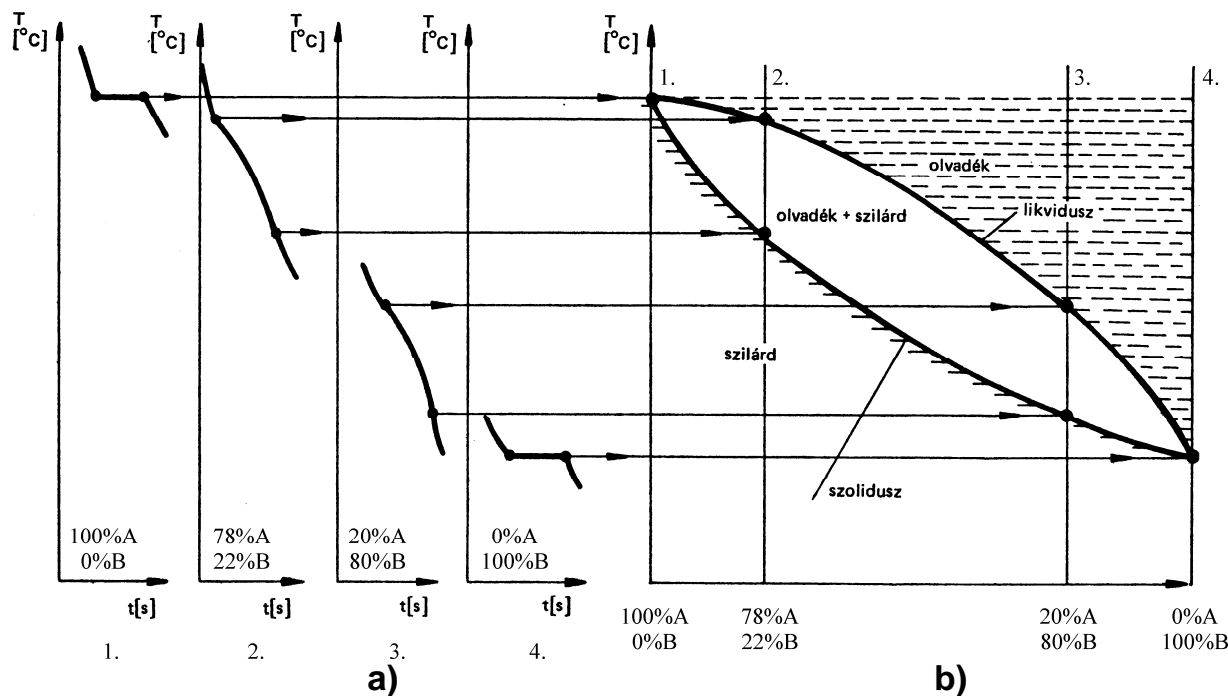
vagyis az egyik állapot tényező (itt a hőmérséklet) ismét szabadon változhat. Hasonló módon alkalmazható Gibbs-fázisszabály ötvözetek esetében is.

#### **1.3.4 A kétalkotós ötvözetrendszerek egyensúlyi diagramjának szerkesztése hűlési görbékből**

A hűlési görbék jól bemutatják egy-egy ötvözet átalakulási folyamatát ömledék állapotól szobahőmérsékletig. Ahány ötvözet, annyi hűlési görbe van. Egy kétalkotós ötvözetrendszer elvileg végtelenül sok ötvözetből áll, hiszen bármilyen összetételi arány elképzelhető. Ezért ugyan ilyen sok hűlési görbét kell megvizsgálni, ha képet akarunk kapni az ötvözetrendszerről.

Ez nagyon bonyolult feladat lenne, ha az egy rendszerhez tartozó valamennyi hűlési görbét nem lehetne egyesíteni egyetlen egyensúlyi diagrammá, az **állapotábrává**.

Egy A-fémből és egy B-ötvözőből álló kétalkotós ötvözetrendszer egyensúlyi diagramját termikus analízissel határozhatjuk meg. Ennek során a két alkotónak, valamint a belőlük készített, különböző összetételű ötvözeteknek felvesszük a hűlési diagramját (1.34. ábra). Ezeket a **hőmérséklet-idő** diagramokat egymás mellé szerkesztjük. Ha ezek folytatásaként egy **hőmérséklet-összetétel** koordinátarendszert rajzolunk fel, akkor ebbe a hűlési diagramokból megszerkeszthetjük az ötvözetrendszer **állapotábráját**.



1.34. ábra Állapotábra szerkesztése hűlési görbékből  
a.) hűlési görbék, b.) állapotábra

Az ordinátatengelyen itt is a hőmérséklet, az abszcisszatengelyen pedig, az összetételt tüntetjük fel súlyszázalékban úgy, hogy például az összetételi tengely kezdeténél legyen az **A**-fém 100 %-a, és a végénél a 100 % B ötvöző tartalom. Így a tengely mentén leolvasható a B-ötvöző mennyiségének növekedése 0-tól 100 %-ig.

Tekintsük át az egyensúlyi diagram szerkesztésének menetét példaképpen négy különböző összetételnél: 100 % A (0 % B); 22 % B; 80 % B; 100 % B tartalomnál (1.34/a. ábra).

A négy hűlési görbe felvétele után a hőmérséklet-összetétel koordináta rendszerbe előbb jelöljük be a vizsgált hat különböző összetételnek megfelelő ötvözetjelző vonal, azaz egy-egy, az összetételi tengelyre merőleges vonal segítségével (ezek egyike maga az A-tengely, egy másik a B-tengely lesz). Mivel minden ilyen, az abszcisszatengelyre merőleges vonal egy-egy ötvözetet jelöl, ezért **ötvözetjelző vonalnak** nevezik. Az ezekre merőleges, ordinátatengelyt metsző vonalak egy-egy hőmérsékletet jelölnek, így ezeket pedig, **hőmérsékletjelző vonalnak** nevezik (mondják *konódának* is).

A szerkesztés következő lépéseként a hűlési görbékről az átalakulást jelző töréspontokat átvetítjük, az abszcisszatengellyel párhuzamosan, a megfelelő ötvözetjelző vonalra (1.34/b. ábra).

Így valamennyi ötvözetjelző vonalon két, az átalakulás kezdetét és végét jelző, átalakulási pont található. Színfémeknél, eutektikumoknál csak egy pont látható, mivel ezek, mint korábban említettük, hőfokon szilárdulnak. Lényegében itt is két pont van, csak ezek egybeesnek.

Valamennyi átalakulási pont megrajzolása után jól látható, hogy a pontok két pontsoron helyezkednek el. Az egyes pontsorokat alkotó pontok azonos

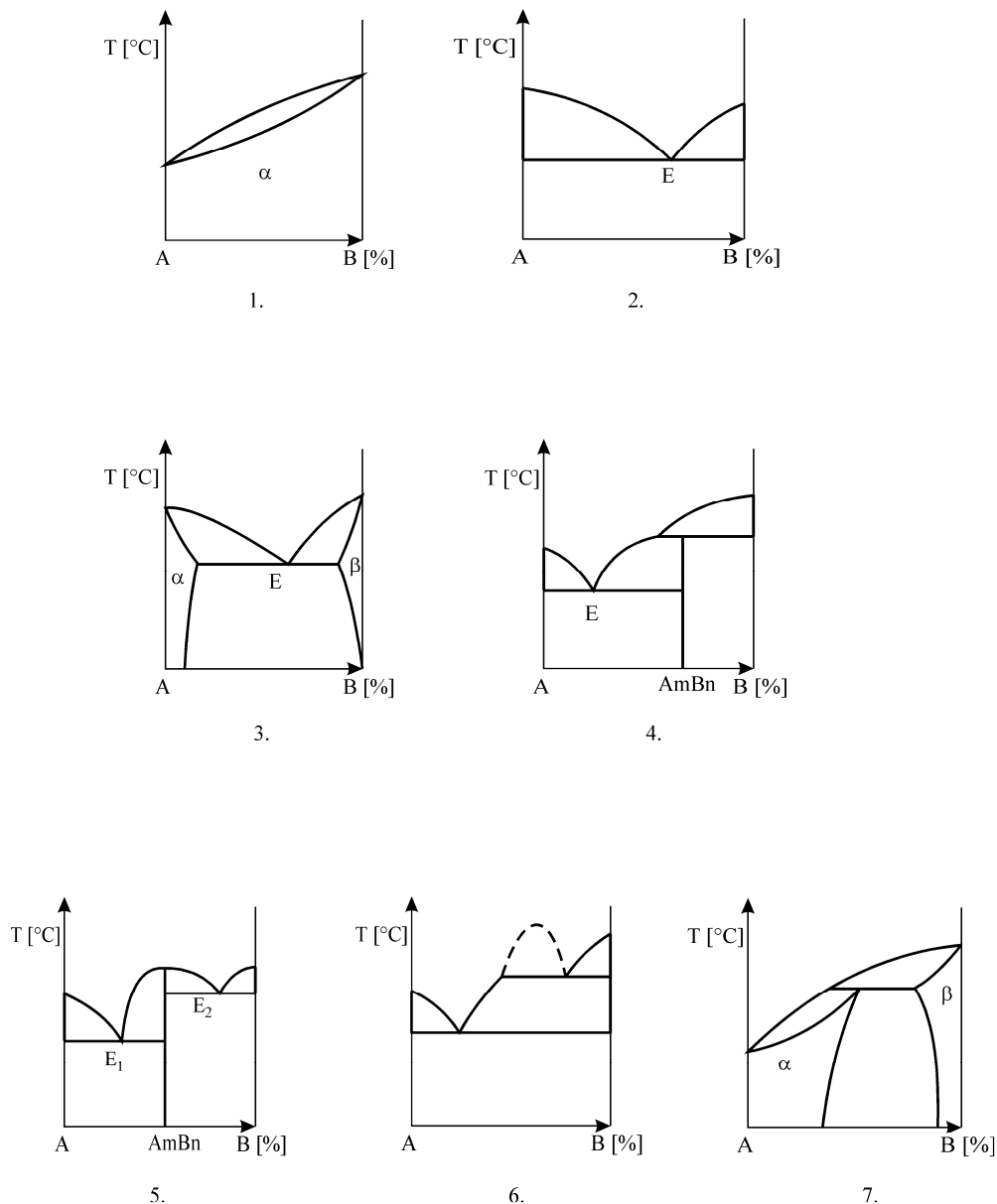
tulajdonságúak, ezért összeköthetők. A felső pontsört azon átalakulási pontok alkotják, amelyeknél megkezdődik az egyes ötvözetek megszilárdulása. E pontok összessége alkotja az ún. **likvidusz görbét**, röviden *likviduszt*.

A másik pontsört azok az átalakulási pontok alkotják, amelyeknél befejeződik az egyes ötvözetek megszilárdulása. A pontokból megrajzolt vonal a **szolidusz görbe** vagy szolidusz.

A két görbe három részre osztja az állapotára területét. A görbék mindig közös pontból indulnak és közös pontban végződnek, vagyis mindig bezárnak egy területet. Erre a területre az jellemző, hogy az ötvözetekben együtt van a már megszilárdult fázis a még meg nem szilárdult, folyékony ötvözetrésszel.

A likvidusz feletti területnek megfelelő hőmérsékleten minden ötvözet még folyékony halmazállapotú, tehát ömledék. A szolidusz alatti területnek megfelelő hőmérsékleten pedig már minden ötvözet szilárd állapotú.

Az állapotábra alakja nemcsak az itt felvázolt lehet. Attól függően, hogy az ötvözet alkotói korlátlanul, korlátozottan, esetleg egyáltalán nem oldják egymást, vagy keletkezik eutektikum, vegyület, az állapotábra alakja mindig más lesz, bár ismétlődő, jellegzetes elemeket fognak tartalmazni. *Tammann* és munkatársai hét alaptípusát határozták meg az egyensúlyi diagramoknak, amelyekből az összes létező kétalkotós ötvözet állapotábrája felépíthető (1.35. ábra). A Tammann-féle alapállapotábra rendszerből a négy legfontosabb alaptípussal foglalkozunk részletesebben az elkövetkezendők során.



1.35. ábra Kétalkotós ideális egyensúlyi diagramok (Thammann-görbék)

Az egyensúlyi diagramok használatának jelentősége abban áll, hogy ha ismerjük az ötvözetrendszer állapotábráját és az állapotára olvasásának szabályait, akkor bármely összetételre, bármely hőfokon megállapíthatjuk az ötvözet halmazállapotát, fázisait, szövetelemeit, azok mennyiségi arányát, százalékos összetételét. Ez az oka annak, hogy szinte minden kétalkotós és több fontos háromalkotós ötvözetrendszer egyensúlyi diagramját már kidolgozták.

### A diagramolvasás szabályai

1. Bármely diagramban egy ötvözetjelző vonal mentén a csökkenő hőmérséklet irányában (lefelé) haladva, elsőként mindig a likvidusz, másodikként a szolidusz vonalat metsszük (de mint később látni fogjuk,

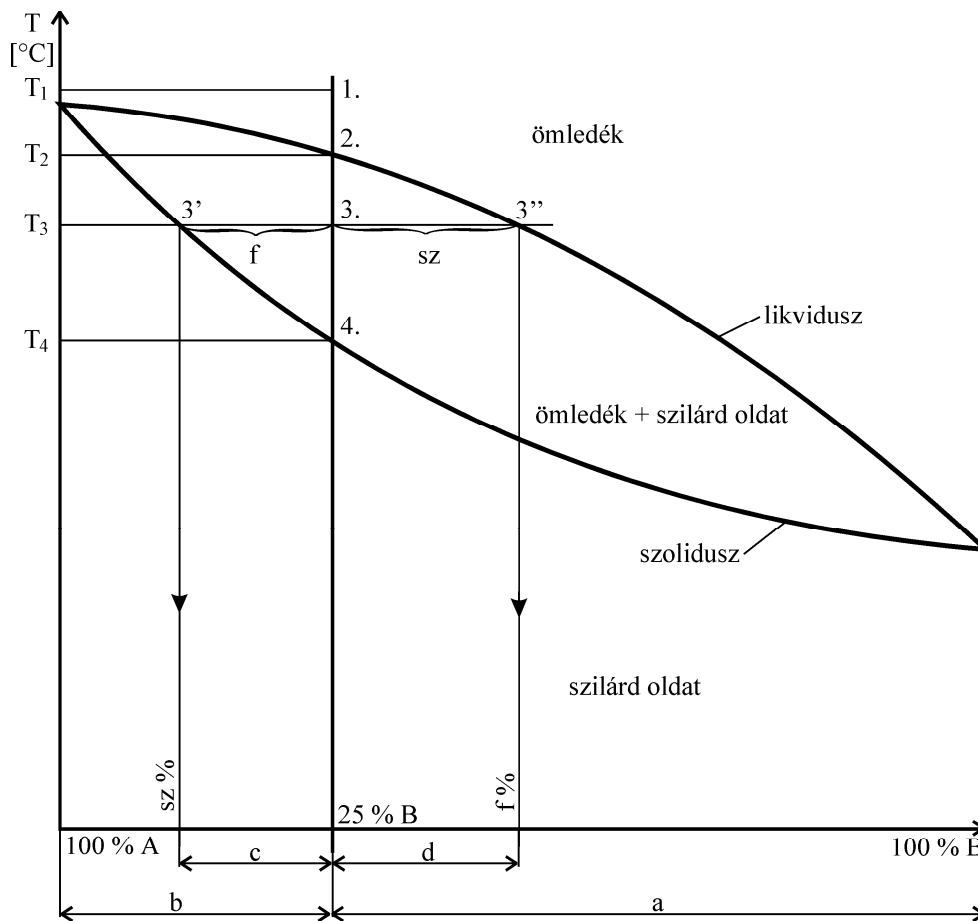
- további vonalakkal is találkozhatunk). Növekvő hőmérséklet irányában (hevítés) haladva utolsó előtti vonal a szolidusz és utolsó a likvidusz.
2. Ahány ágú a likvidusz görbe, annyiféle fázis kristályosodik közvetlenül az ömledékből.
  3. Ha a diagramban balról jobbra vagy jobbról balra haladunk, homogén ötvözetet tartalmazó terület mellett mindig heterogén mezőt és fordítva, heterogén mező mellett homogén mezőt találunk. Hasonló mezők sohasem lehetnek egymás mellett.
  4. A heterogén mezők ötvözete mindig a két szomszédos homogén mező fázisaiból áll.
  5. Homogén mezőben nincs értelme a fázisok arányát vizsgálni, mivel csak egy fázis van.
  6. Ott, ahol a szolidusz görbe vonal, ott az alatta lévő terület homogén, ahol egyenes, ott heterogén.
  7. Az állapotábrában akár a hőfokváltozás, akár az összetétel-változás irányában haladva állapotábra vonalat metszünk, ott mindig fázisváltozás történik a rendszerben. Ez lehet a fázisok számának növekedése vagy akár csökkenése.
  8. Az állapotábrákban a jobbról balra lejtő vonalak, ha vannak, korlátozott oldást jeleznek. Ezek mentén mindig valamilyen kiválás történik.
  9. Az állapotábrában az úgynevezett karokat úgy lehet felvenni, hogy előbb az adott hőmérsékleten kijelöljük az ötvözetjelző vonal és a hőfokjelző vonal metszéspontját. Innen a hőmérsékletjelző vonalon jobbra és balra az első állapotábra vonalig kijelölünk egy-egy szakaszt. Ez a két szakasz a *két kar*.
  10. A hűlés során növekvő kar nagysága a *keletkező fázis* mennyiségével, a csökkenő kar a még visszamaradt fáziséval arányos (ez az ún. *karszabály*).
  11. Az egyik kar végpontjának az abszcisztengelyre vetítésével a másik fázis és fordítva, a másik kar végpontjának az abszcisztengelyre vetítésével az egyik fázis *százalékos összetételét* olvashatjuk le (ez az ún. *fordított karszabály*).

## A diagramolvasási szabályok alkalmazása

A diagramolvasási szabályok segítségével tanulmányozható például a már megismert típusú állapotábra (1.34. ábra).

A  $T_1$  hőmérsékletű, **b**-összetételű ötvözet a likvidusz görbe felett homogén ömledék (1.36. ábra). Ez azt is jelenti, hogy **A** és **B** fém olvadt állapotban korlátlanul oldja egymást. Hűlése során a  $T_2$  hőmérsékleten eléri a likvidusz görbét, vagyis megkezdődik a megszilárdulás, ami szilárd oldatról lévén szó,  $T_2 - T_4$  hőközben megy végbe. Az 6. olvasási szabály szerint a szolidusz alatt homogén szilárd oldat található, mivel a szolidusz vonala görbe. A szolidusz és a likvidusz közötti terület heterogén, mivel a homogén ömledék és a homogén szilárd oldat mező határolja. A  $T_3$  hőmérsékletű ötvözet állapotjelző pontja (3.) heterogén területen található, az ötvözet heterogén. Az alkotó fázisokat úgy vizsgálhatjuk, ha az állapotjelző ponton keresztül felvesszük a  $T_3$  hőmérsékletjelző vonalat és meghatározzuk a két görbe közé eső 33°

szakaszát. Ezt a szakaszt teljes *karnak* szokás nevezni, amit a 3. pont két „részkarra” oszt.

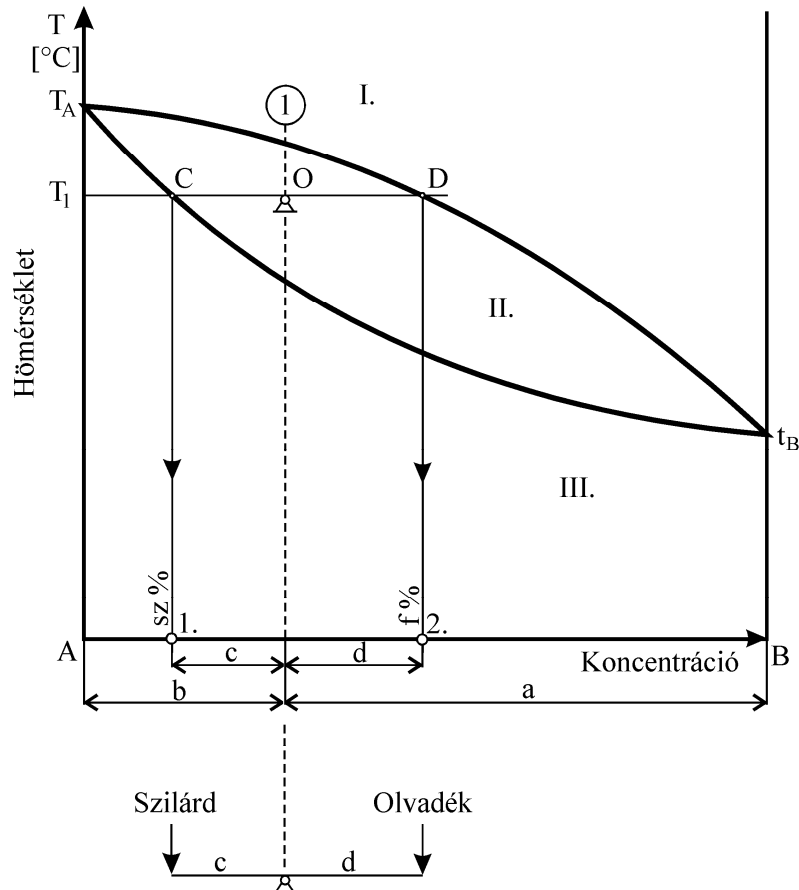


1.36. ábra Két, egymást korlátlanul oldó fém állapotábrája

A teljes kar két végpontjánál az ömledék és a szilárd oldat homogén mezők találhatóak, tehát adott hőfokon az ötvözet valóban heterogén és az említett két fázisból áll. Az állapotábra alapján nemcsak az alkotó fázisokat, hanem ezeknek mennyiségét és összetételüket is megállapíthatjuk.



Az egyes fázisok mennyiségi arányát az **emelő elv** szerint határozhatjuk meg (1.37. ábra). Ha a karokat, mint kétkarú emelőt tekintjük az állapotjelző pontban alátámasztva, és egy-egy fázis tömegét a karok végpontjába sűrítve képzeljük el, akkor az emelő egyensúlyának feltételei alapján, az ábra jelölései szerint, a következő táblázat adatai alapján felírható a szilárd fázis aránya a folyékony fázishoz képest.



1.37. ábra A kétalkotós egyensúlyi diagram olvasása, emelőszabály

1.2. táblázat Az ötvözet alkotóinak mennyisége és összetétele

Az ötvözet és alkotói	Alkotók mennyisége [kg]	B ötvözőtartalom %-ban	B mennyisége [kg]
Kiindulási ötvözet	1	b	$b \cdot 1 \text{ kg}$
Már megszilárdult fázis	x	b-c	$(b-c)x$
Folyékony fázis	1-x	b+d	$(b+d)(1-x)$
$\Sigma$ B ötvöző mennyisége [kg]	$b = (b-c)x + (b+d)(1-x)$		

Vizsgáljuk meg 1 kg tömegű,  $b$  összetételű ötvözet összetevőinek arányát, százalékos összetételét.

Vizsgálva az 1 kg-nyi ötvözet összetételét, az ábrából leolvasható, hogy  $b$  % B-alkotóból és  $a$  % A-alkotóból áll:

- a szilárd fázis B-tartalma 1. pontnak megfelelően –  $(b-c)$  kg,
- az ömledék B-tartalma 2. pontnak megfelelően –  $(b+d)$  kg.

Ha az 1 kg ötvözet  $T_1$  hőfokon  $x$  kg-nyi szilárd részt tartalmaz, akkor az ömledék rész mennyisége –  $(1-x)$  kg.

A B-alkotó mennyiségét kifejezve:

- 1 kg ötvözetben –  $b$  kg,
- a szilárd részben –  $(b-c)x$  kg,
- az ömledékben –  $(b+d)(1-x)$  kg.

Természetesen az összes ötvözetben (1 kg-ban) lévő B-alkotó mennyisége egyenlő a szilárd- és a folyékony fázisban lévő B-alkotó összes mennyiségével:

$$\begin{aligned} b \text{ kg} &= (b-c)x + (b+d)(1-x) \text{ kg}, \\ b &= bx - cx + b + d - bx - dx, \\ d &= cx + dx, \end{aligned}$$

$$x = \frac{d}{c+d} \Rightarrow \text{a szilárd fázis mennyisége [kg].}$$

$$1 - x = 1 - \frac{d}{c+d},$$

$$1 - x = \frac{c}{c+d} \Rightarrow \text{a folyékony fázis mennyisége [kg].}$$

Az összefüggések alapján a szilárd fázis aránya az ömledékhez:

$$\frac{\text{szilárdfázis}}{\text{ömledék}} = \frac{x}{1-x} = \frac{\frac{d}{c+d}}{\frac{c}{c+d}} = \frac{d}{c}.$$

Tehát a két fázis mennyisége arányos a két kar nagyságával, mégpedig értelemszerűen a keletkező fázis mennyisége a hűlés során növekvő kar nagyságával. **Ezt nevezzük karszabálynak.** Ha a 33'' teljes kart 100% anyagmennyiségnek tekintjük (itt 1 kg tömeg), ennek a  $c$  kar mintegy 25%-a, tehát az anyagnak még mintegy 25%-a ömledék, míg 75%-a már megszilárdult ( $d$  kar).

A karok segítségével az egyes fázisok összetételét is meghatározhatjuk. Ha ugyanis a két kar (nem közös) végpontját az összetételi tengelyre (abszcisszatengelyre) levetítjük, a vetítővonal a tengelyen két százalékos összetételt jelöl ki. Ezek felelnek meg az egyes fázisok összetételének. Azt, hogy melyik, melyiknek, azt az ún. **fordított karszabállyal** lehet megállapítani. Ennek lényege, hogy a folyékony fázis összetételét a szilárd kar végpontjának levetítésével, a szilárd fázis összetételét pedig, *fordítva*, a folyékony fázis karja végpontjának levetítésével kapjuk meg. Attól függően, hogy az abszcisszatengelyen milyen módon jelöltük az összetételt, azt kifejezhetjük atomszázalékban, térfogatszázalékban vagy súlyszázalékban. A gyakorlati vizsgálatokhoz általában a **súlyszázalékot** használjuk.

Visszatérve a kijelölt ötvözet átalakulásához, a diagramból kiolvasható, hogy a további hűlés folyamán az ötvözetben a szilárd fázis aránya egyre nő, majd elérve a  $T_4$  hőmérsékletet, vagyis a szoliduszt, a teljes mennyiség megszilárdul homogén szilárd oldat formájában. A megszilárdult ötvözet összetétele természetesen megfelel a kiindulási összetételnek. Mivel a további hűtés során az állapotjelző pont végig homogén mezőbe esik (nem metszünk állapotábra vonalat) nem történik a továbbiakban átalakulás.

### 1.3.5 A kétalkotós ötvözetrendszerek állapotábráinak típusai

Egy ötvözetrendszer állapotábrája többféle típusú lehet. A már bemutatottnak csak akkor felel meg, ha **a két alkotó mind folyékony, mind szilárd állapotban korlátlanul oldja egymást**. Erre csak a szubsztitúciós szilárd oldatok képesek. Ilyet képeznek például a Cu-Ni, Au-Ag, Pd-Ag. (Az állapotábra alatt látható *fázisdiagram* és *szövetelem ábra* ismertetésére a következő állapotábra típusnál kerül sor.)

**A kétalkotós ötvözetrendszerek egy másik alaptípusa, amikor az alkotók folyékony állapotban korlátlanul, de szilárd állapotban egyáltalán nem oldják egymást, egy adott összetételnél pedig eutektikumot képeznek. Ilyen ötvözetrendszert alkot pl. Bi-Cd.**

Egy ilyen állapotábrát a 1.38. ábra mutat be. Az ábrára tekintve látható, hogy alakjára nézve jelentősen eltér a már bemutatottól:

- a likvidusznak két ága van,
- a szolidusznak és a likvidusznak közös pontja van (a kezdő- és végponton kívül),
- a szolidusz egy szakasza egyenes.

Megvizsgálva egy  $b_1$  összetételű ötvözet alakulását ömledék állapottól szobahőmérsékletig, az átalakulások az állapotábrából kiolvashatók az olvasási szabályok ismeretében.  $T_1$  hőmérsékleten az 1. állapotjelző pont a likvidusz felett a homogén ömledék mezőben van. Változás akkor kezdődik, amikor hűlése közben  $T_2$  hőmérsékleten eléri az ötvözet hőmérséklete a likvidusz hőfokát. Itt  $T_2$  hőfokon megkezdődik a kristályosodás, megjelennek a

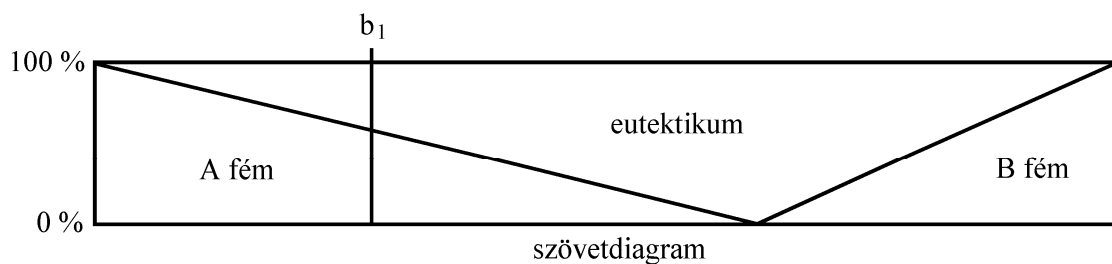
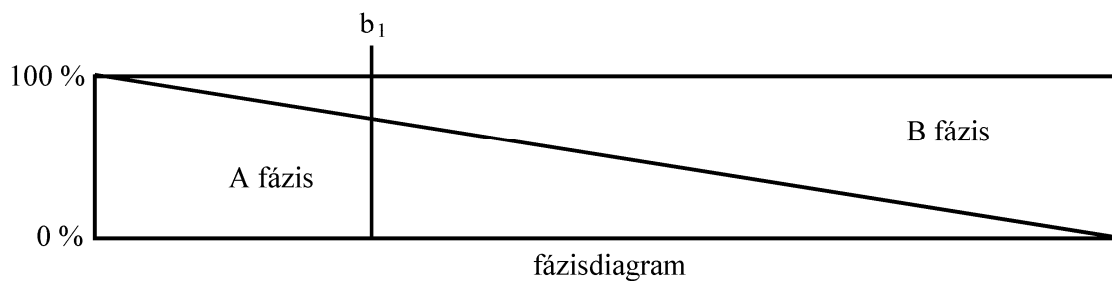
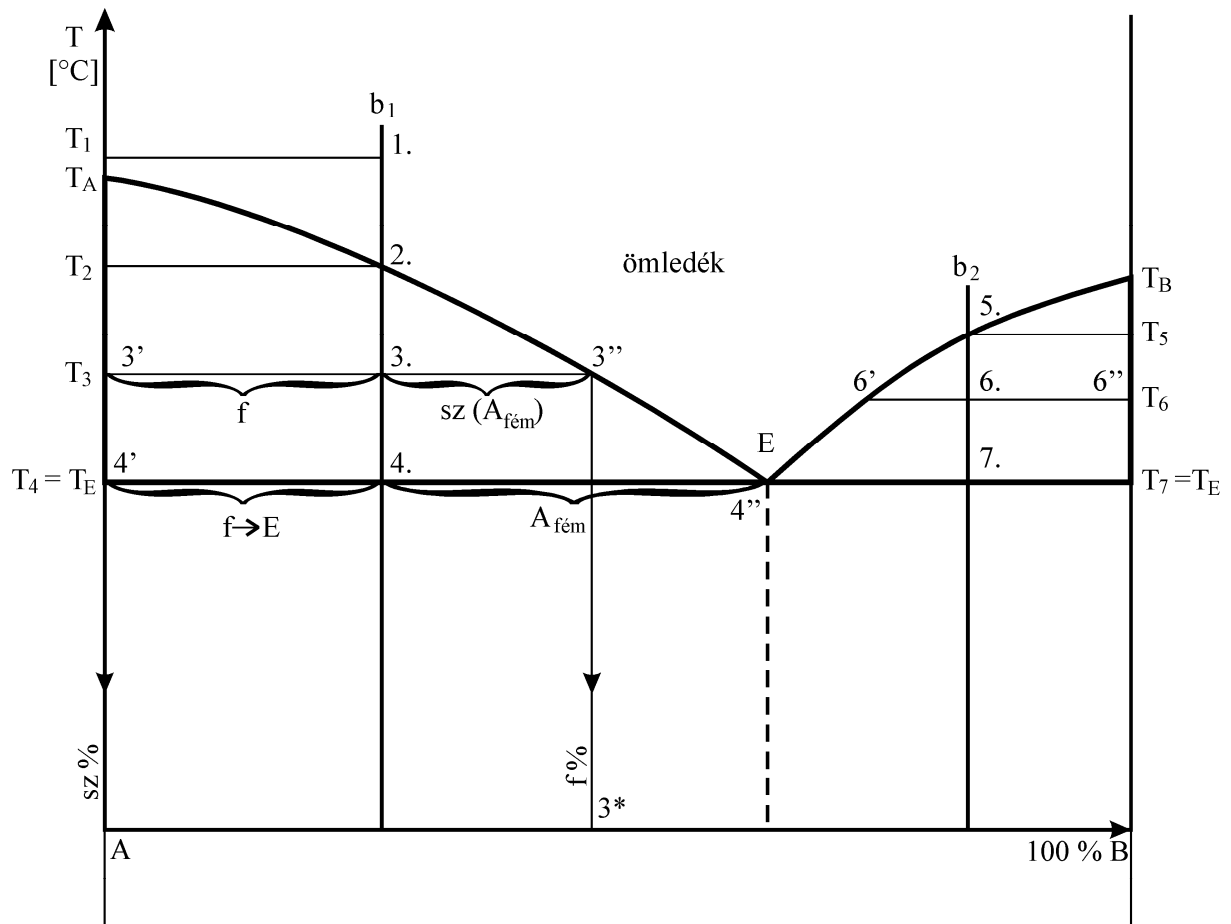
kristályosodási középpontok. További hűtés hatására a még meglévő ömledék mellett, egyre nagyobb hányadban lesz jelen a szilárd fázis. Az ötvözet ebben a mezőben heterogén.  $T_3$  hőmérsékleten a 3-as állapotjelző ponton keresztül berajzolva a hőmérsékletjelző vonalat (konódát), az egész anyagmennyiséggel arányos teljes kar a konóda likvidusz és szolidusz közötti  $3' 3''$  szakasza lesz, amely két szakaszból áll. Ez a két szakasz a két kar. A karok nagysága a folyékony, illetve a szilárd fázis mennyiségével arányos. Mivel a további hűtés során a  $3' 3''$  kar fog növekedni, ez a keletkező szilárd fázis mennyiségével arányos kar. A másik  $3' 3''$  csökkenő kar a folyékony fázis mennyiségével lesz arányos. Még azonban nem határoztuk meg, hogy a kialakuló szilárd fázis anyaga mi. Ha az olvasási szabálynak megfelelően megvizsgáljuk a karok végpontját, illetve azt, hogy a végpontok milyen mezőkkel határosak, megállapíthatjuk, hogy a  $3''$  pont a likviduszon fekszik, így az ömledék mezővel határos. A másik,  $3'$  végpont a szoliduszon helyezkedik el, ez pedig ezen a hőfokon az  $A$  tengellyel esik egybe. Ezért az ötvözet a vizsgált  $T_3$  hőfokon a még megmaradt **ömledékből** és a már megszilárdult **tiszta A fémből** áll (az ábra szerint az arány mintegy 75% és 25%). Az  $A$  fém tehát nem oldja a  $B$  ötvözőt. A fordított karszabályt alkalmazva is azt az eredményt kapjuk, hogy a szilárd fázis összetétele 100%  $A$  fém. Az ömledékben ezért csökken az  $A$ -tartalom, vagyis  $B$ -ben dúsul, összetétele a hűlés során tart az  $E$  pontnak megfelelő összetételhez. Pillanatnyilag  $3^*$ -nak megfelelő összetételű.

Itt jegyezzük meg, hogy a szolidusznak részét képezi az  $A$ -tengely  $T_A T_E$ , valamint a  $B$ -tengely  $T_B T_E$  szakasza is, ne feledjük a szolidusznak és likvidusznak zárnia kell a heterogén átalakulási mezőt.

Ebben az állapotábrában a szolidusz egyenes, így a korábban megismert szabály szerint alatta heterogén mező található. Oda lehűtve az ötvözetet heterogén szerkezetű lesz.

Tovább folytatva a hűtést, egyre nagyobb százalékban szilárdul meg az ötvözet és egyre több  $A$  fém kristályosodik ki belőle. Elérve a szolidusz ( $T_E$ ) hőmérsékletét, még mindig megmarad a  $4' 4''$  karnak megfelelő mennyiségű ömledék, valamint van már a  $4' 4''$  karnak megfelelő mennyiségű  $A$  szilárd színfém.

Az ábra alapján úgy tűnhet, hogy a hűtés során a szilárd fázis karja folyamatosan nő, de az ömledék karja mintha nem csökkenne, állandó lenne. Ez azt jelentené, hogy egyre több  $A$ -fém kikristályosodása ellenére az ömledék mennyisége nem csökken, ami természetesen nem lehetséges. Itt arra kell emlékeztetni, hogy *a karok nagysága nem az alkotók mennyiségét, hanem mennyiségi arányát határozza meg. A növekvő teljes karhoz képest az állandó nagyságú kar **csökkenő arányt jelent.***



1.38. ábra Két, egymást csak folyékony állapotban oldó fém állapotábrája

$T_E$  hőfokon a fordított karszabály szerint az ömledék összetétele éppen elérte az **E** pont összetételét. Az **E** pont az állapotábrának jellegzetes pontja. Az a sajátossága, hogy itt a szolidusznak és a likvidusznak közös pontjuk van, vagyis az ilyen összetételű ötvözet nem hőközben hanem hőfokon szilárdul.

Itt tehát az eutektikum kialakulásáról van szó, mivel az alkotók olvadáspontjánál ( $T_A$  és a  $T_B$ -nél) alacsonyabb  $T_E$  hőfokon szilárdul meg az ötvözet oly módon, hogy a szolidusz hőmérsékletű és  $E\%$  összetételű ömledék addig nem hűl tovább, míg ugyan ilyen hőmérsékletű, de már szilárd eutektikumra nem kristályosodik. Az ötvözet csak az átalakulás után hűl tovább.

Ezzel a homogén  $b_1$  ötvözet szín A-fémből és eutektikumból álló heterogén ötvözeté szilárdult meg. Mennyiségi arányuk az e-karnak és a-karnak megfelelő arányú lesz.

Tovább hűtve az ötvözetet az ötvözetjelző vonal mentén a heterogén szilárd fázis mezőben haladunk tovább. Állapotábra vonalat nem metszünk, így további átalakulásra nem kell számítani. Az egyes alkotók mennyisége és minősége változatlan marad, csak a hőmérséklet csökken.

Mivel az ismert állapotábrában a likvidusznak két ága van, ez a szabályok szerint azt jelenti, hogy az ömledékből minden ágánál más-más fázis kristályosodik ki közvetlenül. Mint láttuk a likvidusz első ága mentén szín A-fém kristályosodott ki.

Ha megvizsgáljuk az átalakulást a likvidusz másik ága mentén is egy  $b_2$  összetételű ötvözet esetében, látni fogjuk, hogy az átalakulás lényegében az előzőekben ismert módon megy végbe, azzal az eltéréssel, hogy a likvidusz elérésekor  $T_5$  hőmérsékleten megkezdődő kristályosodás során nem szín A-fém, hanem B-fém kezd kristályosodni.

Tovább hűtve az ötvözetet, például  $T_6$  hőmérsékleten a karok berajzolása után látható, hogy a karok egyik végpontja az ömledékmezővel, a másik viszont a korábbiaktól eltérően nem az A, hanem a B tengellyel határos, így a szilárdulási folyamat szín B fém kikristályosodásával kezdődik.

A további hűlés során az előbbiekhöz hasonlóan történik az átalakulás. Elérve a szolidusz hőmérsékletét a B-fém kristályosodása következtében az ömledék B-tartalma lecsökken az eutektikus összetételre, így ezen a hőfokon kialakul belőle az eutektikum. Mivel az eutektikum összetétele kötött, a másik alkotó pedig, szín fém, a további hűtés hatására már nem következi be változás. Szobahőmérsékletre hűtve az ötvözet eutektikumból és szín B-fémből fog állni.

Az állapotábra alatt az úgynevezett **fázisdiagramot**, az alatt pedig a **szövetelem ábrát** tüntettük fel. Ezek *környezeti hőmérsékletre* vonatkoznak. Belőlük bármely összetételre megállapítható a fázisok, illetve szövetelemek százalékos aránya.

A *fázisdiagramot* úgy szerkeszthetjük meg, hogy az állapotábra alá, annak teljes hosszában, egy koordináta-rendszert (egy olyan derékszögű négyszöget) rajzolunk, amelyen az ordinátatengely magasságát 100%-nak vesszük. Mivel környezeti hőmérsékleten az összetételi tengely elején 100% A-fémből, a végén 0% A-fémből áll a rendszer, ezeket a pontokat összekötve egy ferde vonalat kapunk, az ábrán látható módon.

A *szövetelem ábrát* hasonló módon rajzolhatjuk fel, azzal a különbséggel, hogy itt a diagram- négyzög hosszú alsó és felső vonalára váltakozva felülre, majd alulra bejelöljük az egyes szövetelemeknek megfelelő pontokat (A; E; B;) és ezeket összekötjük. Az így kapott háromszögek az egyes szövetelemeknek megfelelő mezők.

Ha az állapotábrában vizsgált ötvözetnek az ötvözetjelző vonalát lefelé meghosszabbítva metsszük ezeket a diagramokat, a kapott metszések kijelölik az egyes fázisok, illetve szövetelemek százalékos arányát.

Az előző állapotábra típus esetén ez a két diagram homogén mezőt mutat, hiszen az alkotók korlátlanul oldják egymást, így egy szilárd fázis van és egy szövetelem, a szilárd oldat.

Az ötvözetrendszerek egy harmadik típusát mutatja be a 1.39. ábra. **Ez esetben a két alkotó folyékony állapotban korlátlanul, szilárd állapotban viszont csak korlátozottan oldja egymást, egy adott összetételnél pedig eutektikumot képeznek.** *Ilyen pl. a Cu-Ag, Al-Si, Pb-Sn ötvözetek rendszere.* Az ábrát szemlélve láthatjuk, hogy nagyon hasonlít az előző ábrához, csupán annyi az eltérés hozzá képest, hogy megjelent egy  $K'A'$ , illetve  $K'B'$  vonal. Felettük a szolidusz görbe, tehát itt homogén szilárd oldat mező található ( $\alpha$  szilárd oldat, illetve  $\beta$  szilárd oldat).

Mint az olvasási szabályok ismertetésénél láttuk, az állapotábrában minden jobbról balra lejtő vonal **korlátozott oldást** jelöl. (A  $K'B'$  vonal is korlátozott oldhatósági vonal, bár ezen az ábrán ellentétes irányú. Ennek az oka, hogy az összetételi tengely felén túl már nem az A alkotó, hanem a B van 50%-nál nagyobb arányban jelen, mégis AB ötvözetként ábrázoltuk BA ötvözet helyett, ami az előbbinek tükörképe.)

Ennél az ötvözetrendszerénél is a likvídusznak két ága van, így az ömledékből közvetlenül két különböző fázis kristályosodik ki: egyik az eutektikus összetételnél kisebb (*hipoeutektikus*), a másik az eutektikus összetételnél nagyobb B tartalomnál (*hipereutektikus*). Ezért meg kell vizsgálni egy  $b_1$  és egy  $b_2$  összetételt, sőt egy  $b_3$  összetétel vizsgálata is fontos információkat nyújt az ötvözetrendszeréről.

A  $b_1$  ötvözet az 1. állapotjelző pont hőmérsékletén még homogén az ömledék. Ha a hűtés során az ötvözetjelző vonal mentén elérjük a likvídusz görbét, a  $T_2$  hőmérsékletnél megkezdődik a kristályosodás, majd tovább hűtve az ötvözetnek egyre nagyobb hányada lesz a szilárd fázis.

$T_3$  hőmérsékleten felrajzolva a karokat, megállapíthatjuk a folyékony és szilárd fázis mennyiségi arányát. Azt, hogy mi a keletkezett szilárd fázis, megállapíthatjuk, ha megvizsgáljuk, hogy a karok végpontja milyen állapotábra-mezőkkel határos. Az ábra szerint a karok végpontjai az *ömledék*-, illetve az  *$\alpha$  szilárd oldat* mezővel határosak, tehát ez a két fázis tart egyensúlyt ezen a hőfokon. Az  **$\alpha$  szilárd oldat** főleg A alkotóból álló homogén fázis.

A karok 3' végpontja ezzel a szilárd oldat mezővel határos, míg a másik az ömledék mezővel. Ez a két fázis tart egyensúlyt egymással a karok arányában. A hűlés során növekvő 3 3'' kar a növekvő szilárd fázis

mennyiségével arányos. A fázisok összetételét a már ismert módon a fordított karszabállyal állapítjuk meg (f %; sz %).

Az  $\alpha$  szilárd oldat kiválása egészen a szolidusig,  $T_E$  hőmérsékletig tart, aminek hatására az ömledék összetétele megközelíti, majd eléri az eutektikus összetételt. A  $T_4$  hőmérsékleten tehát az ötvözet a  $K'$  pont összetételének megfelelő és a 4 E karnak megfelelő mennyiségű  $\alpha$  szilárd oldatból és E pont összetételének megfelelő és a  $K'4$  karnak megfelelő mennyiségű ömledékből áll.

Mivel az ömledék éppen eutektikus összetételű és szolidusz hőmérsékletű, ezért addig nem hűl tovább, amíg eutektikumká nem szilárdul.

Így a korábban homogén ömledék két különböző ötvözetté szilárdult meg:  $E$  összetételű **eutektikumká** és  $K'$  összetételű **szilárd oldattá**.

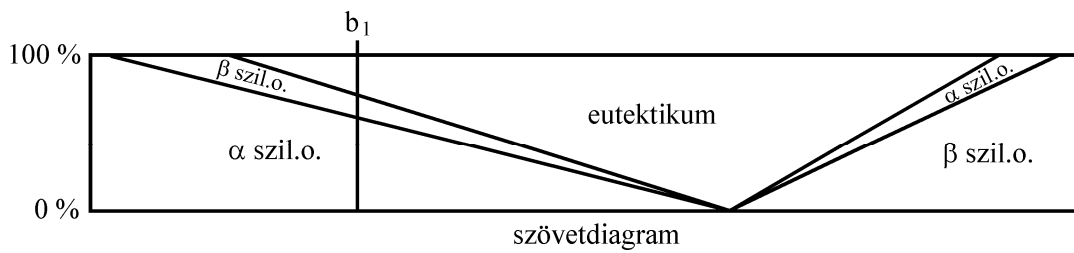
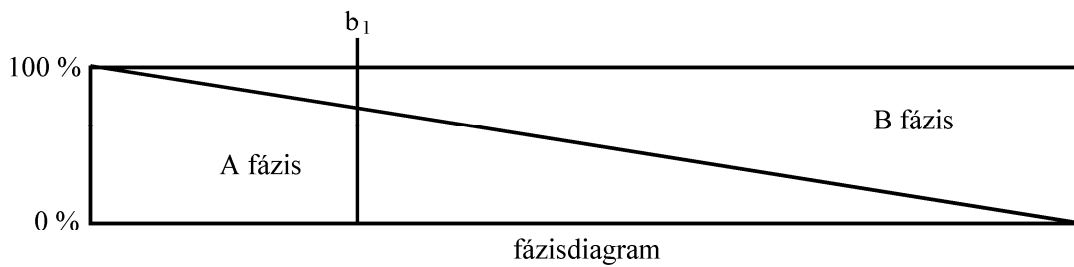
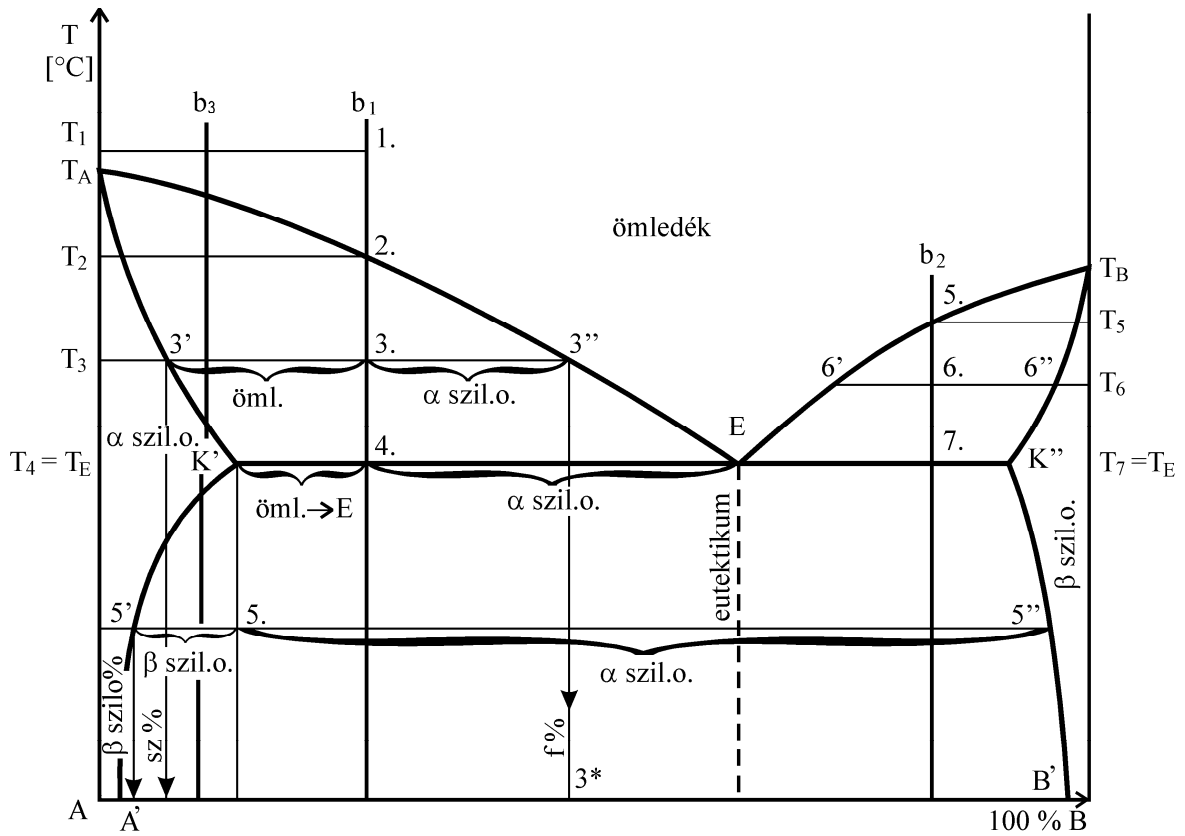
Az eredeti ötvözetjelző vonal csak a két új fázis együttes, átlagos összetételét jelöli, de már a szilárd oldat további alakulását a  $K'$  ponton át felvett, az eutektikumot az E ponton át felvett ötvözetjelző vonal mentén kell vizsgálni.

További hűtés során lényegében az eutektikum nem fog átalakulni, változni, hiszen összetétele kötött. Ötvözetjelző vonala nem metsz állapotábra vonalat.

Más a helyzet az  $\alpha$  szilárd oldat esetében. Mivel interszticiós szilárd oldatról van szó, annak oldóképessége korlátozott, függ a hőmérséklettől. Vegyük fel az ötvözetjelző vonalat a  $K'$  pont összetételének megfelelően.  $K'$  pont a  $T_A K' A' A$   $\alpha$  szilárd oldat mezőnek az összetételi tengely irányában legtávolabbi kinyúló pontja, ami azt jelenti, hogy ezen a hőfokon a legnagyobb a szilárd oldat oldóképessége. Ezen a hőmérsékleten az oldat éppen telített. Ebből az következik, hogy a további hűtés során egyre kevesebb  $B$  ötvözőt tud oldatban tartani, túltelítetté válik. Megindul egy kiválási folyamat, úgynevezett **szegregáció**, melynek révén csökken az  $\alpha$  szilárd oldat  $B$ -tartalma, a homogén fázis heterogénné válik. A szegregációval számos gyakorlati ötvözetrendszer állapotábrájában találkozunk. Jelentőségét később a hőkezelési fejezetben még látni fogjuk.

$T_5$  hőfokon a karokat úgy kell megrajzolni, hogy az 5. ponttól jobbra és balra elmegyünk az első állapotábra vonalig ( $5'$  és  $5''$  pontok) a hőfokjelző vonal mentén.  $5'$  5 kar a hűlés során növekszik, tehát ez lesz arányos a korlátozott oldás során kiváló anyaggal, az  $5''$  csökkenő kar pedig az  $\alpha$  szilárd oldattal arányos kar lesz. Ha az ábrát szemléljük, illetve a fordított karszabállyal megvizsgáljuk a fázisok összetételét, a karok végét levetítve leolvashatjuk, hogy itt a korlátozott oldás következtében nem a szin B fém, hanem egy  $B$ -fémbe dús ötvözet,  $\beta$  szilárd oldat keletkezett ( $5''$ ) és ez a folyamat szobahőmérsékletig is tart. Lehűtve a vizsgált  $b_1$  ötvözetet, végső soron eutektikumból,  $\alpha$  szilárd oldatból és az abból a B-fém atomjainak kiválásával keletkezett  $\beta$  szilárd oldatból áll.





1.39. ábra Két, egymást szilárd állapotban csak korlátozottan oldó fém állapotábrája

Egy  $b_2$  ötvözet átalakulása a hűlés során lényegében hasonlóképpen megy végbe, mint a bemutatott  $b_1$  ötvözet esetében. Az eltérés annyi, hogy ebben a B ötvöző van túlsúlyban és az A ötvöző oldódik benne. A  $b_2$  ötvözet

szobahőmérsékleten eutektikumból,  $\beta$  szilárd oldatból és az abból az A-alkotó atomjainak kiválásával keletkezett  $\alpha$  szilárd oldatból fog áll.

A  $b_3$  ötvözet típusra a kis B ötvözet tartalom a jellemző. A megszilárdulás során a folyamat teljesen megfelel a korábbiaknak. A különbség az, hogy az ötvözetjelző vonal a szoliduszt nem az egyenes, hanem a görbe szakaszán metszi, így teljes egészében  $\alpha$  szilárd oldattá szilárdul. Eutektikum képződéséhez nem tartalmaz az ötvözet elegendő B ötvözet. A keletkezett  $\alpha$  szilárd oldat a hűtés során majd csak K'A' korlátolt oldhatósági vonal elérésekor válik telítetté, majd túltelítetté és az előbbiekhöz hasonlóan itt is  $\beta$  szilárd oldat keletkezik a B-alkotó atomjainak kiválása miatt. A  $b_3$  ötvözet szobahőmérsékleten  $\alpha$  szilárd oldatból és  $\beta$  szilárd oldatból áll.

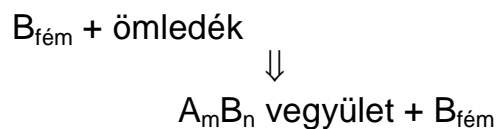
Egy negyedik alaptípusát az ötvözetrendszereknek a 1.40. ábra mutatja be. Itt a **két alkotó folyékony állapotban korlátlanul, szilárd állapotban egyáltalán nem oldja egymást, egy adott összetételnél eutektikumot, egy másiknál vegyületet képez.**

Ilyen rendszerben azok az ötvözetek kristályosodnak, melyekben az alkotók olvadáspontja között nagy az eltérés.

Az ábra különböző területei jórészt már nem ismeretlenek. Új elem csupán az  $A_mB_n$  állapotára vonatkozó vonal, amely az összetételi tengelyre merőleges. Mint látható, hőmérséklettől függetlenül összetétele állandó, nem eutektikus pontnál keletkezik, ami egy  $A_mB_n$  összetételű vegyület keletkezésére utal. Az ötvözetrendszer további sajátossága, hogy a likvidusznak három ága van.

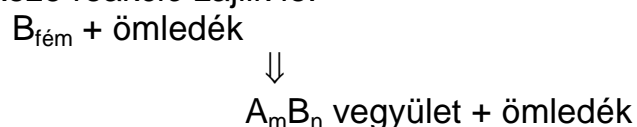
A már ismerős részletek tárgyalását mellőzve célszerű egy CC'' pontok között felvett  $b_1$  és a C'C pontok között felvett  $b_2$  ötvözetet vizsgálni.

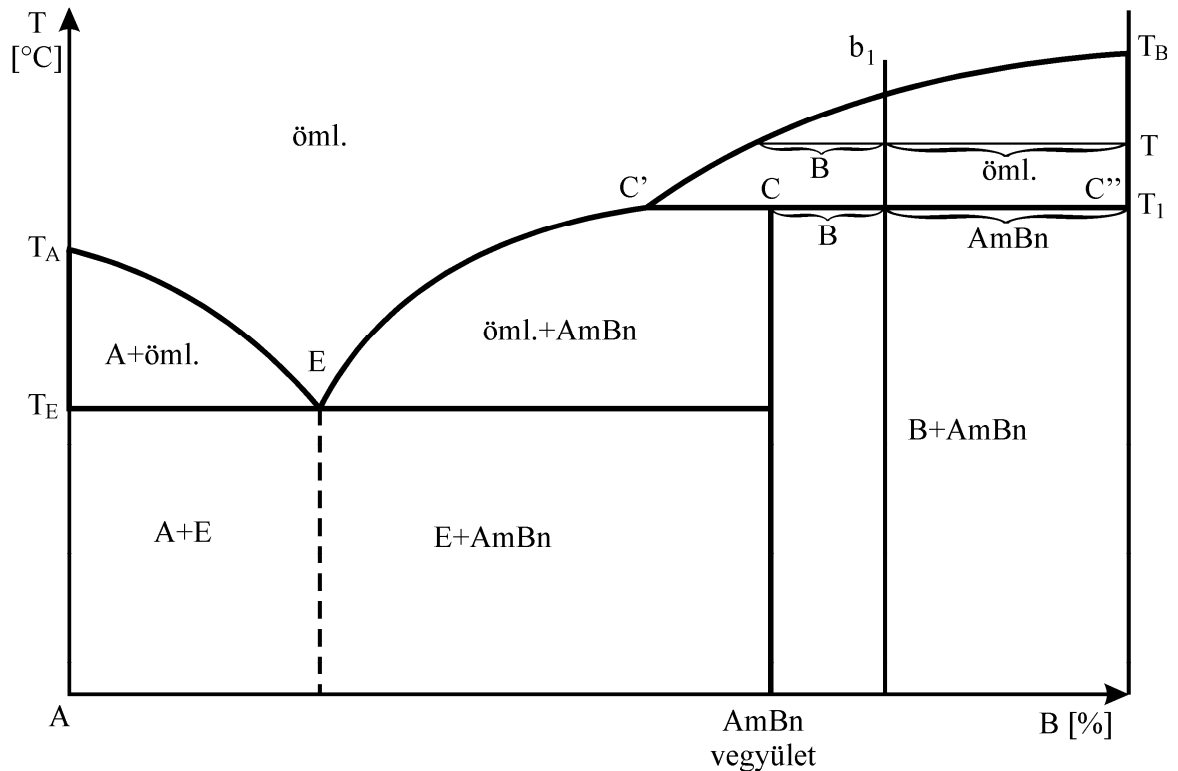
A  $b_1$  ötvözetből az állapotábrába rajzolt karok szerint B-fém kiválásával kezdődik a megszilárdulás. C'T<sub>B</sub> vonal hőmérsékletén az eddig kivált B-fém lesz, valamint a megmaradt ömledékben T<sub>1</sub> hőfokon a következő reakció játszódik le:



Mint látható a reakció után az ötvözetrendszerben már folyékony fázis nincs, az ábra CT<sub>1</sub> szakasza része a szolidusznak. A  $b_2$  ötvözet szobahőmérsékleten tehát  $A_mB_n$  vegyületből és B- színeféméből áll.

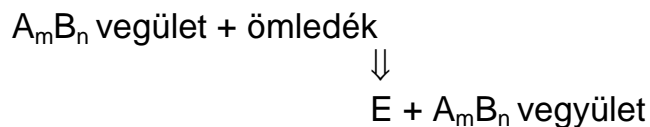
A  $b_2$  ötvözet a kristályosodás megindulása után (pl. T hőfokon) az 1.41. ábra szerint, hasonlóan az előbbi esethez, primer B-fémből és ömledékből áll. T<sub>1</sub> hőmérsékleten viszont a következő reakció zajlik le:





1.40. ábra Két, egymást szilárd állapotban nem oldó fém állapotábrája (a két fém egy-egy adott összetételnél eutektikumot, illetve vegyületet képez)

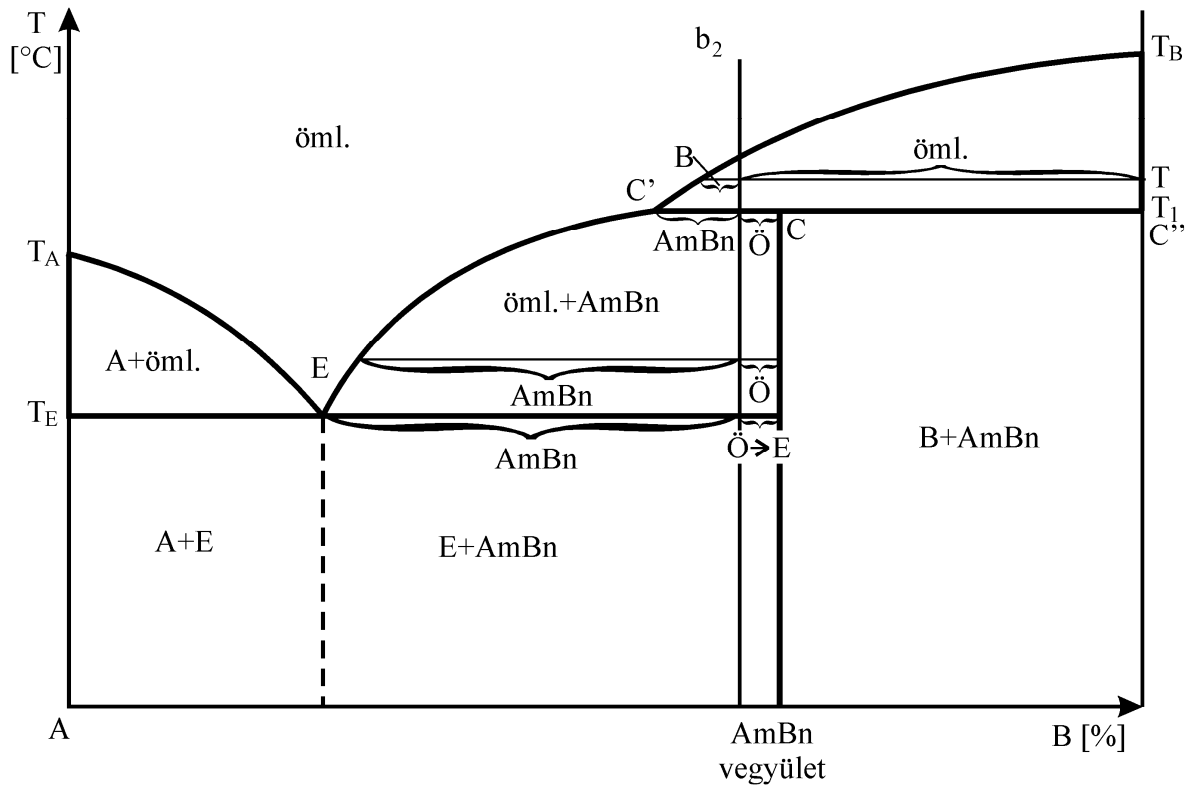
Mint látható, a reakció végén még nem a teljes anyagmennyiség szilárd, tovább folytatódik a megszilárdulás  $A_mB_n$  kristályoknak közvetlenül az ömledékből való képződésével. Ez a  $T_E$  hőmérsékletig folytatódik, ahol a megmaradt öledék eutektikumává alakul.



A  $b_1$  ötvözet szobahőmérsékleten tehát E-eutektikumból és  $A_mB_n$  vegyületből áll.

További hűtés során újabb változás nem következik be, mivel hűtés hatására sem az eutektikum, sem a vegyület nem bomlik, összetételük kötött.

Ebben az ötvözetrendszerben a vegyület **peritektikus** folyamatként jön létre a kristályos fázisnak ömledékkal való reakciója során. Ez főleg elektronvegyületekre jellemző. A priméren kristályosodott B-fém kristályok reagálnak az ömledékkal úgy, hogy krisztallitjai felületén át A-atomok diffundálnak annak belseje felé, és annak felületi rétegében létrehozzák a vegyületet. A felületen át folyó reakció miatt nevezik a folyamatot *peritektikusnak*



1.41. ábra Két egymást szilárd állapotban nem oldó fém állapotábrája (a két fém egy-egy adott összetételnél eutektikumot, illetve vegyületet képez)

A későbbiekben ismertetésre kerülő vas-szén állapotábrában a  $\delta$  szilárd oldat és ömledék átalakulása  $\gamma$  szilárd oldattá, szintén ilyen folyamat.

A kristályos és folyékony fázis reakciójaként keletkező vegyületkristályok a B-fém kristályokat veszik körül a folyamat során.

Szilárd oldat is keletkezhet peritektikus módon. Ilyen állapotábrával, mint a vas - szén állapotábra egyik elemével találkozhatunk.

#### 1.4. Vas - szén ötvözetek egyensúlyi diagramja

Bár napjainkban egyre szélesedik azon fémes és nemfémes szerkezeti anyagoknak a köre, amelyeket a műszaki gyakorlatban felhasználunk, mégis ma még a legnagyobb mennyiségben felhasznált fémes anyag a vas, pontosabban fogalmazva a belőle előállított ötvözetek egész sora. Ennek oka egyrészt, hogy felhasználása már több mint ezer éves múltra tekint vissza és ez alatt az ember komoly tapasztalatokra tett szert előállításával, alakításával, felhasználásával kapcsolatosan, másrészt meglehetősen elterjedt, viszonylag nem drága fém. Szintén fontos, hogy a vasból előállított ötvözetek mechanikai-szilárdsági tulajdonságai kiválóan megfelelnek a széleskörű felhasználás követelményeinek.

Magát a szénvasat (ferrum - Fe) csak kémiai úton lehet előállítani, de tulajdonságai nem indokolják felhasználását, mivel ötvözetlen állapotban lágy, kisszilárdságú fém. Néhány jellemző tulajdonságát a 1.3. táblázat foglalja össze.

1.3. táblázat A szén vas néhány jellemző tulajdonsága

Anyagjellemzők fajtái	Anyagjellemzők jele, mértékegysége	Anyagjellemzők értéke
A vas atomsúlya	-	56
Rácsparaméter	a [10 <sup>-10</sup> m]	a <sub>α</sub> = 2,86; a <sub>γ</sub> = 3,68; a <sub>δ</sub> = 2,93;
Sűrűsége	ρ [10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> ]	7,85
Keménysége	HBS -	55
Szakítószilárdság	R <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	250
Folyáshatár	R <sub>eH</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	110
Nyúlás	A <sub>5</sub> [%]	60
Keresztmetszet-csökkenés	Z [%]	80
Fajlagos ütőmunka	KCV [J/cm <sup>2</sup> ]	30
Elektromos vezetőképesség	γ [m/Ωmm <sup>2</sup> ]	10

A vas előállítása a gyakorlatban, oxidos érceiből szénrel való redukció révén történik. Mivel a **szénatom** (C- karbon) mérete a vashoz képest kicsi (atomsúlya 12), be tud ékelődni az üres helyekre a vas különböző módosulataiba (atomsúlya 56), így **intersztíciósan jól oldódik** benne. Az így kialakuló vas - szén ötvözetnek kedvezőbbek a szilárdsági tulajdonságai, mint a szénvasé. Ezért nem is törekszünk a szén vas előállítására. A vas - szén ötvözetrendszernek az egyensúlyi diagramja az előző fejezetben ismertetett módon megszerkeszthető. Belőle, egy konkrét összetételű ötvözetre vonatkozóan, számos alapvető információt nyerhetünk. Így például megállapítható, hogy milyen hőfokon kezdődik, és hány fokon fejeződik be a kristályosodás. Milyen szövetelemek alkotják az ötvözetet és milyen ezek aránya, összetétele stb. Ha az lenne a kérdés, hogy például egy 0,4% széntartalmú ötvözetet alkotó kristallitoknak, mennyi a széntartalma, a kristályosodási folyamatra vonatkozó ismeretek nélkül jogosan gondolhatnánk, hogy minden kialakuló kristályszemcse széntartalma szintén 0,4% lesz, hiszen egy gyakorlati ötvözet látszólag homogén szerkezetű. A valóságban azonban az ötvözet, mint később látni fogjuk, különböző mennyiségű, 6,67% széntartalmú vegyület, 0,8% széntartalmú eutektoid és 0,025%-nál kisebb széntartalmú szilárd oldat kristallitokból áll.

A vasötvözetek tulajdonságainak sokfélesége részben a különböző széntartalmukkal függ össze. Gyakran a széntartalom, illetve a szén

megjelenési formája alapján csoportosítják a vasötvözeteket. Bennük a szén három különböző módon fordulhat elő:

1. itersztíciósan oldott formában,
2. a vassal alkotott vegyület formájában (kötött szén),
3. elemi szénként grafit formájában (szabad szén).

A szénnek fémekkel alkotott vegyületeit karbidoknak nevezik. Ezek általában nagyon kemény, rideg anyagok. Minél nagyobb mennyiségben található karbid egy ötvözetben, az annál ridegebb, nehezebben megmunkálható. Szén a vassal **vaskarbidot**, más néven **cementitet** képez. Széntartalma a képlete és az atomsúlyok alapján meghatározható: a vas atomsúlya 56, a szénéé 12. A vaskarbid képlete **Fe<sub>3</sub>C**, molekulásúlya tehát  $3 \cdot 56 + 12 = 180$ .

Ebben a 12 atomsúlyú szén százalékos arány:

$$\frac{12}{3 \cdot 56 + 12} \cdot 100 = 6,666 \approx 6,67 \%$$

### A vas - szén ikerdiagram

A vasban fel nem oldott szén tehát vaskarbid vagy grafit formájában válhat ki, attól függően, hogy milyenek a hűtési viszonyok. Ebből következően a vas - szén állapotábrának két változata van. Az egyik, amikor a kivált szén a vassal vaskarbidot képez. Ezt **vas - vaskarbid** állapotábrának, más szóval **metastabilis rendszernek** nevezik.

A másik eset, amikor a kivált szén elemi szén formájában kristályosodik. Ez a **vas - grafit** állapotábra, ami egy **stabilis rendszer**. A két állapotábra nagyon hasonlít egymásra, ezért **ikerdiagramoknak** nevezik őket. Az 1.42. ábrán a folyamatos vonallal a *vas - vaskarbid*, szaggatott vonallal a *vas - grafit* rendszert ábrázoltuk. Azt, hogy egy konkrét ötvözet éppen melyik rendszer szerint kristályosodik, a hűtés sebessége határozza meg.

**A metastabilis rendszernek a kb. 1 °C/min hűtési sebesség felel meg. Ez viszonylag gyors hűtésnek számít.**

**A stabilis rendszer szerint megy végbe az átalakulás, ha 1 °C/min-nél jóval lassúbb hűtést alkalmazunk.**

A vas - szén állapotábra alakja bonyolultnak tűnhet, de alaposabb szemrevételezés után látható, hogy a Tammann-féle ideális állapotábrákat, mint elemeket tartalmazza és természetesen az azokkal kapcsolatban ismertetett olvasási szabályok alapján az egyes ötvözetek változása a hűtés során, jól nyomon követhető.

Az ábrát szemlélve feltűnhet, hogy az ábra jellegzetes ACDEF része alacsonyabb hőfokon mintegy megismétlődik a GSEP részben. Az állapotábra tehát jellegzetessége alapján két részre osztható:

1. a 0%-tól 2,06% széntartalomig terjedő,
2. a 2,06%-tól 6,67% széntartalomig terjedő részre.

A 2,06 % széntartalomig terjedő mező vas-szén ötvözeit **acél**nak nevezzük. A nagyobb széntartalmú ötvözetek 2,06-6,67 %-ig a **nyersvasak** (3,5-4,5% közé beállítva öntöttvasak).

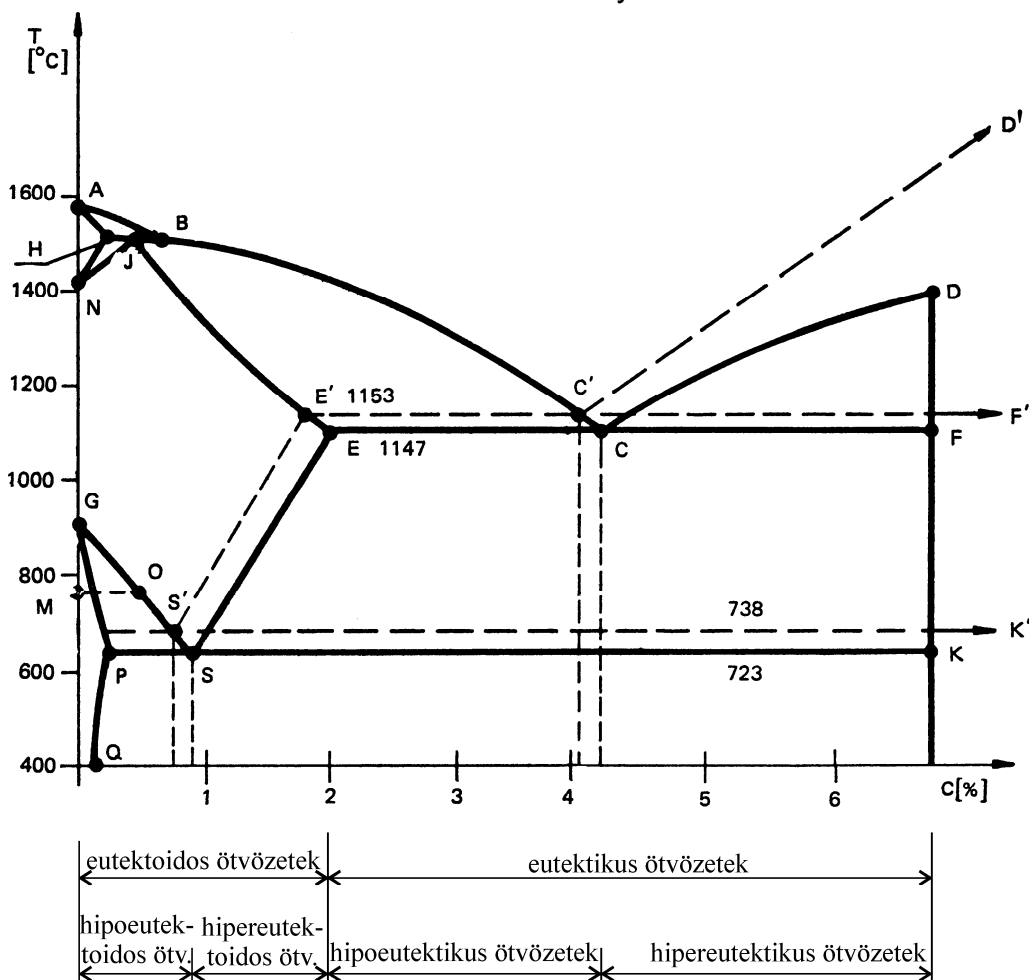
A vas - szén ötvözetek a gyakorlatban is e két fő ötvözetcsoportha sorolhatók:

- az *eutektikus* ötvözetek tartományára,
- az *eutektoidos* ötvözetek tartományára.

Mindkét részt további két-két részre osztja az eutektikus (C) és az eutektoidos (S) pont.

Azokat az ötvözeteket, melyek széntartalma nem éri el az eutektikus, illetve az eutektoidos értéket, *hipo-* előtaggal különböztetjük meg. Az eutektikus-, illetve az eutektoidos összetételnél nagyobb széntartalmú övezeteket *hiper-* előtaggal jelöljük. Így az egyes ötvözet tartományok:

- |                       |   |
|-----------------------|---|
| - 0%-tól - 0,8%       | széntartalomig <i>hipoeutektoidos</i> (acélok), |
| - 0,8%-nál            | <i>eutektoidos</i> (acél),                      |
| - 0,8%-tól - 2,06%-ig | <i>hipereutektoidos</i> (acélok),               |
| - 2,06%-tól - 4,3%-ig | <i>hipoeutektikus</i> (nyersvasak),             |
| - 4,3%-nál -          | <i>eutektikus</i> (nyersvas),                   |
| - 4,3%-tól - 6,67%-ig | <i>hipereutektikus</i> (nyersvasak) tartománya. |



1.42. ábra Vas-szén ikerdiagram

### 1.4.1 A vas – szén ötvözetek metastabilis rendszer szerinti állapotábrája

A vas - szén ötvözetek 1 °C/min körüli hűtési sebesség esetén a 1.43 ábra szerint kristályosodnak. A kétalkotós ötvözetrendszert nincs értelme 100% széntartalomig megrajzolni és vizsgálni, mer szerkezeti anyagként csak a 6,67% széntartalomnál kevesebb szenet tartalmazó ötvözeteket használják. Mint korábban láttuk, a vaskarbid vegyület széntartalma 6,67%. A vegyületet jelző állapotábra vonal, mint tengely fogható fel, hiszen itt 100% vaskarbid van.

Az állapotábrában vannak korlátolt oldhatósági vonalak (PQ; ES; DC), vegyületet jelző vonal (DK tengely), eutektikus (C) és eutektoidos (S) pont. Részletesebb vizsgálat nélkül is megállapítható tehát, hogy az ötvözetrendszer az ezeknek megfelelő szövetelemeket tartalmazza.

Az ábrában az állapotábra vonalakat vastag, folyamatos vonallal, a metszéspontokat nagy betűkkel jelöljük. Az egyes vonalszakaszokat a rajtuk fekvő pontok betűjelével adhatjuk meg (például korlátolt oldhatósági vonal PQ görbe). Az eutektikumnak és az eutektoidnak megfelelő ötvözetjelző vonalat szaggatottan jelölik, felhívva a figyelmet arra, hogy ez nem állapotábra vonal (nem lehet hozzá karokat rendelni). A vetítővonalakat vékony folyamatos vonallal jelölik.

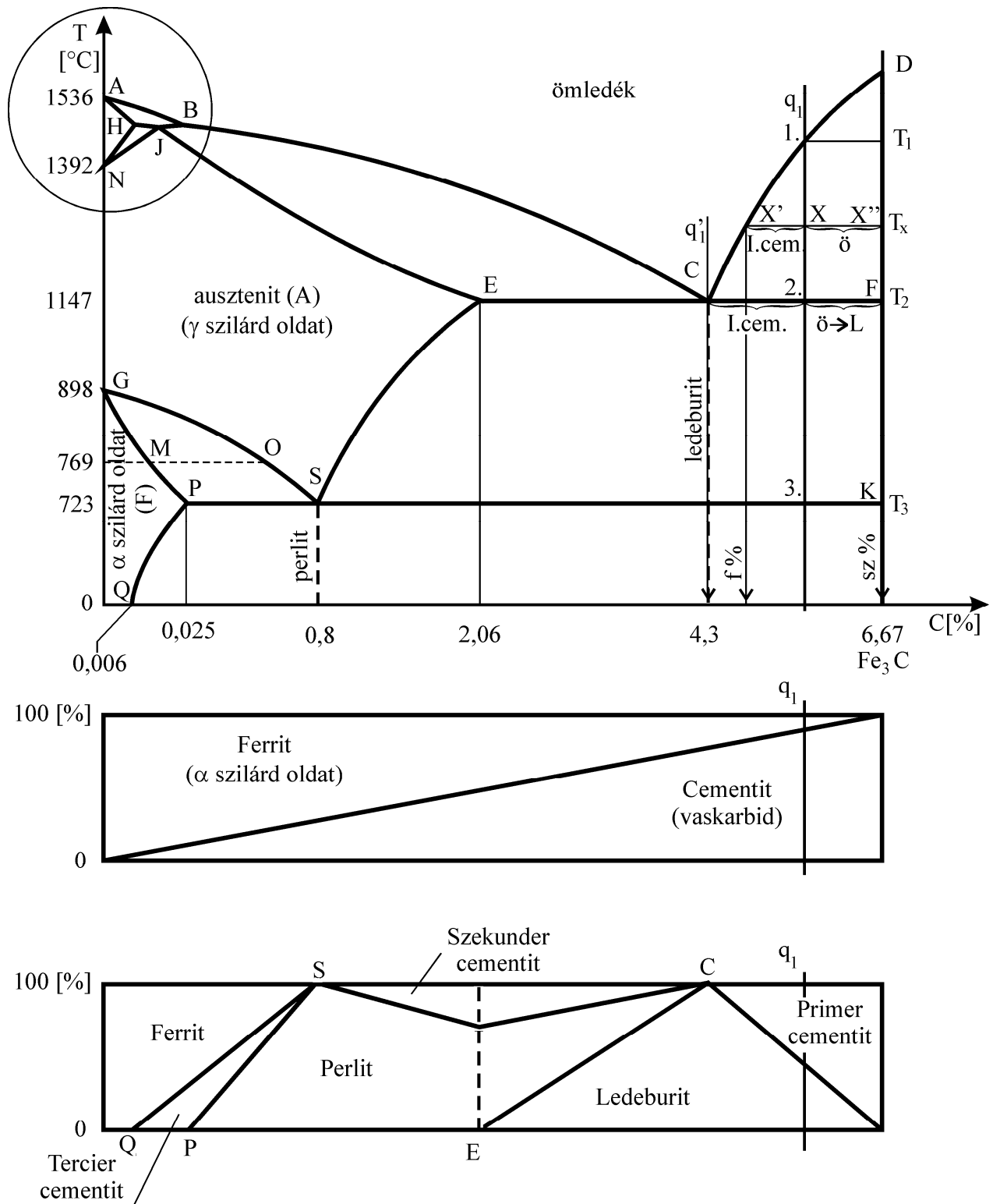
Az egyes pontoknak megfelelő összetételi és hőmérsékleti értékeket az ábrán a tengelyek mentén tüntettük fel.

Ahol az átalakulás végét jelző vonal (a szolidusz AE-szakasza és az átkristályosodás végét jelző GP vonal) görbe, alatta homogén szilárd oldat mező van (ausztenit, illetve ferrit).

Az ábra bal felső részében (körrel jelölve) egy **peritektikus átalakulásra** utaló rész látható, melyhez hasonló a 1.40. ábrával kapcsolatosan már részletesebben elemeztünk. Itt játszódik le a színvas, illetve a kis széntartalmú vas - szén ötvözetek esetében kialakuló  $\delta$  szilárd oldat allotrop átalakulása  $\gamma$  szilárd oldattá. Mivel ez az átalakulás csak egészen kis széntartalmú ötvözetekre jellemző és magas, 1392 °C feletti hőfokon megy végbe, az általános gépészmérnöki gyakorlat szempontjából nincs különösebb jelentősége. Ezért a továbbiakban, az állapotábra részletes tárgyalása során ettől a résztől eltekintünk, az állapotábrát olyan formában rajzoljuk fel, mintha a kristályosodás a  $\gamma$ -szilárd oldat kialakulásával az A pontnak megfelelő hőmérsékleten kezdődne.

Mindez nem jelenti azt, hogy e peritektikus átalakulásnak nincs gyakorlati jelentősége, hiszen a hegesztési eljárásoknál éppen a kis széntartalmú ötvözeteket használják, és az acélt meg is ömlesztik. Ezért ott foglalkoznak részletesebben a peritektikus folyamattal.





1.43. ábra Vas-vaskarbid állapotábra (hipereutektikus öntöttvas átalakulása)

Mielőtt belekezdenénk az állapotábra részletes vizsgálatába, előbb nézzünk néhány, általánosan használatos jelölést az ábrában:

<b>ö</b>	ömledék,
<b>A</b>	ausztenit ( $\gamma$ -szilárd oldat vagy másnéven $\gamma$ vegyes kristály),
<b>I. cem.</b>	elsődleges (primer) cementit
<b>II. cem.</b>	Másodlagos (sekunder) cementit,
<b>III. cem.</b>	harmadlagos (tercier) cementit,
<b>L</b>	ledeburit,
<b>P</b>	perlit,
<b>F</b>	ferrit ( $\alpha$ - szilárd oldat vagy más néven $\alpha$ vegyes kristály),
<b>f</b>	a folyékony fázis karja,
<b>f %</b>	a folyékony fázis százalékos összetétele,
<b>sz</b>	a szilárd fázis karja,
<b>sz%</b>	a szilárd fázis százalékos sszetétele,
<b>ö → L</b>	ömledék átalakulása ledeburittá, hőfokon,
<b>A → P</b>	ausztenit átalakulása perlitté, hőfokon.

Vizsgáljuk meg a vas - vaskarbid állapotára egy-egy jellemző ötvözet típusának átalakulását ömledék állapottól szobahőmérsékletig történő hűtése során.

A vizsgálatot az egyszerűség kedvéért a hipereutektikus mezőben kezdjük egy  $q_1$  övözetjelző vonal mentén, megjelölve és megszámozva rajta az állapotára vonalakkal való metszéspontokat.

### I. A hipereutektikus öntöttvas szövetelemei

A vizsgált  $q_1$  ötvözet a  $T_1$  hőmérsékleten, elérve a likvidusz görbét, kezd megszilárdulni. A  $T_x$  hőmérsékleten már az X'X karnak megfelelő mennyiségű szilárd és még az XX'' karnak megfelelő mennyiségű ömledékből áll az ötvözet. A szilárd fázis nem más, mint vaskarbid, más néven cementit. Ez az ábrából leolvasható: a karok végpontjánál (X'' és X') cementit, illetve ömledék mező található. Az összetétel a fordított karszabály szerint: az ömledéké  $f\%$ , a cementité természetesen  $6,67\%$  szén tartalmaz. Mivel itt a cementit magas hőfokon, közvetlenül ömledékből alakul ki, *elsődleges (primer)* cementitnek nevezik.

Tovább hűtve az ömledéket, egyre több cementit kristályosodik ki. Ennek eredményeként az ömledék széntartalma egyre csökken és értéke tart az eutektikus összetételhez ( $4,3\%$ ).

Az ötvözet elérve  $T_2$  szolidusz hőmérsékletet, áll az **sz**-karnak megfelelő mennyiségű I. cementitből és az **f**-karnak megfelelő mennyiségű ömledékből. Az ömledék széntartalma éppen elérte a  $4,3\%$ . Mivel az eutektikum kialakulásának mind a két feltétele teljesült, az *összetétel* és a *hőmérséklet* eutektikus, az ötvözet addig nem hűl tovább, amíg az ömledék  $1147\text{ }^\circ\text{C}$ -on eutektikumra nem szilárdul, amit **ledeburitnak** neveznek (LEDEBUR angol kutatóról).

A ledeburit heterogén szerkezetű összetett szövetelem. Lényegében szilárd vegyületben (az eutektikum cementitjében) egy szilárd oldat (ausztenit) kristallitjai oszlanak el.

Tehát a megszilárdult ötvözet egy homogén,  $6,67\%$  széntartalmú vegyületből és egy  $4,3\%$  széntartalmú, heterogén szerkezetű eutektikumából áll.

Az ausztenit (AUSTEN német fizikusról nevezték el) intersztíciós  $\gamma$  szilárd oldat vagy másnéven  $\gamma$  vegyes kristály.

Vizsgáljuk meg, hogy további hűtés során lesz-e átalakulás az ötvözetben. Az egyik szövetelem vegyület, aminek összetétele kötött, a vegyület bomlása csak nagyobb energia-bevitel esetén következhet be, hűtés hatására nem. A másik alkotó, az eutektikum összetétele is kötött, abból kiválás nem lehetséges.

Tehát az ötvözet szobahőmérsékletre hűtve is ezekből, a már korábban kialakult szövetelemekből fog állni. Természetesen egy látszólagos ellentmondást még fel kell oldani. Nevezetesen azt, hogy az ötvözetjelző vonal  $723\text{ }^\circ\text{C}$ -on metszi a PK állapotára vonalat, márpedig a szabályok szerint,

állapotábra vonal metszésnél átalakulás következik be. Természetesen nincs ellentmondás. A 3. állapotjelző pontnak megfelelő változás az eutektikumon belül történik, mégpedig a cementitbe dermedt szilárd oldat (ausztenit) krisztallitjai 723 °C-on eutektoiddá (perlitté) alakulnak. (Az ausztenit perlitté alakulásának folyamatát majd a hipoeutektoidos ötvözet vizsgálatát leíró rész ismerteti)

Mivel az eutektikumon belül megszilárdult cseppek elhelyezkedése, összetétele nem változott csak a szerkezete (már nem cementitbe dermedt ausztenit, hanem cementitbe ágyazott perlit krisztallitokból áll), ezért lényegében maradt az eutektikum továbbra is.

### **A hipereutektikus öntöttvas szobahőmérsékleten I. cementitből és ledeburitból áll.**

A  $q_1$  ötvözet összetétele éppen eutektikus (4,3% széntartalom). A hűlés során a C pont hőmérsékletén éri el a likviduszt, de egyúttal a szoliduszt is, hiszen az ötvözet hőfokon szilárdul és teljes egészében eutektikumká, ledeburittá kristályosodik. A további hűtés során a már ismertetett belső átalakuláson kívül más változás nem történik, így **a 4,3% széntartalmú ötvözet szobahőmérsékleten tisztán ledeburitból fog állni.**

### **II. A hipoeutektikus öntöttvas szövetelemei**

A 1.44. ábra szerint a vizsgált  $q_2$  ötvözet a  $T_1$  hőmérsékleten, elérve a likvidusz görbét, kezd megszilárdulni. Az, hogy a megszilárdulás során milyen szövetelem krisztallitok keletkeznek, most is a karok segítségével határozható meg.  $T_x$  hőmérsékleten a karokat úgy lehet megrajzolni, hogy az ötvözetjelző és a hőfokjelző vonalak metszéspontjából (X) jobbra és balra az első állapotábra vonal metszésig kijelölünk egy-egy szakaszt, a karokat. A karok végpontja (X'') az ömledék mezővel, a másik (X') az ausztenit mezővel határos, ezért ezen a hőfokon az ötvözet ömledékből és ausztenitből áll. A hűlés során növekvő (XX'') kar a már szilárd ausztenit mennyiségével, míg a csökkenő (X'X) kar az ömledék mennyiségével lesz arányos.

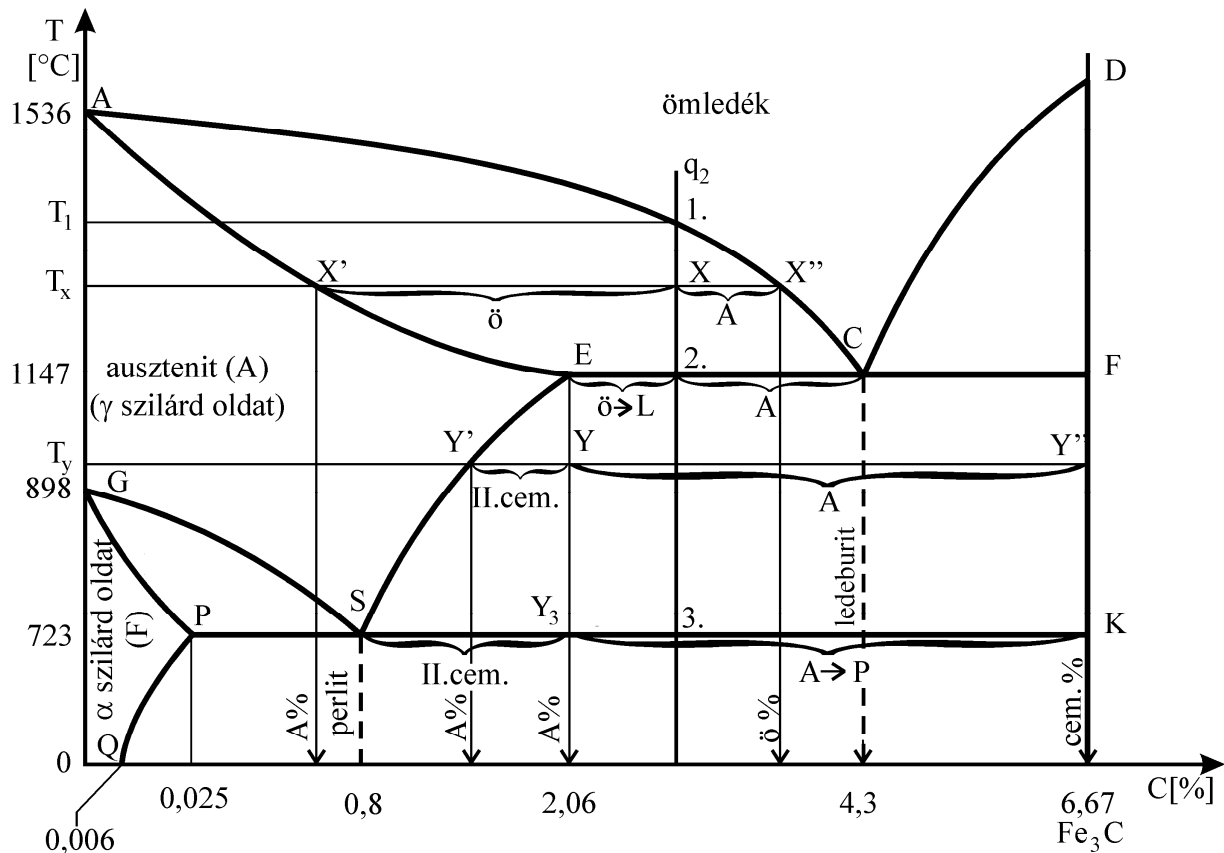
Összetételük a fordított karszabály értelmében  $f\%$  és  $A\%$  lesz.

Elérve a szolidusz hőmérsékletét (2. állapotjelző pont), a **sz**-karnak megfelelő mennyiségű ausztenit mellett még maradt **f**-karnak megfelelő mennyiségű ömledék. Ennek összetétele a vizsgált hőfokon éppen 4,3% lett, így az ömledék addig nem hűl tovább, míg eutektikumká nem szilárdul. Tehát a szolidusz hőmérsékletén két különböző ötvözet, szilárd oldat (ausztenit) és eutektikum (ledeburit) alkotja a vizsgált mennyiséget.

További hűtés során vizsgáljuk külön-külön az egyes szövetelemeket. Az eutektikum, mint már az előzőekben láttuk, egy 723 °C-on bekövetkező belső szerkezetváltozástól eltekintve nem változik.

Az ausztenit viszont egy intersztíciós szilárd oldat, így oldóképessége a hőmérséklet csökkenésével együtt csökken. A szolidusz hőmérsékletű ausztenit széntartalma a fordított karszabály értelmében éppen az **E** pontnak megfelelő 2,06%. Az **AESG** ausztenit mezőre tekintve látható itt nyúlik ki

legmesszebbre az összetétel tengely mentén, vagyis az ausztenitnek ez a maximális szénoldó képessége.



1.44. ábra Hipoeutektikus öntöttvas átalakulása

A szilárd oldat éppen telített, tehát hűlése során túltelítetté válik és belőle szén fog kiválni a korlátolt oldóképesség miatt.

Mivel az ausztenit egy 2,06% széntartalmú szövetelem, a továbbiakban vizsgálni egy ilyen (az E ponton átmenő) ötvözetjelző vonal mentén lehet (q<sub>2</sub>).

A hűtés során elérve T<sub>γ</sub> hőmérsékletet, a korlátozott oldás miatt az ausztenitből szén vált ki. A szén 1 °C/min hűtési sebesség mellett, vegyületet képez a vassal és így szénben dús fémvegyület, cementit (Fe<sub>3</sub>C) keletkezik. Ez úgy megy végbe, hogy a korlátozott oldás következtében feleslegessé vált szén atomjai a szilárd oldatból diffúziós folyamat során a kristallitok határára vándorolnak, de ott a rácsot alkotó vasatomokkal vegyi reakcióba lépnek és cementitet képeznek. A kivált cementit mennyiségével a hűtés során növekvő Y'Y kar lesz, míg az ausztenit mennyiségével az YY'' kar lesz arányos. Az itt keletkező cementit magas hőmérsékleten (723-1147 °C között), de már szilárd fázisból válik ki. Az ömledékből kiváló I. cementittől megkülönböztetve, ezt másodlagos (szekunder) cementitnek nevezik. Természetesen a II. cementit és az I. cementit anyagában nem, csupán keletkezésük hőfokában különböznek.

A szénkiválás hatására az ausztenit széntartalma csökken és tart 0,8%-os értékhez, amit 723 °C-on ér el.

A PK vonal hőmérsékletére hűtve az ausztenitet az  $Y_3$  állapotjelző pontnál a mennyisége az  $Y_3K$  karnak megfelelő értékre csökken, a II. cementit mennyiségével az  $SY_3$  kar arányos. A fordított karszabály értelmében az ausztenit széntartalma 0,8% lett, hőmérséklete lecsökkent 723 °C-ra. Ha ez a két feltétel teljesül, a szilárd oldat állandó hőfokon *eutektoiddá* alakul. A vas - szén állapotábrában az eutektoidot **perlitnek** nevezik.

Az **ausztenit – perlit átalakulási folyamat** jelentősége nagy, mint azt a *Fémötvözetek hőkezelése* c. fejezetben látni fogjuk, ezért kicsit részletesebben mutatjuk be.

Mint láttuk a  $\gamma$ szilárd oldat széntartalma bármekkora is volt, a korlátozott oldás következtében mindig 0,8% széntartalomra csökken azáltal, hogy szén válik ki, amiből II.cementit jön létre a krisztallitok határán.

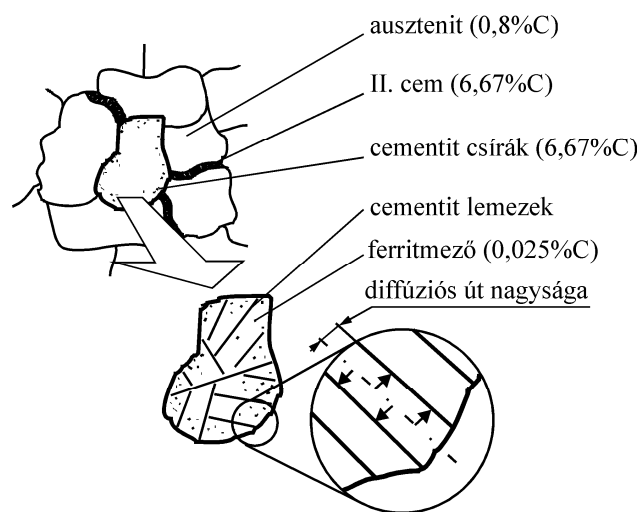
Amikor az eutektoidos átalakulás feltételei fennállnak, az ausztenit krisztallitok határa mentén belülről cementit csírák jelennek meg (1.45. ábra), de nem azért, mert tovább csökkent volna a szénoldó képesség, hanem mert ez az első lépése az eutektoiddá alakulásnak. A kis cementit kristályosodási centrumokat azért nevezik csíráknak, mert az átalakulás során továbbfejlődnek, lemezekké szélesednek. A cementit lemezek széntartalma 6,67%, tehát ahhoz, hogy a 0,8%-os ausztenitben kialakulhasson, több szénre van szükség. Zárt rendszerről lévén szó, ez a szénmennyiség csak a krisztallitból áll rendelkezésre, aminek hatására a cementit lemez környékén a szilárd oldat kezd elszéntelenedni. Amikor a széntartalom lecsökken 0,025 %-ra összetélt, a szilárd oldat lapközepes köbös szerkezete térközepes köbössé alakul, végbemegy a  $\gamma \rightarrow \alpha$  átalakulás a cementitlemezek között. Az ausztenit lemezek így ferritlemezekké (lkk-ból tkk szerkezetűvé) válnak, az átalakulási folyamat végére a homogén szilárd oldatból egy heterogén szerkezetű, cementit és ferrit lemezekből álló eutektoid alakul ki.

A cementit csírákból a cementit lemezek addig növekedhetnek, míg egy másik cementit lemezrel össze nem érnek. Cementitből szén nem diffundálhat a másik lemezbe, így növekedése megáll. A kialakuló cementit lemezek vastagsága attól függ, hogy az átalakulási folyamat kezdetén cementit csírák milyen sűrűn helyezkednek el a krisztallithatárok mentén. Gyors hűtés esetén sok cementit csíra képződik, a sűrűn elhelyezkedő csírákból sűrű és így vékony lemezek alakulnak ki. A finomlemezes szerkezetben, mivel a lemezek közel vannak egymáshoz, a szénatomoknak a diffúzió során csak rövid diffúziós utat kell megtenniük (a diffúziós út egyenlő a két lemez távolságának felével), ennek megtételéhez, pedig kevesebb időre van szükség. Tehát a hűtés sebességének növelésével lehet befolyásolni a perlit lemezek finomságát. Az átalakulás során a teljes ötvözetmennyiség hőmérséklete állandó, míg az átalakulás be nem fejeződik.

A szobahőmérsékletig való hűtés során már további változás nem lesz, az ötvözetjelző vonal már nem metsz állapotábra vonalat. Mind a vegyület, mind az eutektoid összetétele kötött, további változás, kiválás nincs.

*Mindezek alapján a hipoeutektikus öntöttvas szobahőmérsékleten ledeburitból, II. cementitből és perlitből áll.*

Összefoglalva az eddigieket megállapíthatjuk, hogy mind a hiper-, mind a hipoeutektikus ötvözetek jellemzője, hogy mindig tartalmaznak több-kevesebb eutektikumot. Ha a 2,06% és a 6,67%-os tartományban bármilyen összetételű ömledék megszilárdulását és további átalakulását vizsgáljuk, eutektikum kialakulását tapasztaljuk. Tisztán eutektikum pontosan 4,3%-os széntartalom esetén lesz. Ha ennél több a szén az ötvözetben, akkor előbb a felesleges szénmennyiség szénben dús anyag (cementit) formájában válik ki, ha 4,3%-nál kevesebb a szén (ez relatíve azt jelenti sok a vas), akkor előbb a vasban dús anyag (ausztenit) fog kialakulni és az ömledék széntartalma feldúsul, és ezután alakul eutektikumává.



1.45. ábra Ausztenit-perlit átalakulás

Ezen gondolatmenet alapján akár előre felvázolhatjuk az úgynevezett eutektoidos ötvözetcsoport (0, 006-2,06% széntartalomig) fő átalakulási folyamatát. Itt azonban az ötvözetekben nem lesz eutektikum, hanem egy másik, hasonlóan összetett szövetelemet, eutektoidot fognak tartalmazni. Az ötvözet teljes egészében eutektoidos csak 0,8% széntartalom esetén lesz. Ha az ötvözet ennél több szenet tartalmaz, itt is kiválik a felesleges szénmennyiség cementit formájában, ha kevesebb az eutektoidos széntartalomnál (0,8%, akkor itt is vasban dús szilárd oldat, ferrit keletkezik. A megmaradt ausztenit ezután eutektoiddá (perlitté) alakul. Ezek után tekintsük át az eutektoidos ötvözetek szövetelemeinek kialakulását részletesebben.

### III. A hipereutektoidos acélok szövetelemei

A  $q_3$  ötvözet a  $T_1$  hőmérsékleten kezd megszilárdulni (1.46. ábra).  $T_x$  hőmérsékletre hűtve már  $XX''$  karnak megfelelő mennyiségű szilárd fázist tartalmaz és van még az  $X'X$  karnak megfelelő mennyiségű ömledék. A szilárd fázis ausztenit lesz, mint azt a karok végpontja és a határos állapotára mezők alapján megállapítható. Az ausztenit széntartalmát a fordított karszabály alapján  $A\%$ -nál olvashatjuk le, az ömledékét az  $\bar{O}\%$ -nál. Látható, hogy az ausztenit kristályosodása következtében az ömledék szénben dúsul és tart a





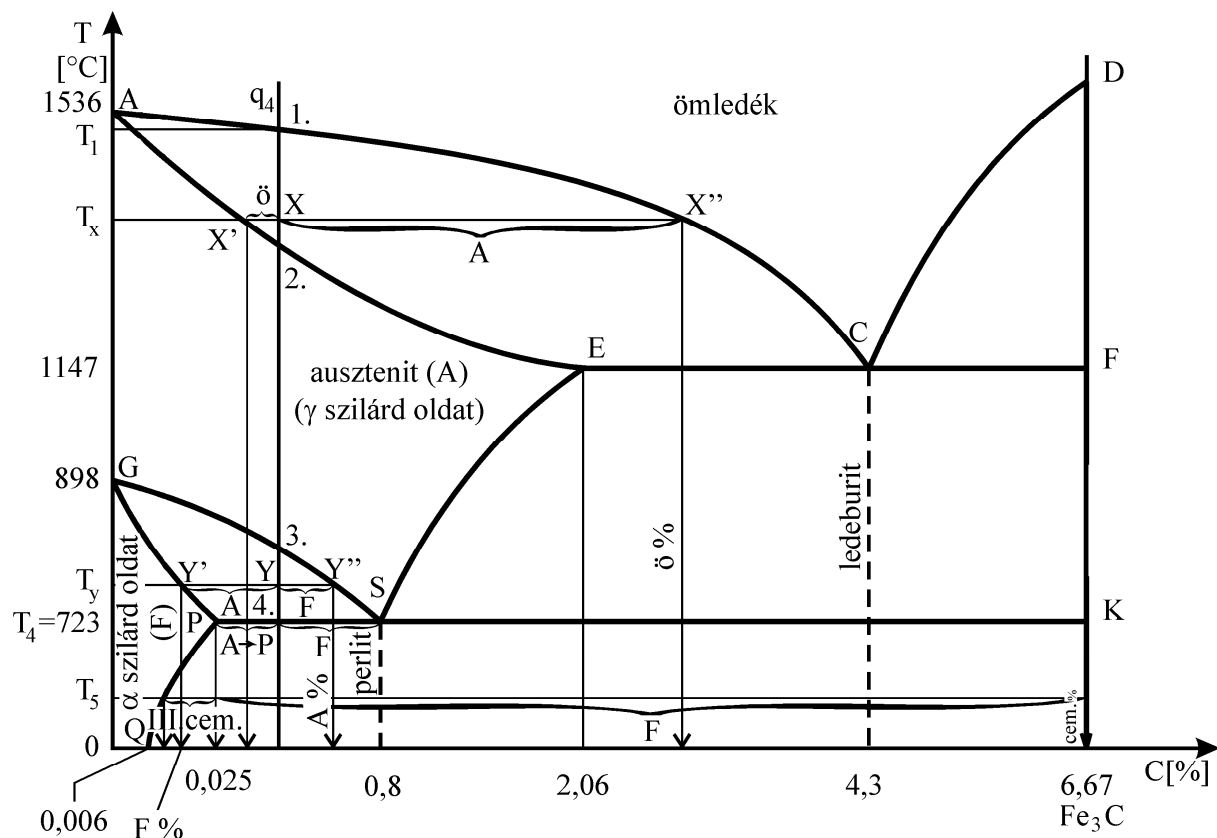
egész anyagmennyiség ausztenitté szilárdul meg, mivel a kevés szenet az ausztenit oldatban tudja tartani. Az ötvözetjelző vonal a  $T_2$  és a  $T_3$  hőmérséklet között homogén szilárd oldat mezőben halad. Itt nincs értelme karok vizsgálatának, mivel csak egy fázis van.

A  $T_3$  hőmérsékleten viszont az ötvözetjelző vonal metszi a GS állapotábra vonalat, ami kezdődő átalakulásra utal, valamilyen átalakulás kezdődik. Ez a  $\gamma \rightarrow \alpha$  átalakulás, ahol a lapközepek köbös rács térközepek köbös ráccsá kristályosodik át. Ez az átalakulás a szénvasban  $898^\circ\text{C}$ -on megy végbe, de a szén hatására ez az átalakulás a GS vonal mentén lefelé eltolódik és hőközben megy végbe. Így a  $T_3$  hőmérséklettől kezdve az acél a  **$\gamma$  szilárd oldatból** és  **$\alpha$  szilárd oldatból** áll. A  $T_Y$  hőmérsékleten már az  $Y'Y''$  karral arányos mennyiség keletkezett és még maradt  $Y'Y$  karral arányos mennyiségű ausztenit.

A ferrit széntartalma  $F\%$ , az ausztenitté  $A\%$ , ami láthatóan tart az eutektoidos összetételhez ( $0,8\%$ -hoz).

$T_4$  hőfokot elérve a ferrit mennyisége a  $F$ -karral arányos, az ausztenit mennyisége a  $A$ -karral, összetétele pedig elérte az eutektoidos összetételt. Az ötvözet addig nem hűl tovább, míg az ausztenit teljes egészében perlitte nem alakult. A perlit, mint eutektoid, kötött összetételű ötvözet, már szobahőmérsékletig hűtve nem változik.

A ferrit összetétele  $723^\circ\text{C}$ -on éppen telített, a  $P$  pontnak megfelelő  $0,025\%$  széntartalmú. Ebből következik, hogy a további hűtés hatására szénoldó képessége a  $PQ$  vonal mentén



1.47. ábra Hipoeutektoidos acél metastabilis átalakulása

folyamatosan csökken. A kidiffundáló szén harmadlagos (tercier) cementitet képez. A szén kiválása még szobahőmérsékleten is tart és így a ferrit széntartalma lecsökken 0,006 %-ra.

**Tehát a hipoeutektoidos acél szobahőmérsékleten perlitből, ferritből és III. cementitből áll.**

Ha az ötvözetjelző vonalat a QP széntartományban vettük volna fel ( $q_4$ ), az ötvözet részben másként alakult volna. A különbség annyi, hogy az ötvözetben kevesebb a szén mennyisége. Az átalakulás hasonló, mint korábban, csak éppen az ötvözetjelző vonal nem metszi a PS vonalat, hanem a homogén  $\alpha$  szilárd oldat mezőben halad. Ez az jelenti, hogy eutektoid nem keletkezett, nem volt hozzá elegendő szén. A ferrit oldatban tudja tartani a szén mennyiségét egészen a  $T_5$  hőmérsékletig, csak itt válik telítetté, majd túltelítetté. Itt kezdődik meg a III. cementit kialakulása.

**Tehát a 0,006-0,025% közötti széntartalmú acél szobahőmérsékleten csak ferritből és III. cementitből áll ( $q_4$ ).**

Ha az ötvözet széntartalma kevesebb a Q pont széntartalmánál, 0,006%-nál, akkor az ötvözetjelző vonal nem metszi a PQ korlátolt oldhatósági vonalat, így nemcsak perlit, de még III. cementit sem keletkezik.

**Tehát az ötvözet homogén ferritből áll.**

## **1.4.2 Vas – szén ötvözetek stabilis rendszer szerinti átalakulása**

### **1.4.2.1 Vas-grafit állapotábra**

Ha a hűtés sebességét változtatjuk a kristályosodó ötvözetrendszer egyensúlyi viszonyai is megváltoznak. A  $v_h = 1$  [ $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ] hűtési sebesség mellett, mint láttuk a metastabilis rendszer szerint megy végbe az átalakulás (a szén vegyület formájában válik ki).

Ha **ennél gyorsabban hűtik** az ötvözetet ( $v_h > 1$  [ $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ]), több változás is bekövetkezik a már ismertetett folyamatokhoz képest. Ennek elsősorban a kisebb széntartalmú ötvözeteknél, az acéloknál van különös jelentősége. Ezt majd a fémötvözetek hőkezelésével foglalkozó fejezetben tárgyaljuk részletesen.

Abban az esetben viszont, ha a hűtés sebessége kisebb a metastabilis rendszerbelinél ( $v_h < 1$  [ $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ]), vagyis **nagyon lassan hűtjük** az ötvözetet, az átalakulás a **stabilis rendszer** szerint megy végbe. Ez azt jelenti, hogy a **szén elemi állapotban, grafit formájában kristályosodik ki a rendszerben**. A stabilis rendszer szerinti átalakulást a lassú hűtésen kívül elősegíti a nagyobb széntartalom, a grafitképző ötvözők, mint amilyen a **szilícium**.

Az eutektikumnak és az eutektikumhoz közeli összetételű ötvözeteknek az öntészetben van nagy szerepe. Ezért e rendszer szerinti átalakulást általában

csak a hipo- és hipereutektikus öntöttvasra vizsgáljuk, eutektoidos ötvözeteknél (acéloknál) nincs különösebb jelentősége.

Az eutektikumnak a legalacsonyabb az olvadáspontja az ötvözetek közül, ezek megolvasztása gazdaságosabban megoldható. Ennél még jelentősebb, hogy az eutektikus ötvözetek hőfokon szilárdulnak. Az ötvözetek megszilárdulásuk során zsugorodnak. Ennek mértéke olyan lehet, hogy a formába öntött ötvözet a formát előbb kitölti, de megszilárduláskor az öntvényben szívódási üreg keletkezik, a falvastagság nem lesz megfelelő. Az ötvözetek zsugorodása annál kisebb, minél kisebb hőközben szilárdulnak.

Öntöttvasként, mint a későbbiekben látni fogjuk, a vas-vaskarbid rendszer szerint kristályosodó ötvözetek nem alkalmasak. Sok cementitet tartalmaznak, amitől az öntvény nagyon rideg, kemény lesz. Ha ugyan az, az ötvözet a **vas-grafit** rendszer szerint kristályosodik, nem tartalmaz rideg szövetelemet, így nem lesz olyan rideg, kemény, megmunkálhatatlan. Igaz a lemezalakú grafitzárványok miatt szilárdsága kisebb lesz az acélokénál.

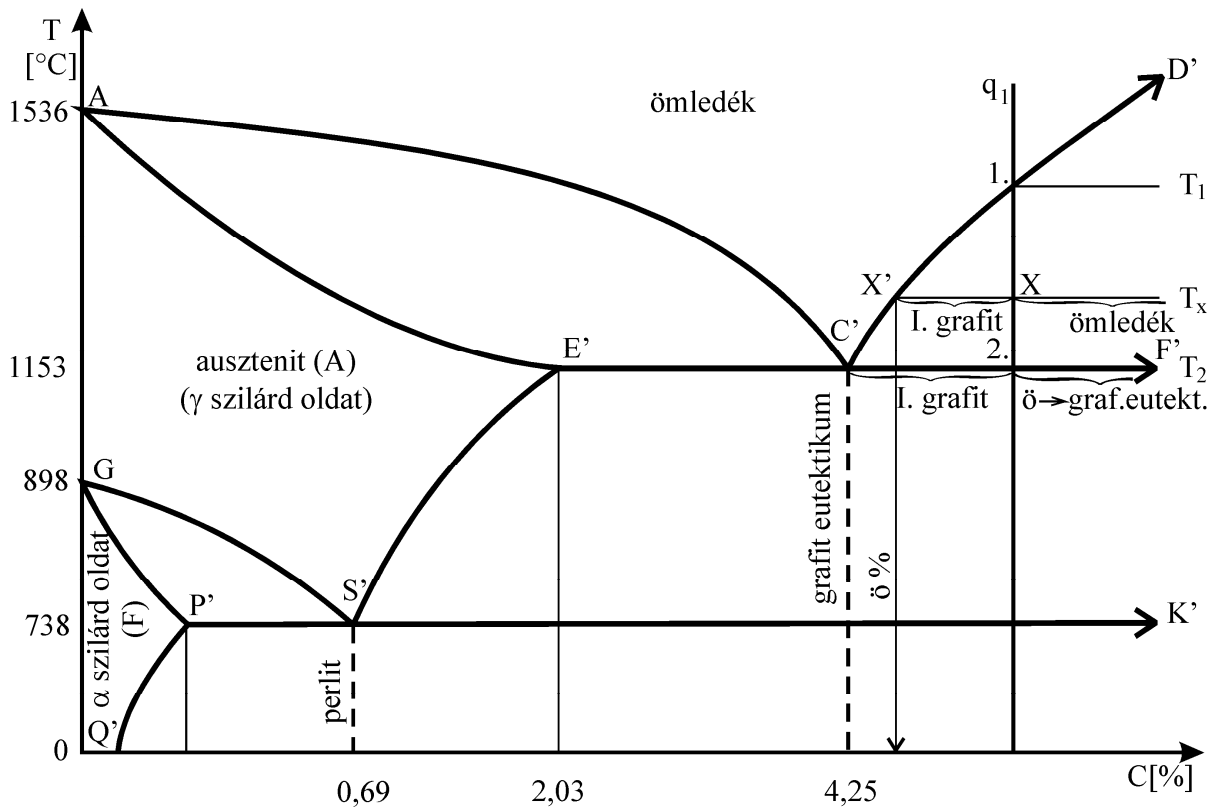
Mivel a grafit kristályos szén, a rendszer ún. **stabilis rendszer**. A stabilis rendszer szerinti átalakulásokat az úgynevezett vas-grafit állapotábrában követhetjük nyomon. A vas-vaskarbid rendszerrel kapcsolatosan tett megállapítások egy jó része ebben az átalakulási rendszerben is igazak. Ha ismerjük a két rendszer közötti eltéréseket, a korábban megismert olvasási szabályok ismeretében az átalakulások jól nyomon követhetők.

A részletes vizsgálat előtt vegyük sorra a lassú hűtésből adódó eltéréseket:

1. A legalapvetőbb eltérés, hogy ebben a rendszerben elmarad a vegyületképződés. Mindenütt, ahol az ötvözetből a korlátolt oldódás következtében, a hűlés során szén válik ki, a szén nem képez vaskarbidot, hanem elemi szén, grafit formájában válik ki.
2. Az előbbiekből következik, hogy ebben a rendszerben nincs „cementit tengely”, ezért egyes állapotábra vonalak nem végződnek az ábrán (például a CD; EF; PK). Ezt a vonalra rajzolt nyíllal jelöljük (tart a 100 % széntengelyhez).
3. A tengely hiányában nem mindenütt rajzolható be minden kar a vizsgálatok során.
4. További eltérés, hogy az ötvözetekre vonatkozó *átalakulási hőmérsékletek felfelé*, a jellemző összetételek a kisebb széntartalom irányába eltolódnak ( $723\text{ °C} \rightarrow 738\text{ °C}$ ;  $1147\text{ °C} \rightarrow 1153\text{ °C}$ ;  $4,3\% \rightarrow 4,25\%$ ;  $2,06\% \rightarrow 2,03\%$ ;  $0,8\% \rightarrow 0,69\%$ ). Másként megfogalmazva, az egyes állapotábra pontok felfelé és balra eltolódnak ( $\leftarrow \uparrow$ ). Itt a pontok jelölése: C'; D'; E' stb.
5. Mint már szó volt róla, a ledeburit vegyületbe dermedt szilárd oldatból álló összetett szövetelem. Ebben a rendszerben nincs vegyületképződés, így ledeburit sincs. A keletkező eutektikum grafitot, az eutektikum grafitját tartalmazza, és **grafit-eutektikumnak** nevezik.

Vizsgáljuk meg részletesebben egy  $q_1$  összetételű, **hipereutektikus öntöttvas** kristályosodási folyamatát ömledék állapottól szobahőmérsékletig

(1.48. ábra). Az ötvözet elérve a likvidusz hőmérsékletét  $T_1$  hőmérsékleten kezd kristályosodni. Elérve egy  $T_x$  hőmérsékletet, az ötvözet  $X'X$  növekvő kar szerinti része megszilárdult. A másik kar lenne az ömledék mennyiségével arányos, ha az ábrát a 100% szén tengelyig megrajzoltuk volna. A szilárd fázis összetételét a fordított karszabály szerint itt kellene leolvasni, ami természetesen 100% szén, grafit formájában kikristályosodva. Az ábra szerint a másik fázis ömledék. Ennek  $\bar{o}$  % összetétele az ábrából leolvasható és látható, hogy további hűtés során tart az eutektikus összetételhez.



1.48. ábra Hipereutektikus öntöttvas stabilis átalakulása

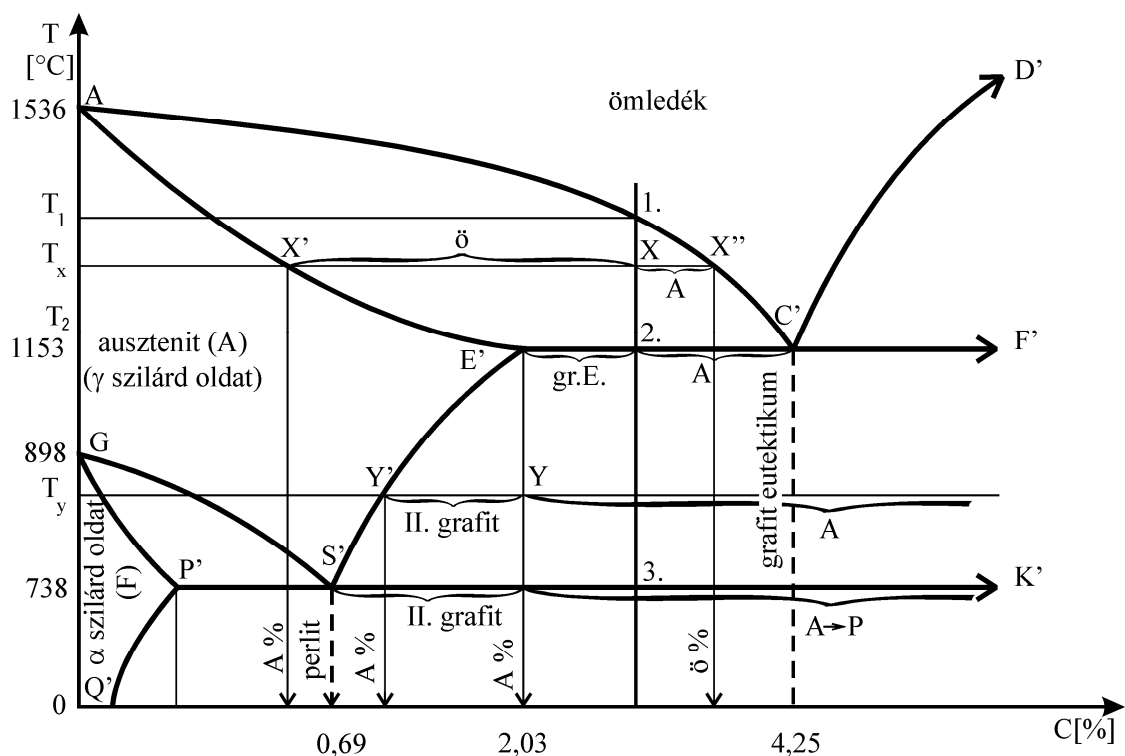
Elérve a  $T_2$  eutektikus hőmérsékletet, a  $C'2.$  karnak megfelelő mennyiségű I. grafit kristályosodása következtében az ömledék 4,25% széntartalmú, tehát eutektikus összetételű lesz. A szolidusz hőmérsékleten megtörténik az ömledék grafit-eutektikumra alakulása. Tovább hűtve az ötvözetet az alkotók már nem változnak, hiszen az egyik a grafit, a másik a kötött összetételű eutektikum. A 3-as pont ugyan változásra utal, de ez már a vaskarbidos rendszerrel részletesen ismertett belső átalakulás csupán, amikor az eutektikum ausztenitje perlitre alakul, de továbbra is eutektikum.

**Szobahőmérsékleten tehát a hipereutektikus öntöttvas a stabilis rendszer szerint I. grafitból és grafit-eutektikumból áll.** A grafit-eutektikum, mint összetett szövetelem az eutektikum grafitjából és az eutektikum perlitjéből áll. A perlit szintén összetett szövetelem, amely áll a perlit ferritlemezeiből és cementit lemezeiből. Kellően lassú hűtés és hőntartás esetén még a perlit cementit lemezei is elbomlanak és belőle lesz a perlit

grafitja. Így azt láthatjuk, hogy bármilyen ötvözet a stabilis rendszerben végső soron abból a két fázisból épül fel, amely az állapotábra elején és végén található: **ferritből** és **grafitból**.

Ha a  $q_2$  összetételű **hipoeutektikus ötvözet** stabilis rendszer szerinti kristályosodását vizsgáljuk, akkor az átalakulás 1.49. ábra szerint megy végbe. A kristályosodás a  $T_1$  hőmérsékleten kezdődik a likvidusznál. Elérve a  $T_x$  hőmérsékletet,  $XX''$  karnak megfelelő mennyiségű ausztenit kristályosodott már meg, mégpedig **A%-os** összetételben, valamint van még az  $XX''$  karnak megfelelő mennyiségű és **ö%-os** összetételű ömledék. Az ömledék összetétele a vasban dús ausztenit kialakulásával egyre dúsul szénben, és mire lehül  $1153\text{ °C}$ -ra, széntartalma eléri a  $4,25\%$ -ot. Ezen a hőfokon grafit-eutektikumá szilárdul meg, amelynek összetétele a további hűtés során már nem változik, habár a 3. pontnak megfelelő  $738\text{ °C}$ -on az ausztenit-perlit átalakulás itt is végbemegy az eutektikumon belül.

A 2. –  $C'$  karnak megfelelő mennyiségű és  $1153\text{ °C}$  hőmérsékletű ausztenit összetétele éppen az  $E'$  pontnak megfelelően  $2,03\%$ -os. Az ausztenitnek itt a legnagyobb a szénoldó képessége, tehát éppen telített. A további hűtés során az  $E'S'$  korlátolt oldhatósági vonal mentén szén fog kiválni II. grafit formájában.  $T_y$  hőmérsékleten a már kivált grafit mennyisége az  $Y'Y$  karral lesz arányos, míg az ausztenittel az  $YY''$  kar nagysága. A II. grafit kiválásával az ausztenit széntartalma folyamatosan csökken egészen a  $738\text{ °C}$ -ig. Itt eléri a  $0,69\%$ -os összetételt, és átalakul az ausztenit perlitte. A további hűtés során a szövetelemek nem változnak, mivel az egyik elemi szén, a másik eutektikum, a harmadik eutektoid.



1.49. ábra Hipoeutektikus öntöttvas stabilis átalakulása

**Szobahőmérsékleten tehát a hipoeutektikus öntöttvas a stabilis rendszer szerint II. grafitból, grafit-eutektikumból és perlitből áll.**

A grafit-eutektikum, mint összetett szövetelem az eutektikum grafitjából és az eutektikum perlitjéből áll. A perlit szintén összetett szövetelem és előbb ismertetett módon, a perlit ferrit- és cementit-lemezeiből áll.

Kellően lassú hűtés és 738 °C-on történő, hosszabb idejű hőntartás hatására a perlit cementitje is elbomlik és így az egész ötvözet végső soron abból a két fázisból épül fel, amely az állapotára elején és végén található: **ferritből és grafitből.**

#### 1.4.2.2 Az egyensúlyi átalakulások során keletkező vas-szén ötvözetek

Mint már láttuk, a vas-szén ötvözeteknek alapvetően két fő csoportja van. Az egyik a 2,06 %-nál kisebb szénttartalmú ötvözeteket foglalja magába, és ezeket **acéloknak** nevezik.

A másik a nagyobb szénttartalmúak csoportja (2,06 és 6,67% közötti szénttartalommal). Ezeket nevezzük **nyersvasnak**.

**Nyersvasnak**, mint azt a következő fejezetben látni fogjuk, azt a vas-szén ötvözetet nevezzük, melyet vasérből a nagyolvasztóban (kohóban) állítanak elő. Elvileg ennek széntartalma 2,06- 6,67 % között változhat, napjaink gyakorlatában ez az érték csupán 3,5-4,5 % közé esik. A nyersvasat legnagyobb mennyiségben (80-90%-ban) acélgyártási alapanyagként használják fel, de egy kisebb részét (10-20%-ban) az öntészet hasznosítja. Tehát a vas-szén ötvözetet, ha öntészeti célra használják, **öntöttvasnak** nevezik, mivel összetétele közel eutektikus (a likvidusz és a szolidusz közötti hőfokkülönbség még kicsi, kicsi a zsugorodása), tehát jól önthető.

Ezért a gyakorlatban felhasznált öntöttvas széntartalma 3,5-4,5 %.

Attól függően, hogy az öntöttvas a metastabilis vagy a stabilis rendszer szerint kristályosodik, beszélünk **fehér öntöttvasról**, illetve **szürke öntöttvasról**.

A **szürke öntöttvas** törete szürke a benne található grafitzárványok miatt, míg a fehéröntvény törete a benne található vaskarbid miatt fehér (fémes fényű).

A fehér öntöttvas a gyakorlatban nem használható, mivel viszonylag sok cementitet tartalmaz és ezért rideg, kemény, törik, alig megmunkálható. Fehér öntvény akkor keletkezik, ha kisméretű alkatrészeket készítenek öntéssel. A kis tömegű öntvényt nehéz lassan hűteni, így benne a szén vaskarbid formájában válik ki. Az ilyen öntvényben a cementit utólagos hőkezeléssel elbontható, az öntvény **temperöntvénné** alakítható.

Ha a szürkeöntvénynek csak a kopásnak kitett felületi rétegét tesszük kopásállóvá oly módon, hogy az öntőformába fémbetétet helyezünk, így növelve az adott felület mentén a hűlés sebességét, akkor kapjuk eredményül a **kéregöntvényt**.

A szürke öntöttvas grafitlemezek formájában tartalmazza a nem oldódó szenet, ezért **lemezgrafitos vasöntvénynek** nevezik. A viszonylag nagy

lemezek csökkentik az ép keresztmetszetet, valamint feszültséggyűjtő helyeket képeznek. A még folyékony fémfürdőben növelve a kristályosodási középpontok számát, finomabb eloszlású lesz a grafit, ezáltal az öntöttvas szilárdsága kedvezőbb lesz. Ezek a **modifikált vasöntvények**. A lemezes grafitot az öntöttvas magnéziummal történő ötvözésével grafitgömbökké lehet alakítani, így többszörösére növelve a szilárdságot. Az ilyen öntvényt nevezik **gömbgrafitos vasöntvénynek**. (Az öntvényekről részletesebben még a hőkezeléseknél lesz szó.)

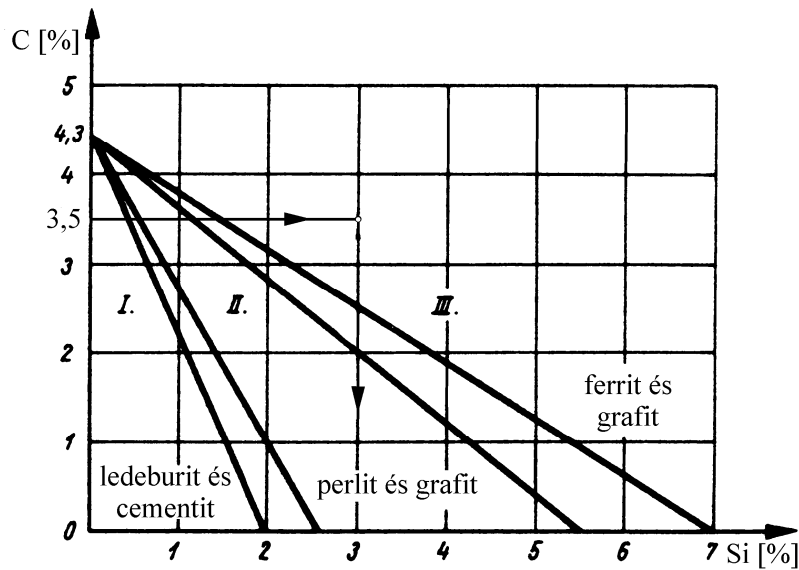
#### 1.4.2.3 Az öntöttvas szövetelem diagramjai

Azt, hogy az eutektikus vas-ötvözetek ömledék állapotból lehűlve és kristályosodva fehér- vagy szürke öntöttvassá szilárdulnak, az állapotábránál bemutatott módon, a hűtés sebessége határozza meg. Az átalakulást azonban ötvözéssel is lehet befolyásolni. Vannak ötvözők, melyek **grafitképzők** (pl. a szilícium), vagyis hatásukra még viszonylag gyorsabb hűtés esetén is a stabilis rendszer szerint megy végbe a kristályosodás, szürkeöntvény jön létre. Más ötvözők, mint a mangán, ellentétes hatású, tehát **karbidképző** elem.

Azt, hogy a két tényező - a hűtési sebesség és a szilíciumtartalom - együttes hatására az öntöttvasak hogyan kristályosodnak, milyen szövetelemekből állnak, az ún. Maurer-diagramból állapíthatjuk meg. A diagram a széntartalom és a szilíciumtartalom hatását mutatja be az öntöttvas szövetszerkezetének alakulására (1.50. ábra). Azért, hogy csupán a szén és a szilícium hatását vizsgálhassuk, a másik tényezőt, a hűtési sebességet állandónak vesszük. Ezt oly módon érjük el, hogy a vizsgálat során mindig légszáraz homokba öntött, 30 mm átmérőjű próbatesteket vizsgálunk.

A Maurer-diagram ordinátatengelyén a széntartalmat, az abszcisszatengelyén a szilíciumtartalmat tüntetjük fel. A diagram az eutektikus összetételtől (4,3 % szén) kiinduló két-két vonalból áll, amelyek lényegében három fő részre osztják a területet. Az I. terület a kis szilíciumtartalmú ötvözeteket foglalja magába. Itt az adott hűtés mellett primer cementites, ledeburitos szövetszerkezet alakul ki, mivel a kevés szilícium még nem idéz elő grafitképződést, tehát *fehér öntöttvas* alakul ki.

A II. mezőben a nagyobb szilíciumtartalom hatására, még kisebb széntartalom esetén is stabilis rendszer szerinti átalakulás jön létre. Itt a szövetszerkezet perlites és a szén grafitlemezek formájában válik ki. Ebben a mezőben cementit csak a perliten belül (a perlit cementitjeként) található. Ez a *perlites szürkeöntvény*.



1.50. ábra Maurer-diagram

Még nagyobb mértékű Si-ötvözéssel elérhető, hogy még a perlit cementitje is elbomlik (III. mező), így az ötvény teljes keresztmetszetében ferritet és grafitot tartalmaz. Ez a *ferrites szürkeöntvény*.

A diagram kettős vonala átmeneti mezőket jelöl, vagyis az egyes mezők között nem éles a határvonal.

Mivel a Maurer-diagramot egy állandó hűtési sebességre szerkesztették meg, nem alkalmas a hűtési sebesség hatásának vizsgálatára.

A Greiner – Klingenstein-diagramban ez úgy válik lehetségessé, hogy az ordinátatengelyen nem a csupán a szén-, hanem a szén- és szilíciumtartalmat együtt ábrázolják és az így felszabaduló abszcisszatengelyen lehet ábrázolni a hűtés sebességét (1.51. ábra).

A tengelyen azért nem a hűtési sebességet, hanem a falvastagságot tüntették fel, mivel a hűtési sebesség arányos falvastagsággal (a vastagabb falú ötvény lassabban hűl, mint a kisebb falvastagságú) és ugyanakkor könnyebben mérhető, mint a hűtés sebessége.

A Greiner-Klingenstein diagram felépítése hasonló a Maurer-diagraméhoz. Két-két vonala kb. 7 % (C+Si) tartalomtól indul és a három fő mezőt a két átmeneti mező választja el. A felső vonalak kissé megtörnek.

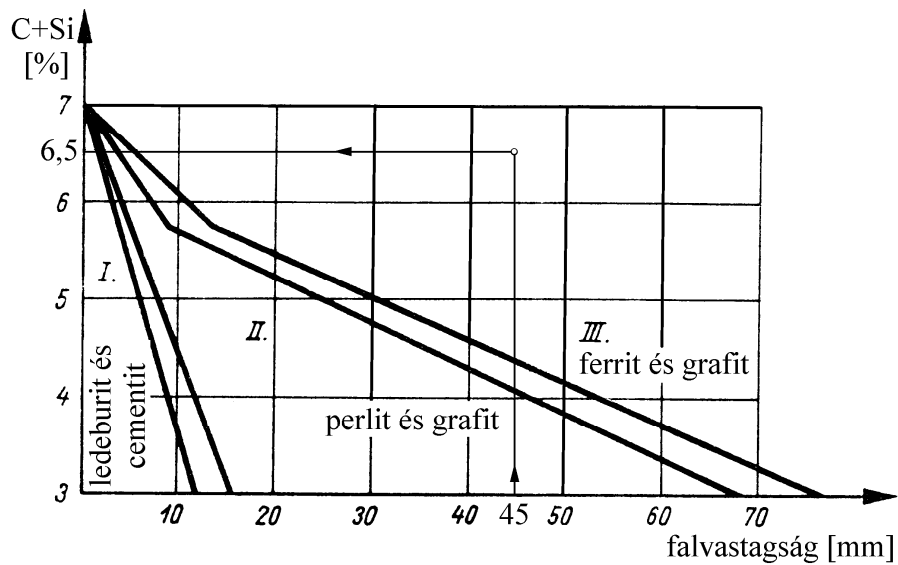
Az egyes mezők a következő szövetelemeket tartalmazzák:

- I. primer cementitet, ledeburitot, tehát fehér öntöttvas,
- II. perlitet és grafitot, tehát perlites szürke öntöttvas,
- III. ferritet és grafitot, tehát ferrites szürke öntöttvas.

Az öntöttvasoknak a két szövetelem ábráját a következőképpen lehet felhasználni szürkeöntvény előállításának megtervezéséhez. A Greiner-Klingenstein diagram alapján megállapítják, hogy a készíteni kívánt ötvény falvastagsága esetén milyen C+Si ötvözés kell a tervezett szövetelem eléréséhez (pl. az 1.51. ábra alapján a 45 mm falvastagság esetén 6,5 % C+Si ötvözésnél alakul ki a tervezett ferrites, grafitos szövetszerkezet). Ennek



alapján a Maurer-diagramból kiolvasható, hogy a 3,5% széntartalmú öntöttvasat 3% szilíciummal ötvözve ferrites, grafitos szövetszerkezetet kapunk.

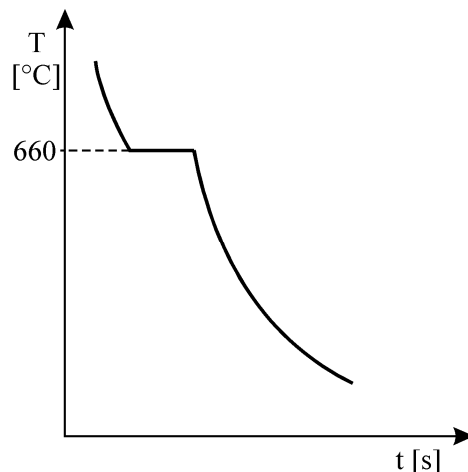


1.51. ábra Greiner-Klingenstein diagram

### 1.4.3 Alumínium ötvözetek egyensúlyi diagramjai

A vas után a második legelterjedtebben használt fém az alumínium. Hűlési görbéje viszonylag egyszerű, mivel nincsenek allotróp módosulatai (1.52. ábra).

Állapotábrái az alap-állapotábráknál ismertetett típusokhoz hasonlít. Többféle elemmel képez ötvözetet, ezek közül az alumínium-réz, valamint az alumínium-szilícium ötvözetrendszer állapotábráit mutatjuk be.



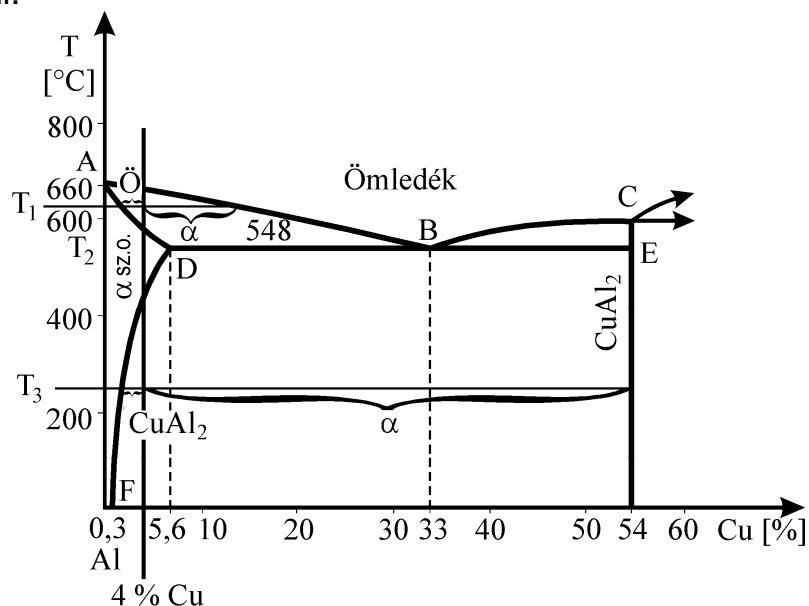
1.52. ábra Alumínium hűlési görbéje

Az alumínium-réz ötvözetek állapotábrája a 1.53. ábrán látható. Az alumínium a réz szilárd állapotban csak korlátozottan oldja (548 °C-on maximálisan 5,6 %-ot), 33 % réztartalomnál és 548 °C-on eutektikum képződik. Az alumínium 54 % réztartalomnál **vegyületet**, *rézaluminátot* ( $\text{CuAl}_2$ ) alkot. Az eutektikum öntészeti felhasználásra alkalmas, de túl sok ötvözőre (33 %-ra) van szükség. Inkább a szilárd oldat típusú ötvözeit használják, mivel ezek jól alakíthatóak. Az ábrában a DF vonal korlátozott oldást jelöl, tehát az alumínium intersztíciósan oldja a rézet.

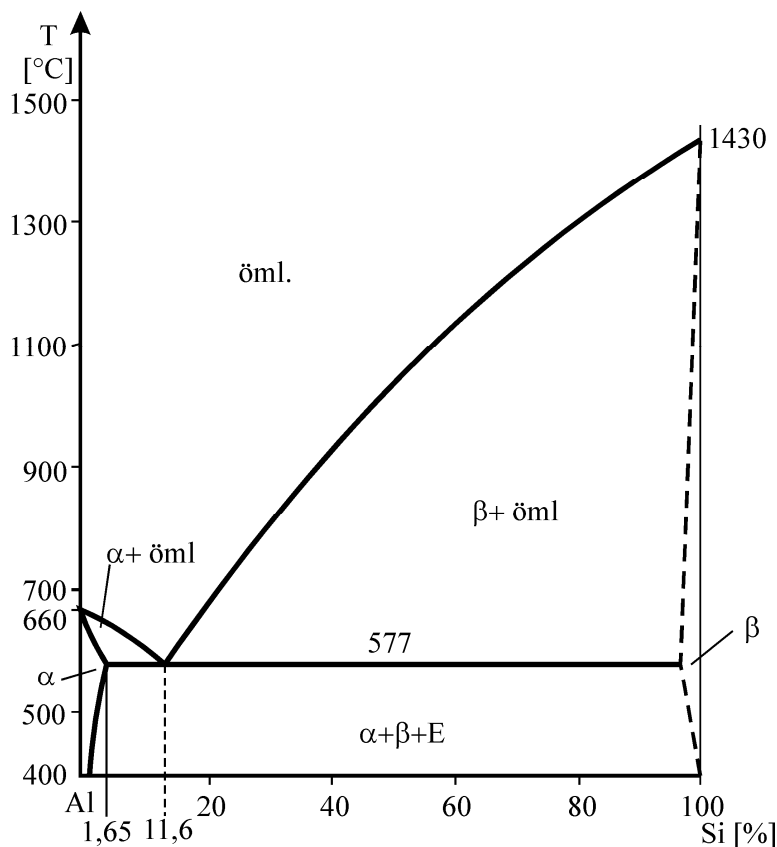
Egy 4 % réz tartalmú ötvözetet vizsgálva a likvidusz hőmérséklete alá hűtve az ötvözet kezd megszilárdulni és  $T_1$  hőmérsékleten már jelentős része szilárd. Az hogy milyen szövetelem kezd megszilárdulni a megmaradt karok segítségével állapítható meg. A karok végpontja az ömledék és az  $\alpha$  szilárdoldat mezővel határos, így a megszilárduló fázis az  $\alpha$  szilárdoldat.

Elérve a szolidusz görbe hőmérsékletét a teljes ötvözet mennyisége  $\alpha$  szilárdoldattá kristályosodik és az oldott rézmennyiséget a DF korlátolt oldhatósági vonal eléréséig oldatban tudja tartani. Ezen a hőmérsékleten azonban az oldat telítetté, majd túltelítetté válik és egy  $T_3$  hőmérsékleten már a réz egy része kivált, és az alumíniummal rézaluminátot képezett. Lehűtve az ötvözet tehát jórészt  $\alpha$  szilárdoldatból és kialakult rézaluminátból áll. Az itt fellépő korlátozott oldás teszi lehetővé az ötvözet hőkezelését, amely az alumíniumról szóló fejezetben lesz szó részletesebben.

Az alumínium ötvözeteknek másik fő típusa az alumínium-szilícium ötvözetrendszer. Állapotábráját a 1.54. ábra mutatja be. Látható, hogy viszonylag kicsi, 11,6 Si %-nál eutektikum jön létre. Az Al-Si ötvözeteket használják öntészeti célra, mivel ezeket csak kis százalékban kell ötvözni az olcsóbb szilíciummal és eutektikum jön létre, ami jól önthető. A szilárdoldat mező nagyon keskeny, így alakításra alkalmas ötvözetekhez más ötvözőket kell használni.



1.53. ábra Al-Cu ötvözetek egyensúlyi diagramja



1.54. ábra Al-Si ötvözetek egyensúlyi diagramja

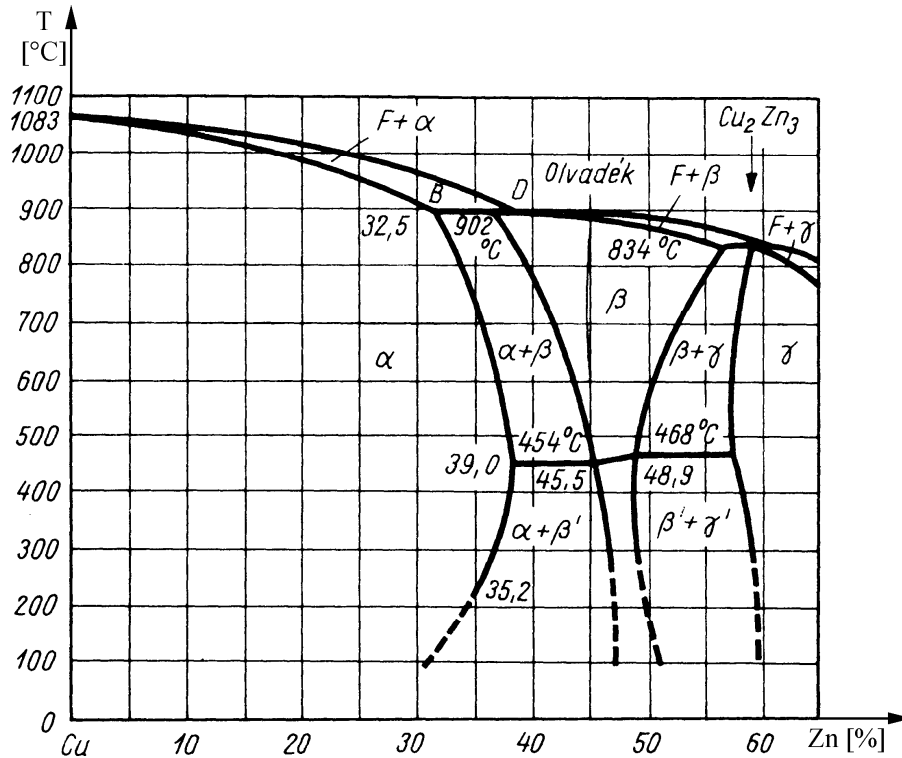
#### 1.4.4. Réz ötvözetek egyensúlyi diagramjai

A réz ötvözeiteinek két fő csoportját említjük itt meg:

- a réz-horgany ötvözetek (sárgarézek),
- a réz-ón ötvözetek (bronzok).

A két ötvözetrendszer egyensúlyi diagramjai jelentősen eltérnek az eddig tárgyalt állapotábráktól, de az egyes részleteik az alapállapotábráknak, az átalakulások az ott ismertetetteknek megfelelnek.

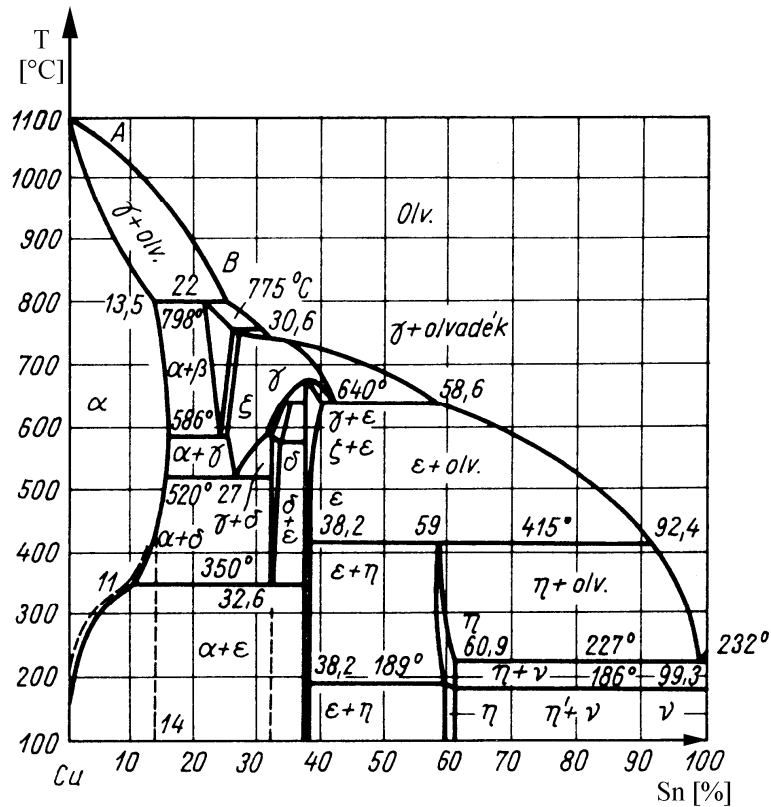
A **Cu-Zn** állapotábrából látható, hogy az alkotók a szilárd oldatok egész sorozatát hozzák létre ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\beta'$ ,  $\gamma$ ,  $\gamma'$ ). Gyakorlati szempontból az  $\alpha$  és a  $\beta$  szilárdoldatoknak van jelentősége (1.55. ábra). Így tehát azoknak az ötvözeteknek van jelentősége, melyek 50 %-nál több rézet tartalmaznak. A kristályosodás az AD vonal mentén kezdődik ezekben az ötvözetekben. A Zn-oldó képesség 902 °C-on 32,5 %. Érdekesség, hogy 454 °C-on több, 39 %.



1.55. ábra Cu-Zn ötvözetek egyensúlyi diagramja

A BD pontok közötti összetétel mezőben 902 °C-on egy reakció játszódik le:  $\alpha$  szilárdoldatból és ömledékből  $\beta$ -szilárdoldat fázis keletkezik. Az ábrán látható, hogy a hőmérséklet csökkenésével a  $\beta$ -fázis mező szűkül, majd a  $\beta$  szilárdoldat a rendezett térrácsú, rideg  $\beta'$  szilárdoldattá alakul. Míg az  $\alpha$  szilárd oldat hidegen is jól alakítható, a nagyobb mennyiségben  $\beta'$  szilárdoldatot tartalmazó ötvözeteket csak melegen lehet alakítani.

A Cu-Sn ötvözeteknek (bronznak) az állapotábráját mutatja be az 1.56. ábra. Ezt az ötvözetet használja az emberiség legrégebben, mintegy 5000 éve. Állapotábrája meglehetősen bonyolult. Jellemző, hogy a likvidusz és a szolidusz első szakaszán nagy dermedési hőközt mutat. Ennek következtében a gyakorlati bronzöntvények mindig rétegesek. A diagram öt különböző fázist tartalmaz.



1.56. ábra Cu-Sn ötvözetek egyensúlyi diagramja

Látható, hogy a 13,5 %-nál kisebb óntartalmú ötvözetek csaknem tiszta  $\alpha$  szilárdoldatból állnak. Az ennél nagyobb óntartalmú ötvözetek szövetszerkezete pedig  $\alpha$  szilárdoldatból és  $\delta$  eutektoidból áll. Az eutektoid viszonylag kemény és rideg. Mennyiségének növekedésével az ötvözet szilárdsága és keménysége nő, egy bizonyos mennyiség felett viszont rideggé válik.

## 2. Anyagvizsgálat

Az anyagvizsgálat az anyagok mechanikai, kémiai, fizikai jellemzőinek meghatározásával, az anyag szerkezetének vizsgálatával és a szerkezeti anyagok helyi hibáinak kimutatásával foglalkozik.

Az anyagvizsgálati eljárások végzésének többféle célja lehet:

1. a tervezési adatok szolgáltatása (az anyagok terhelhetőségét jellemző mérőszámok megadásával),
2. a gyártás technológiájának ellenőrzése,
3. a gépészmérnöki gyakorlatban előforduló káresetek vizsgálata.

Az anyagvizsgálatok eredményeit a gépészmérnöki gyakorlat csaknem minden területe igényli. Módszereit a vizsgálatok célja és jellege szerint rendszerezük. Alapvetően két fő csoportjuk van:

1. roncsolásos anyagvizsgálati eljárások,
2. roncsolásmentes anyagvizsgálati eljárások.

A roncsolásos anyagvizsgálati eljárásokhoz többféle eljárás tartozik:

- mechanikai-szilárdsági vizsgálatok,
- technológiai próbák,
- kémiai vizsgálatok,
- fizikai vizsgálatok,
- fémtani vizsgálatok.

**A mechanikai vizsgálatokkal** az anyagok szilárdsági, törésmechanikai, reológiai és kifáradási tulajdonságait határozzuk meg. A vizsgálatok közvetlenül felhasználható mérőszámokat, anyagjellemzőket szolgáltatnak a méretezés számára.

A *technológiai próbák* segítségével az anyagok bizonyos célra, alakítási módhoz való alkalmasságát állapítjuk meg. A próbák általában az egyes fémfeldolgozási technológiákat modellezik. Ezek szerint alakítási, edzhetőségi, hegeszthetőségi stb. technológiai próbákat ismerünk.

A **kémiai vizsgálatok** legfontosabb feladata a gyártmányok és alkatrészek kémiai összetételének meghatározása. Ide tartoznak a félkész áruk korrózióállóságát és a kész gyártmányok korrózióvédelmét ellenőrző vizsgálatok is.

A **fizikai vizsgálatok** a fémes anyagok elektromos, mágneses, hőtani, akusztikai, optikai stb. jellemzőinek meghatározásával foglalkoznak.

A **fémteni vizsgálatok** célja a fémes anyagok szerkezetének és átalakulási tulajdonságainak meghatározása.

A mechanikai, technológiai, kémiai, fizikai és fémtani vizsgálatok többnyire *roncsolásos* anyagvizsgálati módszerekkel hajthatók végre. Ez azt jelenti, hogy a vizsgálandó alkatrészből, félkész termékből és alapanyagból mintát kell vennünk, illetve ***próbatesteket kell kimunkálnunk***. Emiatt a vizsgált darab

többszörre tönkremegy. A módszerből következik, hogy e vizsgálatok eredményei csak statisztikusan jellemzik a tétel nem vizsgált darabjait.

Az alkatrészek, féltermékek és alapanyagok darabonkénti hibátlanóságáról roncsolásmentes vizsgálatokkal győződhetünk meg. A roncsolásmentes anyagvizsgálat fő területei a *radiológiai* (röntgen és izotóp), az *ultrahangos*, az *elektromos* és a *mágneses* elven működő vizsgálati módszerek. Ezek az eljárások az alkatrészek vagy a szerkezet épségének veszélyeztetése nélkül végezhetőek el.

*Az anyagvizsgálati módszereknek megbízhatóan kell megállapítaniuk a vizsgált tulajdonságot. E megbízhatóság egyik próbaköve a következő. A vizsgált tulajdonság szempontjából egynemű anyagnak egyrészt az ellentétes érdekű (pl. átadó és átvevő) laboratóriumban végrehajtott vizsgálata során, másrészt a vizsgálatot többször megismételve azonos vagy a mérési pontosság megengedett szórási határain belüli eredményt kell adnia.*

Az anyagvizsgálatok egyértelműségét és a megismételhetőséget biztosító szabotosságát úgy érik el, hogy az **eljárásokat kötelező erejű vagy legalább ajánlott szabványokba** (műszaki előírásokba) **foglalták**.

## 2.1 Roncsolásos anyagvizsgálati módszerek

Első lépés a próbatest kimunkálása vagy a **próbaavétel**. A különféle vizsgálatokhoz szükséges próbaanyagot az átveendő tételből úgy kell kimunkálni, hogy a belőlük készített próbatesteken végzett vizsgálatok a tételre jellemző vizsgálati értékeket adják. *Minden vizsgálati eredmény helyessége elsősorban a próbaavétel helyességétől függ.* A különböző fémes anyagokból való próbaavétel módját részletesen az egyes vizsgálati és anyagszabványok írják elő. *A próbatest kialakításának módszere nem változtathatja meg az anyag minőségét.* Káros lehet, pl. a túl nagy fölmelegedés.

### 2.1.1 Mechanikai vizsgálatok

Az anyagvizsgálat során a különféle egyszerű terhelési módok utánzásával állapítjuk meg, hogy alkalmas-e az anyag az üzemelés közbeni igénybevételek károsodás nélküli elviselésére. A vizsgálat folyamán tehát törésig vagy legalábbis nagymérvű alakváltozásig terheljük a próbatesteket. A szerkezeti elemekre, gépalkatrészekre ható igénybevételek - a terhelőerőkből származó feszültségeknek az idő függvényében mutatott értékei szerint - a következő főbb csoportokba sorolhatók:

- statikus igénybevételek,
- *dinamikus igénybevételek.*
- fárasztó igénybevétel.

A **statikus igénybevételek** jellemzője, hogy az igénybevétel időben állandó vagy csak igen lassan és egyenletesen változik. Általában szobahőmérsékleten végzik a szakító-, nyomó-, hajlító-, csavaró- és nyíróvizsgálatokat, valamint a keménységvizsgálatok többségét. Ennél magasabb hőmérsékleten hajtjuk végre a melegsakító, a melegkeménységmérő vizsgálatokat, valamint a felhasználás szempontjából még fontosabb, állandó nyugvó terheléssel, hosszú ideig végzett szakítóvizsgálatokat, az úgynevezett kúszási tulajdonság vizsgálatokat.

**Dinamikus** igénybevételek az egyszeri gyors erőhatások. Vizsgálatukra szolgálnak az ütve - hajlító, ütve - szakító és dinamikus keménységmérési vizsgálatok.

**Fárasztó** igénybevétel az a terhelés, amelynek során az erő periodikusan változik, ismétlődik. A fárasztóvizsgálat a sokszor ismétlődő terhelések hatásának mérésére szolgál. Az igénybevétel módja szerint lehet: húzó, nyomó, húzó-nyomó, hajlító, hajtogató, forgó-hajtogató vagy csavaró. Ritkábban ütve-fárasztó és korróziós fárasztóvizsgálatokat is végeznek. A fárasztóvizsgálatok általában szerkezeteken, szerkezeti elemeken, alkatrészeken és a szerkezet vagy az alkatrész anyagából készített próbatesteken végzik. A felsorolt igénybevételi módok egyszerre is előfordulhatnak. Ilyenkor azt a vizsgálati módot célszerű választani, amely az anyagra a legnagyobb igénybevételt jelenti, illetve a legsúlyosabb károsodást okozza.

A mechanikai vizsgálatok eredményei általában még az egynemű, azonos anyagnál is több-kevesebb szórást mutatnak. Alapvető fontosságú, hogy az ilyen különböző értékekből melyiket használhatjuk az anyag jellemzésére. Régebben az egyszerűen számítható középértéket használták. Ez csak akkor engedhető meg, ha a középérték és az alsó, illetve a felső határérték közötti különbség nem nagy, és az alsó határérték is nagyobb a megkívánt értéknél.

Sok vizsgálati eredmény birtokában úgynevezett gyakorisági diagramot célszerű készíteni, és a legnagyobb gyakoriság adja a vizsgált anyag jellemző értékét.

#### *2.1.1.1. Szakítóvizsgálat*

Célja a szerkezeti anyagok húzó igénybevétellel szembeni viselkedésének vizsgálata, a szilárdsági és képlékenységi jellemzők meghatározása.

A szakítóvizsgálat folyamán a vizsgálandó anyagból készített próbatestet állandó sebességgel húzva elszakítjuk, miközben mérjük a próbatest **megnyúlását** és a próbatest alakváltozásához szükséges **erőt**.

A szakítóvizsgálathoz a vizsgálandó anyagból **szabványos próbatesteket kell kimunkálni**.

A szabványos próbatest (2.1. ábra) betűjelzései a következőket jelentik:

**L<sub>t</sub>** - a teljes hossz (a próbatest hossza a fejrésszel együtt) [*mm*];

**L<sub>c</sub>** - a vizsgálati hossz (a próbatest hengeres vagy hasáb alakú részének hossza a fejrész és az átmeneti részek nélkül) [*mm*];



- $L_0$  - az eredeti jeltávolság (a próbatest vizsgálati hosszán kijelölt szakasz, amelyen a nyúlást mérjük) [mm];
- $d_0$  - a hengeres próbatest vizsgálati hosszának átmérője [mm];
- $a$  - a hasáb alakú próbatest vastagsága [mm];
- $b$  - a hasáb alakú próbatest vizsgálati szélessége [mm];
- $S_0$  - a vizsgálati szakasz eredeti keresztmetszete [mm<sup>2</sup>].

Az olyan próbatesteket, amelyek geometriailag hasonlóak, keresztmetszetük és jeltávolságuk között meghatározott arány áll fenn, **arányos próbatesteknek** nevezzük. Ez az összefüggés nemzetközi megállapodás alapján:

$$L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0} \text{ [mm]},$$

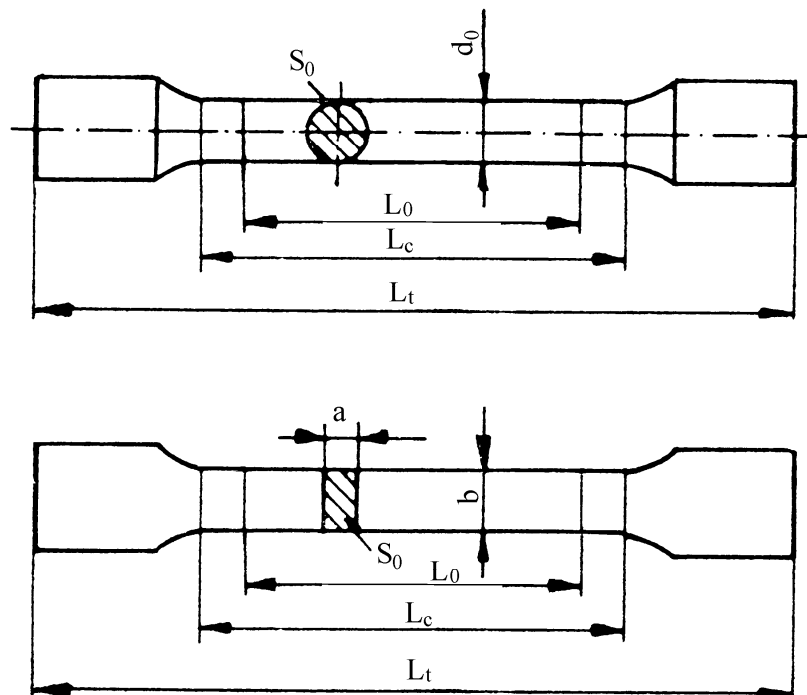
ami a kör keresztmetszetű próbatesteknél  $L_0 = 5d$  értéket jelent.

A derékszögű négyszög keresztmetszetű próbatest oldalainak aránya nem haladhatja meg a 8:1 értéket.

A fejjel ellátott próbatestek vizsgálati hossza és fejrésze közötti átmenet nem lehet éles; mindig le kell kerekíteni. A 3 mm-nél vékonyabb lemezekből készített próbatestek is derékszögű négyszög keresztmetszetűek, és a vastagságuk megegyezik a lemez vastagságával.

A szakítóvizsgálat előtt a próbatesteken az erre a célra készült pontozóval vagy az úgynevezett próbapálca-osztógépen készített karcokkal jelöljük be az  $L_0$  hosszúságot.

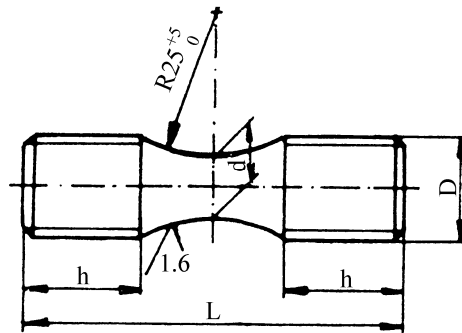
Az **öntöttvasaknak** olyan kicsi a maradó nyúlása, hogy az anyag jellemzésére nem alkalmas. Ezért az öntöttvasak vizsgálatára olyan próbatesteket készítenek, amelyek csak a szakítószilárdság meghatározására (2.2. ábra ) alkalmasak.



## 2.1. ábra A szabványos próbatest betűjelzése

Az ábrán látható betűjelzések a következőket jelentik:

- d** - a próbatest névleges átmérője [mm],
- D** - a menetes fej átmérője [mm],
- h** - a próbatest fejének hossza [mm],
- L** - a próbatest teljes hossza [mm].



## 2.2. ábra Öntöttvas próbatest

A szakítógépek feladata, hogy lehetővé tegyék a próbatestek központos befogását, lassan, lehetőleg egyenletesen növekvő erővel terheljék őket (a terhelés növekedése maximum  $30 \text{ N/mm}^2$  másodpercenként) és mérjék a terhelőerőt, sőt a próbatest nyúlását. A korszerű szakítógépek az erőt - mint a próbatest megnyúlásának függvényét - diagramban rajzolják fel, de egyben lehetővé teszik az erő pillanatnyi értékének közvetlen leolvasását is.

Az **erő mérési módja** szerint a szakítógépek a következő csoportokba sorolhatók:

- ingás mechanikus vagy hidraulikus,
- futósúlyos és
- elektromos szakítógépek.

**A megnyúlás** mérhető:

- mechanikus áttétellel,
- elektronikusan.

Az **ingás mechanikus** erőméréssel és mechanikus áttételű megnyúlásmérővel kialakított szakítógép elvi vázlatát a 2.3. ábra szemlélteti. Az erőmérés folytonosságát az ingás erőmérő mérleg biztosítja, amelynek karáttételes elvi megoldását is az ábrán látható. Működésének lényege, hogy

a próbatestet terhelő F húzóerő megfelelő karáttétellel, jóval kisebb  $F_1$  értékre csökken. Ez az  $F_1$  erő mindenkor növekedésének megfelelő mértékben forgatja el nyugalmi helyzetéből a G súlyú ingát a K- forgáspont körül.  
*A K- forgáspontra a nyomaték egyensúlyának megfelelően felírható:*

$$G \cdot l_1 \cdot \sin \alpha = F_1 \cdot l_3 \cdot \cos \alpha,$$

$$F_1 = G \cdot \frac{l_1}{l_3} \cdot \operatorname{tg} \alpha.$$

A szakítógép szerkezetének megfelelő méretei alapján:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{z}{l_2}.$$

Ezt az előbbi egyenletbe helyettesítve:

$$F_1 = \frac{G \cdot l_1}{l_2 \cdot l_3} \cdot z = C \cdot z$$

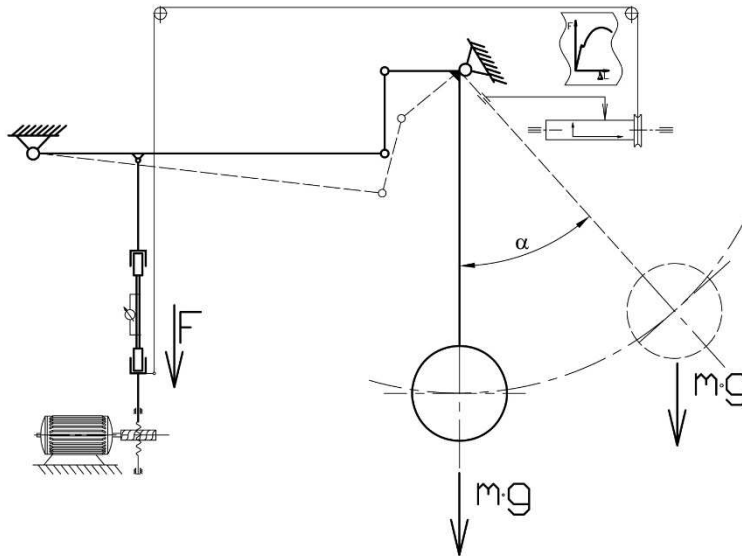
Adott G-súly esetén a tört értéke állandó. A diagramíró írszerkezetének elmozdulása tehát arányos az F erővel. A C- arányossági tényezőt az erőmérő berendezés **erőléptékének** nevezik. A cserélhető G-súly lehetővé teszi az erőlépték (mérési tartomány) megváltoztatását. **A** diagrampapírt a diagramíró dob palástjára erősítik. A dobot a gép mozgatott befogófejéhez rögzített zsinór mozgása elfordítja. A **megnyúlás** tehát a dob kerülete irányában rajzolódik a diagrampapírra. Ha a megnyúlás léptékét változtatni akarjuk, a zsinórt a dob más átmérőjű részére kell csévélni. Ezekon a nyúlásmérőkön a nyúláslépték tetszőlegesen nem változtatható.

A korszerű szakítógépeken mind az **erőt**, mind a **megnyúlást** villamos úton mérik. A villamos erőmérő berendezés cserélhető, így a korszerű gépek a newton - kilonewton nagyságrend közötti mérésekre egyaránt alkalmasak.

A próbatest megnyúlása - villamos úton - 1:1-től 1:1000, sőt szükség esetén nagyobb mértékben is kinagyítható. E gépeknek nagy tömegű mozgó alkatrészük nincs, tehetetlenségi erők tehát alig lépnek fel.

A szakítógép értékét alapvetően egyetemes alkalmazhatósága, merevsége és az erő, illetve megnyúlás mérésének pontossága és megbízhatósága határozza meg.

**Az egyetemes alkalmazhatóság** alatt a sokrétúséget kell érteni. A szakítógép egyaránt alkalmazható a legkülönbözőbb jellegű igénybevétel létrehozására: húzásra, nyomásra, hajlításra stb. Alkalmazható lassú és gyors, időben változó pulzáló terhelésekre, alacsonyabb és magasabb hőmérsékleteken.



2.3. ábra Szakítógépek ingás mechanikus erőméréssel és mechanikus nyúlásméréssel

**A szakítógép merevségét** a látszólagos rugalmassági együtthatójával jellemzik (MSz 105/30). Ezt  $K$ -val jelölik, és értékét mm/N-ben adják meg. Annál merevebb a szakítógép, minél kisebb  $K$ -értéke:

- villamos (elektronikus) szakítógépek:  $K = 10^{-3}$ - $10^{-4}$  mm/N
- hidraulikus szakítógépek:  $K = 10^{-2}$ - $10^{-3}$  mm/N
- mechanikus ingás szakítógépek:  $K \geq 10^{-2}$  mm/N.

**A szakítógép mérési pontosságát** a  $p = \frac{\bar{x}_i - x}{x_i} \cdot 100[\%]$  mutatóval jellemzik,

ahol  $\bar{x}_i$  a hitelesítés során mért értékek átlaga,  $x$  az etalon (hiteles) érték. Fémes anyagok vizsgálatára alkalmas gép pontossága 1% alatt kell, hogy legyen. A gép mérési megbízhatóságát 20 mérés során kapott legnagyobb  $x_i$  és a legkisebb  $x_i$ - érték közti különbség jellemzi.

A szakítógépek írószerkezete a vizsgálat során fellépő és változó szakítóerő függvényében rajzolja fel a próbatest megnyúlását. Az így kapott diagram a **szakítódiagram**. A kis széntartalmú acél szakítódiagramját a 2.4. ábra szemlélteti.

Betűjelzéseinek jelentése:

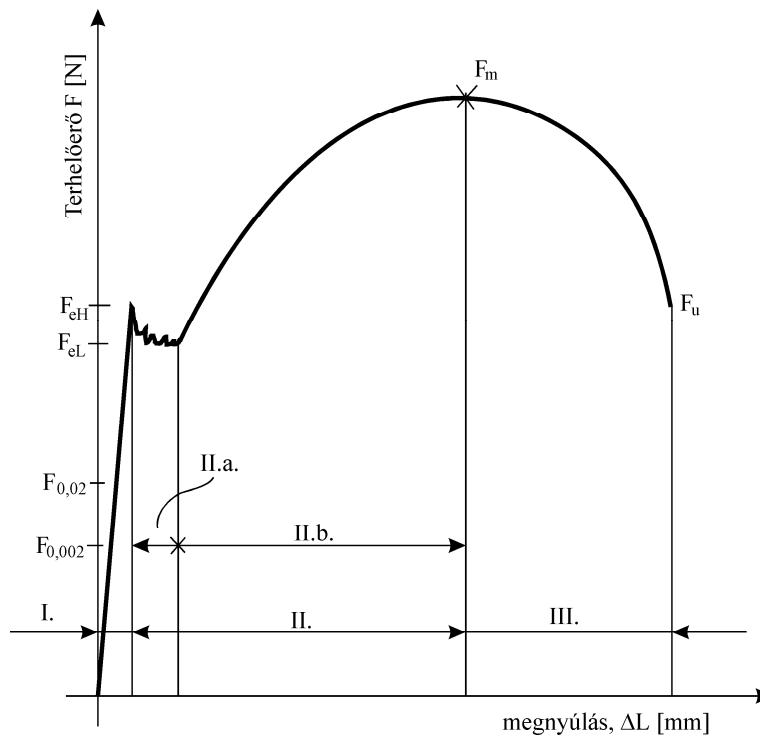
$F_{0,02}, F_{0,002}$  - az egyezményes rugalmassági határ erőszükséglete 0,02%,

illetve 0,002% maradó megnyúlást okozó erő [N];

$F_{eH}$  - a felső folyáshatár erőszükséglete (a folyást megindító erő) [N];

$F_{eL}$  - az alsó folyáshatár erőszükséglete (a folyást fenntartó erő) [N];

- $F_m$  - a vizsgálat folyamán fellépő maximális erő [N];  
 $F_u$  - a szakadás pillanatában mérhető erő [N].



2.4. ábra Kis széntartalmú acél szakítódiaagramja

A diagramon három szakasz különböztethető meg:

**Az I. szakasz a rugalmas alakváltozás szakasza.** Jellemzője, hogy *makroméreteken a próbatest csak rugalmas alakváltozást szenved.* (Az elcsúszás szempontjából kedvező helyzetű kristallitokban végbemenő képlékeny alakváltozást itt nem vesszük figyelembe.) Úgy tűnik, hogy ha ebben a szakaszban megszüntetjük a terhelést, a diagramíró szerkezet rajzolóeleme - a diagram vonalán haladva - visszatér az origóba. Ezt azonban csak a gép pontatlansága okozza. **A fémek és ötvözetek csupán a fizikai vagy valódi rugalmassági határig szenvednek rugalmas alakváltozást.** Az ehhez tartozó erő mérése azonban nehézkes, értéke acélok esetén is igen kicsi.

**Az egyezményes rugalmassági határ erőszükségletének azt az erőt fogadják el, amely 0,002 % (kevésbé szigorú előírás esetén 0,02 %) maradó megnyúlást okoz.** A rugalmassági határ nagy pontosságú nyúlásméréssel határozható meg. A fémek és ötvözetek csak a fizikai rugalmassági határig követik a **Hooke-törvényt**. Az I. szakaszon a teljes megnyúlás ( $\Delta L_{\sigma}$ ) két részre osztható: a rugalmas ( $\Delta L_r$ ) és a maradó megnyúlásra ( $\Delta L_m$ ).

Vagyis

$$\Delta L_{\sigma} = \Delta L_r + \Delta L_m.$$

**A II/a szakasz a határozott folyás szakasza.** A folyás kezdetével a próbatest teljes hosszában megindul a maradó alakváltozás, vagyis az atomsíkok egymáson való elcsúszása. Előfordul, hogy a folyás kezdete után az erő csökken, és majdnem állandó marad. E jelenség azzal magyarázható, hogy a kis atomátmérőjű ötvöző- vagy szennyező elemek atomjai úgy helyezkedhetnek el, hogy akadályozzák a diszlokációk mozgását. Ezért nagyobb erőre ( $F_{eH}$ ), illetve feszültségre van szükség, hogy a "leblokkolt" diszlokációk mozgása megkezdődjék. Ha a diszlokációk elmozdulásuk közben elszakadtak a mozgásukat gátoló atomoktól, az alakítás erőszükséglete ( $F_{eL}$ ) csökken és megkezdődik a képlékeny alakváltozás, a **folyás**.

**A II/b szakasz az egyenletes nyúlás szakasza.** A próbatest minden keresztmetszetében a folyáshatár erőszükségleténél nagyobb erő hatására csaknem egyenletes mértékű képlékeny alakváltozás indul meg, amely mikroméretekben nem egyenletes. A képlékeny alakváltozás, vagyis az elcsúszás, a legkedvezőbb orientációjú szemcsékben az úgynevezett csúszókötegekben megy végbe. A csúszókötegek sok egymáshoz igen közel levő csúszósíkból állnak, amelyekben az elcsúszás végbement. Az elcsúszás hatására a "képlékeny alakváltozott" rész keményedik. A továbbiakban a többi, meg nem keményedett anyagrészben egy másik csúszókötegekben indul meg a csúszás. A növekvő megnyúláshoz - a keményedés miatt - növekvő erő tartozik. A szakítás során - az  $F_m$  erőig - a próbatest minden egyes keresztmetszetében közelítőleg egyenletes az alakváltozás, megnyúlás.

**A III. szakasz a kontrakciós szakasz.** Az  $F_m$  erő elérése után már csak meghatározott csúszósíkok mentén következik be elcsúszás, és így a próbatestben csak helyi alakváltozás megy végbe. Az így keletkező helyi keresztmetszet csökkenés a kontrakció. A kontrakciós keresztmetszetben létrejövő nagymértékű alakváltozás hatására a csúszási kötegek csúszósíkjainak alakváltozó képessége fokozatosan kimerül. A csúszókötegek metsződésében - a fázis-, illetve krisztallihatárokon - mikrorepedések, majd mikroüregek keletkeznek. A külső húzóterhelés igyekszik "kinyitni" ezeket a repedéseket, illetve mikroüregeket, következésképpen folyamatos, összefüggő törésfelületté alakulnak.

A szakadás az  $F_u$  terheléskor következik be. A próbatest szakítás alatti alakváltozását a 2.5. ábra szemlélteti.

A következőkben különböző anyagok jellegzetes szakítódigramjait (2.6. ábra) mutatjuk be. A 2.6/a. ábrán a szürke öntöttvas, a 2.6/b. ábrán pedig az edzett acél szakítódigramjai láthatók. Mindkét anyag rideg, csak rugalmas alakváltozást szenved, majd elszakad. A 3.6./c. ábrán számos sárgarézfajta és alumíniumötvözet szakítódigramja szemléltethető. A rugalmas alakváltozás a megkezdődött maradó alakváltozás jeléül lassan laposodó görbébe megy át. A szakadás helyi kontrakció nélkül következik be.

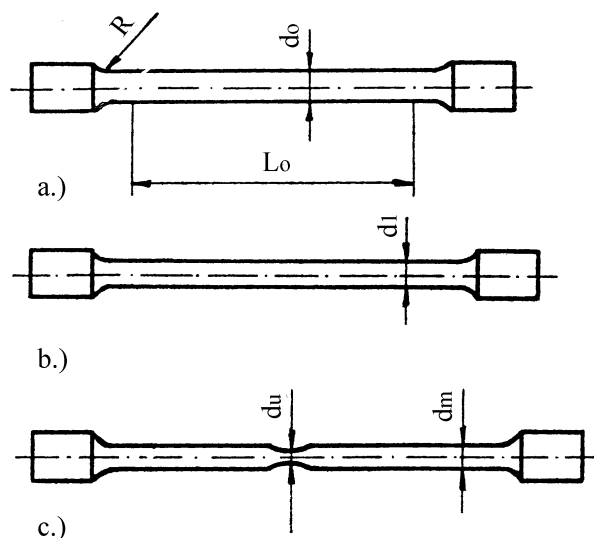
Hidegen alakított acéloknak, a nemesített acéloknak, valamint pl. a réznek és a nikkelnak a szívós anyagokra jellemző szakítódiaagramjuk (2.6/d. ábra) van. Hiányzik belőlük a határozott folyás szakasza. A 2.6/e. ábra szerinti szakítódiaagram a lágyacélra jellemző. A horganyon, valamint a hidegen, erősen alakított rézhuzalokon, alumínium lemezekben állapítható meg a 3.6/f. ábra szerinti diagram. Ezek az anyagok a rugalmas alakváltozást követően rövid nyúlás után kontrahálódnak. A 2.6/g. ábra egy képlékeny anyag (pl. ólom) szakítódiaagramját szemlélteti. A diagramnak csak maradó alakváltozási része van. A vizsgálat folyamán a próbatest jelentékenyen nem keményedik, mert alakváltozása az újrakristályosodási (lágylási) hőmérséklete felett megy végbe.

### A fémek, ötvözetek szilárdsági jellemzői

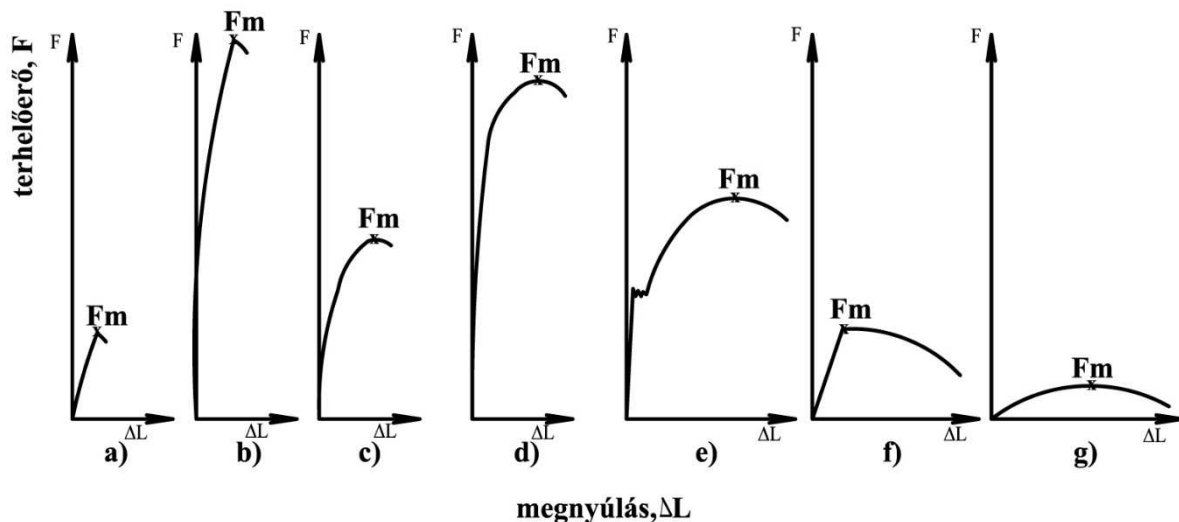
Az adott anyagból készített próbatest szakítóvizsgálata alapján meghatározhatók az anyag szilárdsági és képlékenységi jellemzői.

Az anyagok **szilárdsági jellemzőit** - mint anyagtulajdonságokat - az anyagvizsgálati szabványok *R* betűvel jelölik, a *resistance* francia szó rövidítése alapján. Magyarul ellenállást jelent. A feszültségeket külső erők (pl. terhelések) és belső okok (pl. hőkezelési elhúzóerők) ébresztik. A húzófeszültséget  $\sigma$  görög betűvel jelölik.

**A szilárdság és a terhelő feszültség - azonos mértékegységű - értékek összehasonlíthatósága teszi lehetővé az alkatrészek méretezését.**



2.5. ábra A próbatest alakváltozása a szakítás folyamán  
a.) kezdeti állapot, b) az egyenletes nyúlás szakasza (II/b. szakasz),  
c) kontrakciós szakasz (III. szakasz)



2.6. ábra Különböző fémek jellegzetes szakítódiagramja

a) szürke öntöttvas, b) edzett acél, c) sárgaréz, alumíniunötvözetek, d) nemesített acél, e) lágyacél f) hidegen alakított rézhuzal, alumínium lemez, g) ólom

A **szakítószilárdságot** ( $R_m$ ) úgy határozzuk meg, hogy a próbatest szakítóvizsgálata folyamán mért maximális erőt osztjuk a próbatest eredeti keresztmetszetével:

$$R_m = \frac{F_m}{S_o} \quad [N/mm^2].$$

$F_m$  - a szakítás folyamán mért maximális erő  $[N]$ ,

$S_o$  - a próbatest eredeti keresztmetszete  $[mm^2]$ .

A szakítószilárdság **nem valódi feszültség**, mert az  $F_m$  erőhöz a próbatest megnyúlása miatt - a térfogatállandóságból eredően - már nem az  $S_o$ , hanem kisebb keresztmetszet tartozik. Az anyagok húzó igénybevételre való terhelhetőségének meghatározási módját a nemzetközi szabványokban mégis azért rögzítették így, mert az  $F_m$  és az  $S_o$  szabatosan mérhető. Igaz a tényleges keresztmetszet még csak kis mértékben tér el az  $S_o$  eredeti keresztmetszettől, mivel a megnyúlás egyenletesen, a próbatest teljes hosszában végbemegy.

A **folyáshatár** a határozott folyás jelenségét mutató anyagféleségek próbatestjein határozható meg. Abból a terhelőerőből számítható, amelynél az erőszükséglet először csökken vagy állandósul a mérés során. A "határozott" folyás a nagymérvű maradó alakváltozás kezdete. Az erő ilyenkor csökken, illetve ingadozik. *Nagyon fontos követelmény, hogy a folyáshatár mérésekor az alakváltozás sebessége nem haladhatja meg a szabványban rögzített*



értéket. A folyáshatár ugyanis nagymértékben függ az alakváltozás sebességétől. Mérésekor a *terhelés sebessége* 3-30  $\left[ \frac{N}{mm^2 \cdot s} \right]$  lehet.

**A felső folyáshatár ( $R_{eH}$ )** a 3.4. ábrán bemutatott szakítódiagram alapján határozható meg:

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_o} \quad [N/mm^2].$$

$F_{eH}$  - a folyást megindító erő, vagyis a felső folyáshatár erőszükséglete [N]  
 $S_o$  - a mérés előtti keresztmetszet [mm<sup>2</sup>]

A folyási folyamat megindításához mindig nagyobb erő ( $F_{eH}$ ) szükséges, mint a folyamat fenntartásához ( $F_{eL}$ )

**Az alsó folyáshatár ( $R_{eL}$ ):**

$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_o} \quad [N/mm^2],$$

$F_{eL}$  - a folyás közben mért legkisebb erő, az ingadozás legkisebb ereje [N]  
 $S_o$  - a mérés előtti keresztmetszet [mm<sup>2</sup>].

**Kontrakciós szilárdság ( $R_u$ ):**

A diagram utolsó szakasza a **kontrakciós szakasz**. Az  $F_m$ -mel jelölt ponttól, a próbatest már nem teljes hosszában, egyenletesen nyúlik, hanem csak egy konkrét keresztmetszetben, de ott jelentősen (pl. 40%-kal). A lecsökkent keresztmetszetben ( $S_u$ ) úgy megnő a feszültség, hogy ez szakadáshoz vezet. A szakadást létrehozó erő a kontrakciós erő  $F_u$ . A szakadást létrehozó terhelés (feszültség) a kontrakciós szilárdság  $R_u$ :

$$R_u = \frac{F_u}{S_u} \quad [N/mm^2]$$

Látszólag úgy tűnhet, hogy a vizsgálat során a próbatest egy nagyobb terhelőerőnél ( $F_m$ ) nem, egy kisebbnél ( $F_u$ ) viszont eltörik. Azt kell látni, hogy a próbatestben ébredő  $F_m/S_o$  feszültség jóval kisebb, mint az  $F_u/S_u$  szakadást létrehozó feszültség, mert az  $S_u$  kontrahált keresztmetszet sokkal kisebb, mint a közel eredeti keresztmetszet ( $S_o$ ).

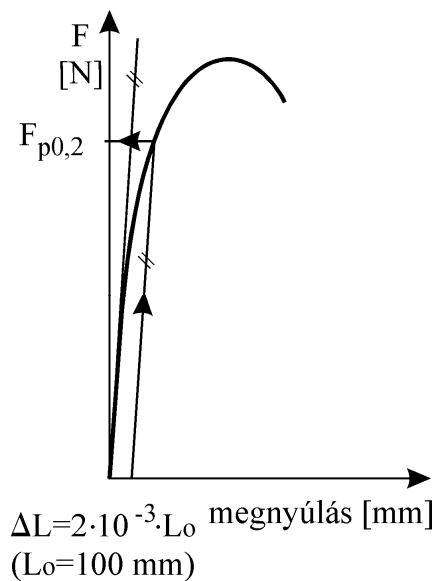
Ha az anyagnak nincs határozott folyási szakasza, mint pl. a hidegen alakított fémeknek, ötvözeteknek, nemesített acéloknak (3.6/d. ábra) a terhelt állapotban mért egyezményes folyáshatárt határozzuk meg, ez lehet a méretezés alapadata.

**A terhelt állapotban mért egyezményes folyáshatár az a feszültség ( $R_{p0,2}$ ), amely 0,2% maradó alakváltozást hoz létre.** Úgy határozzuk meg, hogy a szakítódiagram abszcissza tengelyén a 0,2%-os megnyúlást jelentő pontból ( $\Delta L_m$ ) húzunk párhuzamost a szakítódiagram kezdeti, **egyenes szakaszával**

(2.7. ábra). Az egyenes, ahol metszi a görbét, a metszéspontot az ordináta tengelyre vetítve kapjuk az egyezményes folyáshatár erőszükségletét ( $F_{p0,2}$ ), amelyből a terhelt állapotban mért **egyezményes folyáshatárt**, az eredeti keresztmetszettel osztva, kapjuk meg:

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_o} \quad [N/mm^2].$$

Olyan fémek szakítóvizsgálata esetén, amelyeknek szakítódiagramján nincs kezdeti egyenes szakasz, a várható egyezményes folyáshatárnak megfelelő terhelés után kb. 0,1-ére csökkentjük a terhelőerőt, majd ismét terheljük a próbatestet. A diagram ezen újabb terhelési szakaszán már található olyan egyenes rész, amellyel a párhuzamos meghúzható.



2.7. ábra Terhelt állapotban mért egyezményes folyáshatár meghatározása

**Az egyezményes vagy mérnöki rugalmassági határon** ( $R_{p0,02}$ ;  $R_{p0,002}$ ;  $R_{r0,02}$ ;  $R_{r0,002}$ ), **olyan feszültséget értünk, amely 0,02 vagy 0,002% maradó alakváltozást okoz** (2.8. ábra). A rugalmassági határt kétféle módon határozhatjuk meg:

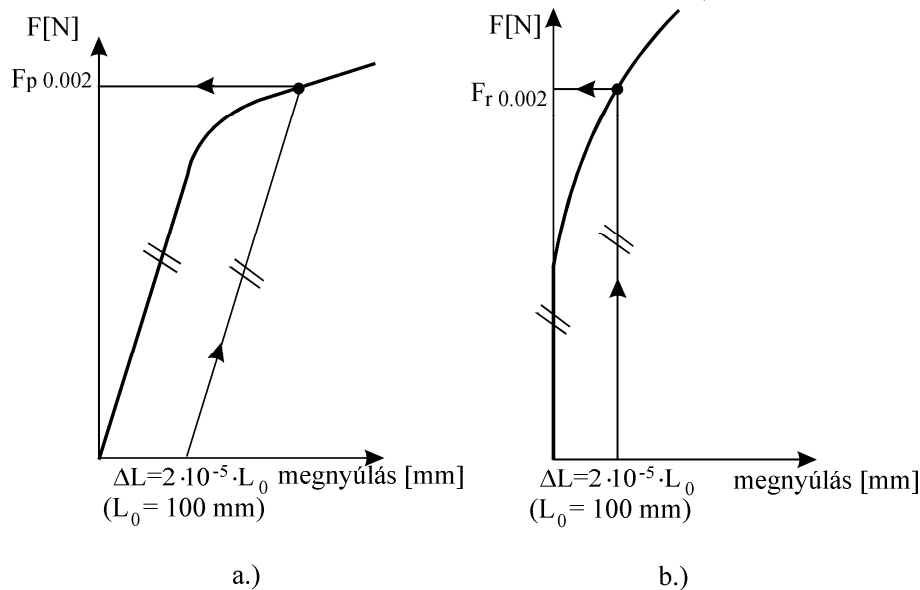
1. terhelt állapotban,
2. terheletlen állapotban.

**Terhelt állapotban történő vizsgálat során** fokozatosan növekvő húzóterhelést alkalmazunk, minden terhelési fokozatban 15 s-ig állandó értéken tartjuk az terhelést, és ezalatt meghatározzuk a próbatest megnyúlását. Ekkor a megnyúlásokat regisztráló műszer az összes alakváltozást ( $\Delta L_{\sigma} = \Delta L_r + \Delta L_m$ ) méri. A rendelkezésre álló nyúlásmérő műszer pontosságától függően a 0,02 vagy 0,002% megnyúláshoz tartozó terhelőerőt ( $F_{p0,02}$ , illetve  $F_{p0,002}$ ) grafikus úton, a következőképpen határozzuk meg. Az  $F = f(\Delta L_{\sigma})$  diagram abszcisszáján a 0,02 illetve 0,002% megnyúlást jelentő pontból párhuzamost húzunk az  $F = f(\Delta L_{\sigma})$  diagram kezdeti, egyenes

szakaszával (2.8/a. ábra). Az egyenes kimetszi a görbéből az egyezményes rugalmassági határ erőszükségletét -  $F_{p0,02}$ ;  $F_{p0,002}$  - amelyből a terhelte állapotban mért egyezményes rugalmassági határ az eredeti keresztmetszettel történő osztással kapható meg:

$$R_{p0,02} = \frac{F_{p0,02}}{S_o}, \text{ illetve } R_{p0,002} = \frac{F_{p0,002}}{S_o} \quad [N/mm^2]$$

A terhelte állapotban mért rugalmassági határt, illetve erőszükségletét  $p$  index jelöli ( $R_{p0,02}$ ,  $F_{p0,02}$ ).



2.8. ábra Egyezményes (mérnöki) rugalmassági határ meghatározása  
a) terhelte állapotú vizsgálat, b) terheletlen állapotú vizsgálat

**Terheletlen állapotban mért megnyúlásokkal** a rugalmassági határt fokozatosan növelt terhelésekkel úgy határozzuk meg, hogy minden terhelési fokozaton 15 s-ig állandó értéken tartjuk az erőt, majd a húzóerőt megszüntetjük. Minden terhelési fokozat után terheletlen állapotban mérjük a próbatest megnyúlását. Ekkor a finom-nyúlásmérő műszer csak a maradó ( $\Delta L_m$ ) alakváltozást regisztrálja (2.8/b.). A terhelést fokozatosan addig növeljük, amíg 0,002 vagy 0,02%-nál nagyobb maradó megnyúlás nem adódik. Az  $F = f(\Delta L_m)$  diagram abszcisszáján a 0,02 illetve 0,002% megnyúlást jelentő pontból ugyancsak párhuzamost húzunk a diagram kezdeti szakaszával (ez most magával a tengellyel is párhuzamos). Az egyenes kimetszi a görbéből az egyezményes rugalmassági határ erőszükségletét -  $F_{r0,02}$  illetve  $F_{r0,002}$  (3.8/b. ábra). A terheletlen állapotban kimért egyezményes rugalmassági határt a következő összefüggéssel határozzuk meg:

$$R_{r0,02} = \frac{F_{r0,02}}{S_o}, \text{ illetve } R_{r0,002} = \frac{F_{r0,002}}{S_o} \quad [N/mm^2].$$

## Képlékenységi anyagjellemzők

A képlékenységi (alakíthatósági) jellemzők a **fajlagos nyúlás** és a **fajlagos keresztmetszet-csökkenés** (kontrakció).

A próbatest valamely kiválasztott differenciálisan kicsi szakasza a szakítás során  $dL$  hosszúsággal megnyúlik. Ez az alakváltozás (megnyúlás) vonatkoztatható a kiválasztott szakasz kezdeti ( $L_0$ ) vagy pillanatnyi hosszára ( $L$ ).

A **fajlagos mérnöki nyúlás** ( $L_0$ -ra vonatkoztatva)  $d\varepsilon = \frac{dL}{L_0}$  viszonytal fejezhető ki.

A **logaritmusos vagy a valódi nyúlás**, amely a pillanatnyi, vagyis a megváltozott hossz alapján számítható:

$$d\varphi = \frac{dL}{L}.$$

A fémes szerkezeti anyagok szakítóvizsgálatakor szabványos anyagjellemzőként a **szakadási nyúlást** ( $A$ ) határozzák meg. Az  $A_5$  az  $L_0 = 5d_0$  mérési alaphossz százalékban meghatározott fajlagos nyúlása.

**Az arányos próbatest szakadási nyúlása:**

$$A_5 = \frac{L_u - L_0}{L_0} 100 \quad [\%],$$

$L_u$  - a megváltozott mérési alaphossz, szakadás után összeillesztett helyzetben mérve  $[mm]$ ,

$L_0$  -  $5d_0$  mérési alaphossz  $[mm]$ .

Az anyagok alakváltozásának mértékét nemcsak a fajlagos hosszváltozással, hanem a fajlagos keresztmetszet-csökkenéssel is megadhatjuk. A keresztmetszet csökkenés az eredeti ( $S_0$ ) és a pillanatnyi (megváltozott) keresztmetszet ( $S$ ) alapján határozható meg. A **fajlagos keresztmetszet-csökkenés** (kontrakció):

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} 100 \quad [\%],$$

ahol  $S_u$  a próbatest kontrahált részén mérhető legkisebb keresztmetszet  $[mm^2]$ .

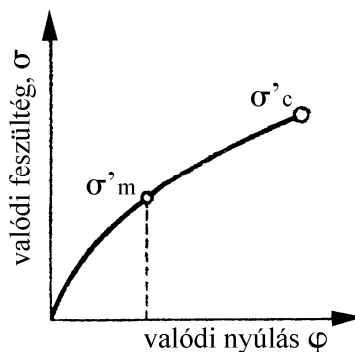
Az anyagvizsgáló gyakorlatban használatos mérőszámok - különösen a szakítószilárdság számításakor - feltűnő volt, hogy a maximális erőt nem az erő fellépésekor mérhető keresztmetszettel, hanem az ennél nagyobb eredeti keresztmetszettel osztottuk. Ha az anyag szakítóvizsgálat alatti viselkedését ténylegesen jellemző *feszültség-alakváltozás diagramokat* kell ábrázolnunk, ilyen jellegű közelítésekkel nem elégedhetünk meg. Ezért vált szükségessé a

valódi feszültségek számítása, illetve a valódi alakváltozás függvényében a valódi feszültség-diagramok szerkesztése.

Valódi feszültségen a vizsgálat alatt adott pillanatban mérhető erő és a hozzá tartozó keresztmetszet hányadosát értjük.

A **valódi feszültség – valódi nyúlás** diagramok lényegesen jobban tükrözik az anyag szerkezetében lejátszódó folyamatokat. Legfontosabb azt látunk, hogy a keményedés az egyeneses nyúlás határán túl is folytatódik, jöllehet a szakítódiagram harmadik szakaszában *csökken az erő, de a valódi feszültség tovább nő*, ahogyan azt a 2.9 ábra szemlélteti. A diagramokban a  $\sigma_m$  a maximális erő hatására ébredő valódi feszültség.

A  $\sigma_c$  a töréskor fellépő valódi feszültség - a **kontrakciós feszültség** - közvetlen mérése csak villamos erőméréssel oldható meg, mivel a más rendszerű erőmérők tehetetlensége miatt meghatározása pontatlan.



2.9. ábra Valódi feszültség változása a valódi nyúlás függvényében

A szilárdsági és alakváltozási mérőszámokon kívül a gépészmérnöki gyakorlatban egyre gyakrabban használják anyagjellemzőként a térfogategységre vonatkoztatott **fajlagos törési munkát** ( $W$ ):

$$W = \int_{L_0}^L \frac{FdL}{V_0} = \int_{L_0}^L \frac{F}{S_0} \cdot \frac{dL}{L_0} \quad [J/cm^3],$$

$V_0$  - a próbatest térfogata  
( $F$ ,  $L_0$ ,  $L$  és  $S_0$  - értelmezése már ismert).

A képletben szereplő integrál értéke felfogható úgy is, mint a szakítódiagram alatti terület. A szakítódiagram függőleges tengelyén erő, a vízszintesen elmozdulás dimenziójú mennyiség szerepel. A görbe alatti terület tehát a próbatest töréséhez szükséges munkával arányos. E munkának a térfogattal osztott értéke adja a fajlagos törési munkát.

A számszerű értékeléshez a szakítás alatti fajlagos munkát három mennyiség összegeként írhatjuk fel:

$$W = W_r + W_m + W_c \quad [J/cm^3],$$

- $W_r$  - a rugalmas alakváltozás  $[J/cm^3]$ ,  
 $W_m$  - az egyenletes nyúlás  $[J/cm^3]$ ,  
 $W_c$  - a kontrakció során végzett fajlagos munkát jelenti  $[J/cm^3]$ .

A képlékeny fémek egyenletes alakváltozása, illetve kontrakciója során végzett fajlagos munka nagyságrendileg nagyobb, mint a rugalmas alakváltozás munkája. A rideg anyagok törési munkája viszont a gyakorlatban csak a rugalmas alakváltozás munkájából áll.

A fajlagos törési munka jól jellemzi az anyag alakíthatóságát, valamint a rácsszerkezetben bekövetkezett változásokat is. Értékét kísérlettel az MSZ 4929 számú szabvány előírása szerint kell meghatározni.

*A sima hengeres próbatest szakítóvizsgálati eredményei alapján a fajlagos törésmunkát a következő összefüggés alapján kell meghatározni:*

$$W = \frac{R_{el} + 2R_m}{3} \left( \frac{d_o^2}{d_m^2} - 1 \right) + \left( R_m \frac{d_o^2}{d_m^2} + R_u \right) \ln \frac{d_m}{d_u} \quad [J/cm^3],$$

$R_{el}$  - az alsó folyáshatár  $[N/mm^2]$ ,

$R_m$  - a szakítószilárdság  $[N/mm^2]$ ,

$R_u$  - a szakadás pillanatában fellépő valódi feszültség  $\Rightarrow$

$$R_u = \frac{F_u}{S_u} = \frac{4 \cdot F_u}{d_u^2 \cdot \pi} [N/mm^2],$$

$d_o$  - a próbatest eredeti (kiindulási) átmérője  $[mm]$ ,

$d_m$  - a legnagyobb terheléshez ( $F_m$ ) tartozó vizsgálati átmérő  $[mm]$ ,

$d_u$  - a próbatest elszakadása után mért legkisebb átmérője  $[mm]$ .

Az  $R_{eL}$  helyett  $R_{p0,2}$ -t kell alkalmazni, ha a vizsgált anyagnak kifejezett folyáshatára nincs. Amennyiben a szakítógéppel merevsége nem felel meg a  $K = 3 \cdot 10^{-5} mm/N$  értéknek, és ezáltal nem lehet az  $F_u$ -t pontosan meghatározni **a fajlagos törésmunkát** a következő összefüggéssel lehet meghatározni:

$$W = \frac{R_{eL} + 2R_m}{3} \left( \frac{d_o^2}{d_m^2} - 1 \right) + 4R_m \cdot \frac{d_o^2}{d_m^2} \cdot \ln \frac{d_m}{d_u} + R_m \cdot \frac{d_o^2}{d_m^2} \left( \frac{d_u^2}{d_m^2} - 1 \right) \quad [J/cm^3].$$

**A fajlagos törésmunka közelítő értéke meghatározható a**

$$W = (R_{eL} + R_u) \cdot \ln \frac{d_o}{d_u} \quad [J/cm^3]$$

összefüggés felhasználásával is. Az így elkövetett hiba általában  $< 15\%$ -nál.

A szakítóvizsgálat eredményeit a következő tényezők befolyásolják:

- a próbatest keresztmetszetének mérete,
- a próbatest keresztmetszetének alakja,
- a szakítás sebessége,
- a próbatest hőmérséklete.

**A próbatest keresztmetszetének mérete.** Ugyanazon anyagból készült kisebb átmérőjű próbatestek szakítási adatai alapján nagyobb szakítószilárdság adódik, mint a nagyobb átmérőjű próbatestek vizsgálati eredményei alapján. Az átmérő befolyása 8-10 mm alatt jelentős. Ezért a szakítóvizsgálatokhoz célszerű 8-10 mm-es vagy nagyobb átmérőjű próbatesteket választani.

**A próbatest keresztmetszetének alakja.** A szilárdsági értékek annál kisebbek, minél jobban eltér a keresztmetszet alakja a körtől. A legegyszerűsebb a feszültségeloszlás a kör keresztmetszetű próbatestekben.

**A szakítás sebessége.** Főleg a folyáshatárt, de a szakítószilárdság értékét is befolyásolja. Nagyobb terhelési (szakítási) sebesség esetén a **Prandtl**-féle összefüggés alapján valamennyi szilárdsági anyagjellemző megnő.

**A próbatest hőmérséklete. A hőmérséklet +10 és +30 °C között változhat.** Nagyobb mértékű hőmérsékletváltozások hatása már nem hagyható figyelmen kívül.

Szakítóvizsgálatot a *szobahőmérséklettől eltérő hőmérsékleten* is végeznek. A fémekre jellemző anyagvizsgálati mérőszámok értéke a vizsgálati hőmérséklet függvényében változik. Ezért azoknak az alkatrészeknek az anyagát, amelyeknek üzemi hőmérséklete eltér a szobahőmérséklettől, az adott üzemi hőmérsékleten is meg kell vizsgálnunk.

*A szobahőmérsékletnél magasabb hőmérséklet* hatására a szobahőfokon mért értékekhez képest a szilárdság rendszerint csökken, az alakíthatóság (kontrakció, nyúlás) pedig nő. A nagy hőmérsékleten végzett szakítóvizsgálatra vonatkozó előírásokat az MSZ 105/2 szabvány tartalmazza.

*A szobahőmérsékletnél alacsonyabb hőfokon* a vizsgálat elvileg az előzőhöz hasonlóan hajtható végre, csak a próbatestet fűtőberendezés helyett hűtőközeggel kell körülvennünk. A vizsgálatra vonatkozó előírásokat az MSZ 105/26 szabvány tartalmazza.

## **A kúszás vizsgálata**

**Az állandó terhelés alatt bekövetkező alakváltozást kúszásnak nevezzük.**

A fémek környezeti hőmérsékleten való alakításakor **keményedés** jön létre. E keményedés nagy biztonságot nyújt a túlterheléssel szemben. A rugalmassági határt meghaladó terheléskor ugyanis a fém alakja maradandóan megváltozik. A keményedés gátat szab a további alakváltozásnak. **Ezért biztonságos szobahőmérsékleten a statikusan terhelt szerkezetek folyáshatárra méretezése.**

Ha a fémeket olyan hőmérsékleten használjuk, amelyen a lágyulás is bekövetkezik, a keményedés okozta biztonság, hiányzik. Ilyenkor a

rugalmassági határt meghaladó terhelésre létrejön ugyan az alakítási keményedés, amely ideiglenesen gátolja az alakváltozást. Bizonyos idő elteltével azonban a lágyulás miatt a rugalmassági határ eredeti értékére esik vissza. Ez változatlan terheléskor újabb alakváltozást tesz lehetségessé. **Ezért a mechanikai lágyulás kezdő hőmérséklete feletti hőmérsékleteken terhelt fémek kúszása az időben állandósulhat.** Erről kúszási vizsgálatokkal kell meggyőződnünk (2.10. ábra).

A kúszásvizsgálat elvét a 2.10/a. ábra szemlélteti. Az állandó (T) hőmérsékletre szabályozott kemencében levő próbatestet súlyterheléssel feszíthetjük konstans ( $\sigma$ ) értékre. Vizsgálat közben mérjük az idő függvényében a próbatest megnyúlását. Az adott hőmérséklethez választott terhelési értéktől függően különböző jellegű kúszásgörbékert kapunk (2.10/b. ábra).

A szokásos üzemi igénybevétel tört részét kitevő **igen kis terhelésekre** a kismértékű kezdeti nyúlás után a kúszás megáll. Valamilyen anyagszerkezet-változás, pl. karbidkiválás (szegregáció) az alakváltozást véglegesen "lehorgonyozza" (blokkolja), miként ezt az ábra A jelű görbéje is szemlélteti.

**A szokásos üzemi igénybevételre** a B jelű görbe jellemző. Három szakaszból áll. Az I. szakaszt a nagy nyúlási sebesség jellemzi. Az alakítás okozta keményedés szilárdságnövelő hatása miatt a II. szakaszban a nyúlás lassul, esetleg időlegesen meg is áll. Ez az állapot az alakítási keménység kilágyulásáig tart. A kilágyulás okozta szilárdságcsökkenés miatt a III. szakaszra ismét a nagy nyúlási sebesség jellemző. A próbatest keresztmetszete csökken, ezért valódi feszültsége állandóan nő, ami rövid idő alatt a próbatest szakadásához vezet.

**A kúszásálló ötvözetek anyagát az adott üzemi hőmérséklethez és terheléshez úgy kell megválasztanunk, hogy a II. szakasz minél hosszabb ideig tartson.** Ha a terhelés vagy a hőmérséklet **nagyobb a megengedettnél**, a II. szakasz megrövidül és a C- jelű görbét kapjuk, vagyis a próbatest rövid idő alatt elszakad.

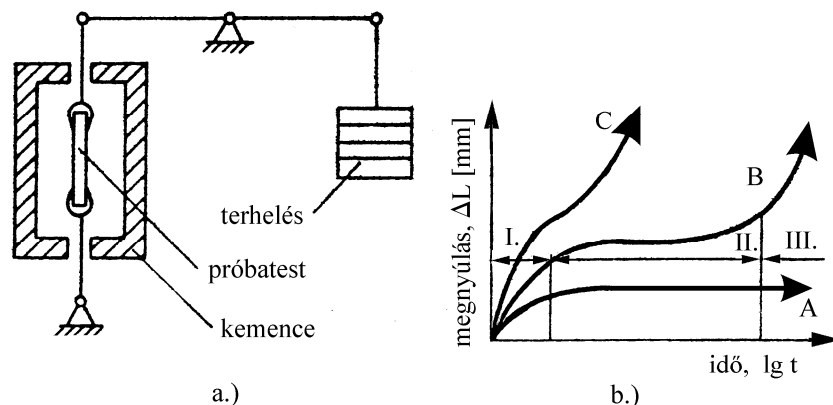
A mechanikai lágyulás kezdőhőmérséklete (újrakristályosodási küszöbhőmérséklet) feletti hőmérsékleten terhelt fémek bonyolult szerkezetváltozása miatt a kúszás folyamatát még nem tudjuk előre pontosan kiszámítani. Ezért igen hosszú ideig tartó vizsgálatokkal kell a kúszási görbéket felvennünk. Ezek időtartama ezer, tízezer, sőt százezer óra is lehet.

A nemzetközileg egységes jelölések és anyagjellemzők a következők:

**Névleges feszültség:** a terhelőerő és a próbatest eredeti keresztmetszetének hányadosa:

$$R = \frac{F}{S_0} \quad [N/mm^2].$$





2.10. ábra Kúszás és relaxáció vizsgálata  
 a) a vizsgálóberendezés elrendezésének elvi vázlata, b) különböző kúszásgörbék  
 c.) a relaxáció folyamata

**Átlagos, tényleges feszültség:** az a feszültség, amellyel a korróziós veszteséget is figyelembe vesszük:

$$R_k = R \cdot \frac{d_o^2}{\left(d_o \frac{4}{3} m\right)^2} \quad [N/mm^2],$$

m - a korróziós tényező,  
 d<sub>o</sub> - a próbatétel eredeti átmérője [mm].

**Kúszáshatár:** az a névleges feszültség, amely T vizsgálati hőmérsékleten t vizsgálati időtartam után meghatározott A [%] maradó nyúlást okoz.

Jelölése: R(T[°C]; A[%]; t[h]) [N/mm<sup>2</sup>].

**Kúszáshatár a korrózió figyelembevételével:** az, az átlagos tényleges feszültség, amely T vizsgálati hőmérsékleten, t vizsgálati időtartam után meghatározott A [%] maradó nyúlást okoz. Jelölése: R<sub>k</sub>(T[°C]; A[%]; t[h]) [N/mm<sup>2</sup>].

**Tartósszilárdság:** az a névleges feszültség, amely **T**- vizsgálati hőmérsékleten, **t** vizsgálati időtartam után a próbatest szakadását okozza. Jelölése:  $R_m(T[^\circ\text{C}]; t[\text{h}])$   $[\text{N}/\text{mm}^2]$ .

**Tartósszilárdság a korrózió figyelembevételével:** az, az átlagos tényleges feszültség, amely **T**-vizsgálati hőmérsékleten, **t**- vizsgálati időtartam után a próbatest szakadását okozza.

Jelölése:  $R_{mk}(T[^\circ\text{C}]; t[\text{h}])$   $[\text{N}/\text{mm}^2]$

**Kúszáshatárra kell méreteznünk azokat az alkatrészeket, amelyek megengedhető alakváltozása korlátozott.** Például egy turbinalapátnál nemcsak törés, hanem a kismértékű megnyúlás is üzemzavart okozhat.

Az tartámszilárdság és a kúszáshatár adott hőmérsékleten való megállapításához több különböző feszültséggel terhelt próbadarab vizsgálata szükséges. Ez rendkívül költséges és hosszú ideig tart. A 100 000 órás vizsgálatok évtized feletti ideje megköveteli **extrapolációs eljárások alkalmazását**, amelyekből rövidebb vizsgálatokkal hosszabb idejű értékekre következtethetünk.

### **A feszültségrelaxáció vizsgálata**

Az állandó méreten rögzített, előfeszített fémekben, ötvözetekben ébredő feszültség idővel csökken, tehát rugalmas nyúlásuk egy része maradó megnyúlássá alakul át (pl. előfeszített csavarkötésekben).

A terhelt és állandó méreten rögzített alkatrészekben vagy próbatestekben ébredő feszültségnek a csökkenését az idő függvényében **relaxációnak** nevezzük. *Feszültségrelaxáció feszültségernyedést jelent.*

**A relaxációs vizsgálat** lényege a megadott alakváltozás mellett, az időben folyamatosan bekövetkező húzóerő csökkenés (feszültségcsökkenés) meghatározása (2.10/c. ábra).

Az  $F_{rel}$  az, az erőcsökkenés, amely a meghatározott mértékben megnyújtott, állandó hőmérsékleten és állandó hosszon tartott próbatestben egy adott ( $t$ ) időpontban létrejön a kezdeti terhelőerőhöz képest.

A **relaxáció időtartama** ( $t$ ): az, az időtartam, amely a kezdeti terhelés elérésekor kezdődik és a tehermentesítésig tart.

A **relaxációs veszteség** ( $r_t$ ) a következő összefüggéssel határozható meg:

$$r_t = \frac{F_{rel}}{F_o} \cdot 100 \quad [\%].$$

Az  $F_o$  kezdeti erőt két próbatest szakításakor mért legnagyobb terhelőerő ( $F_m$ ) átlagának százalékában írják elő.

A **relaxációs görbe** ( $r_t = f(t)$ ): a relaxációs veszteségnek az idő függvényében való ábrázolása.

A **relaxáció sebessége** ( $r_v$ ) a relaxációs görbéhez húzott érintő iránytangense egy adott  $t$  időpontban:

$$r_v = \frac{dr_t}{dt} \cdot F_o \quad [N/óra].$$

A relaxációt - ha van rá lehetőség - a vizsgálóberendezésen folyamatosan kell regisztrálni, vagy ha nincs, akkor szakaszosan meghatározott időközönként kell mérni.

Az MSz 105/27- szerinti szabványos vizsgálatot szobahőmérsékleten ( $20 \pm 5^\circ C$ ) végzik.

A rövididejű vizsgálatok időtartama  $t \leq 1000$  óra; a hosszantartóké  $> 1000$  óránál.

A relaxációs igénybevétel jellemző példái a silók, a földékek, a hidak és előfeszített betonszerkezetek acélbetétjei.

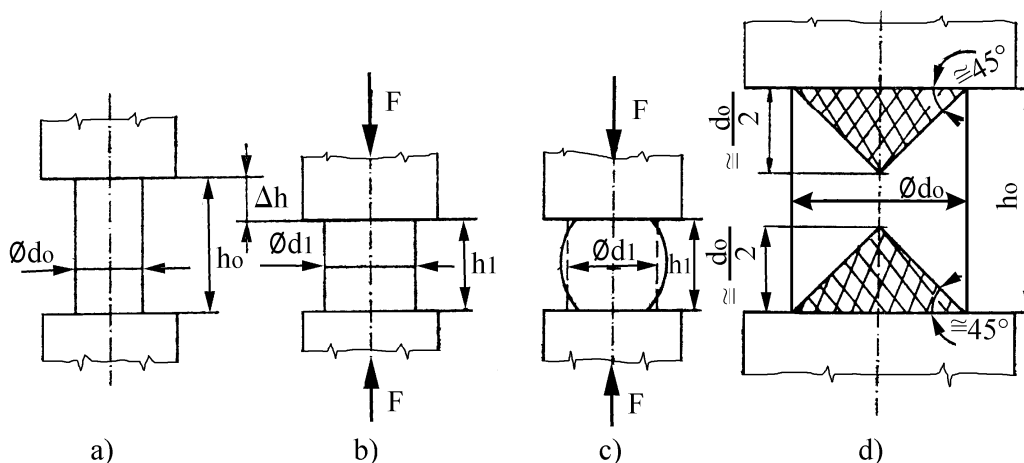
### 2.1.1.2 Nyomóvizsgálat

A gyakorlatban használatos fémek húzó és nyomó igénybevétellel csaknem egyformán terhelhetők. Ezért ellenőrzésük legtöbbször csak szakítóvizsgálatból áll.

**Nyomóvizsgálatra egyrészt a rideg fémek minősítésekor, másrészt a képlékeny fémek hidegalakító műveleteinél, a technológiai tervezéshez szükséges folyási görbék felvétele céljából kerül sor.**

A nyomóvizsgálat elvi elrendezését és a próbatest alakváltozását a 2.1.1. ábra mutatja be. A kiinduló állapotban (2.11/a. ábra) a  $h_o$  magasságú és  $d_o$  átmérőjű próbatest a 2.11/b. ábra szerint változna, ha a nyomólap és a próbatest felülete közötti súrlódási tényező értéke  $\mu = 0$  volna. Mivel ez a feltétel nem teljesül, a valóságban a 2.12/c. ábra szerint változik a próbatest alakja. A képlékeny anyagok hengeres próbatesteknek alakja hordószerű lesz, mert a nyomólapal érintkező anyagrészek kisebb alakváltozást szenvednek, a középső rész pedig, jobban kidomborodik. A nyomóvizsgálat során így *nyomókúpok* alakulnak ki (2.11/d. ábra).

Az ábrán látható geometriai méretek alapján a nyomóvizsgálati célokra használt próbatestekhez a  $h_o > d_o$  egyenlőtlenséget célszerű alkalmazni. Ellenkező esetben a nyomókúpok találkozása miatt irreálisan nagy erőket mérnénk. A kihajlási veszély miatt a  $3d_o > h_o > d_o$  méretű próbatestek használata indokolt.



2.11. ábra Nyomóvizsgálat

a) a próbatest kiinduló alakja, b) súrlódás nélkül feltételezett alak, c) a próbatest terhelés után, d) nyomókúpok kialakulása

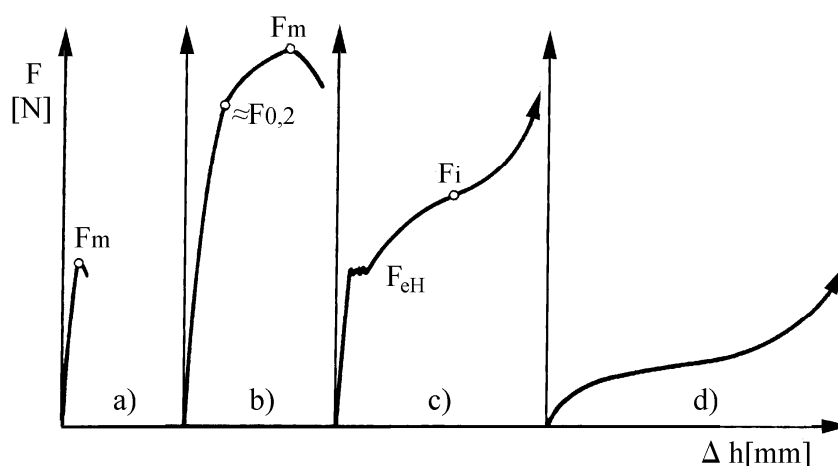
A nyomóvizsgálatot egytetemes szakítógépen végezzük, keményre edzett nyomólapok között. A gép írószerkezete a nyomóerő változását a magasságcsökkenés ( $\Delta h$ ) függvényében rajzolja meg.

Néhány fém jellegzetes nyomódiagramját szemlélteti a 2.12. ábra.

A *rideg* anyagok, pl. az öntöttvasak (2.12/a. ábra) gyakorlatilag maradó alakváltozás nélkül törnek. Emiatt rajtuk hordósodás nem tapasztalható.

A **nyomószilárdság** ( $R_{-m}$ ) a maximális erő ( $F_m$ ) és az eredeti keresztmetszet ( $S_o$ ) hányadosa. (Megkülönböztetésül a szakítóvizsgálattal meghatározható anyagjellemzőktől az indexet negatív előjellel szokás jelölni):

$$R_{-m} = \frac{F_m}{S_o} \quad [N/mm^2].$$



2.12. ábra Nyomódiagramok a) öntöttvas, b) nemesített acél, c) lágyacél, d) ólom

A szívós anyag, pl. a nemesített acél diagramjából (2.12/b. ábra) értelmezhető az egyezményes folyáshatárhoz hasonló anyagjellemző, amely a 0,2%-os maradó alakváltozáshoz tartozó erő ( $F_{0,2}$ ) és az eredeti keresztmetszet ( $S_0$ ) hányadosa:

$$R_{-p0,2} = \frac{F_{0,2}}{S_0} \quad [N/mm^2].$$

Ez az anyagjellemző azonban már nem valódi feszültség, mert a maradó alakváltozás miatt a próbatest keresztmetszete megnövekedett.

A lágycél nyomódiagramjából (2.12/c. ábra) a folyáshatár számítható ki:

$$R_{-eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} \quad [N/mm^2].$$

A keresztmetszet növekedése és a nyomókúpok összesajtolódása miatt a törés még az igen nagy erő ellenére sem következik be, amit a diagram végén fölfelé mutató nyíl jelez.

Az inflexiós pontbeli feszültség:

$$R_i = \frac{F_i}{S_0} \quad [N/mm^2].$$

Egy képlékeny anyag, pl. az ólom nyomódiagramját szemlélteti a 2.12/d. ábra.

**A fajlagos magasságcsökkenést** az alakváltozás mérőszámaként használjuk, és a következőképpen számítjuk ki:

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0} = \frac{\Delta h}{h_0}.$$

### 2.1.1.3 Csavaróvizsgálat

A vizsgálat lényege, hogy az egyik végén szilárdan befogott henger vagy hasáb alakú próbatestet a másik végén levő fej segítségével csavarjuk, és mérjük a **csavarónyomatékot**, valamint a hozzá tartozó  **$\vartheta$  elcsavarodási szöget**. A vizsgálatra vonatkozó előírásokat az MSZ 105/6 tartalmazza. A csavaróvizsgálattal kapcsolatos fogalmakat, jelöléseket, illetve az alkalmazandó próbatest kialakítását a 2.13. ábra szemlélteti. A próbatest hossza általában az átmérő 20-szorosa.

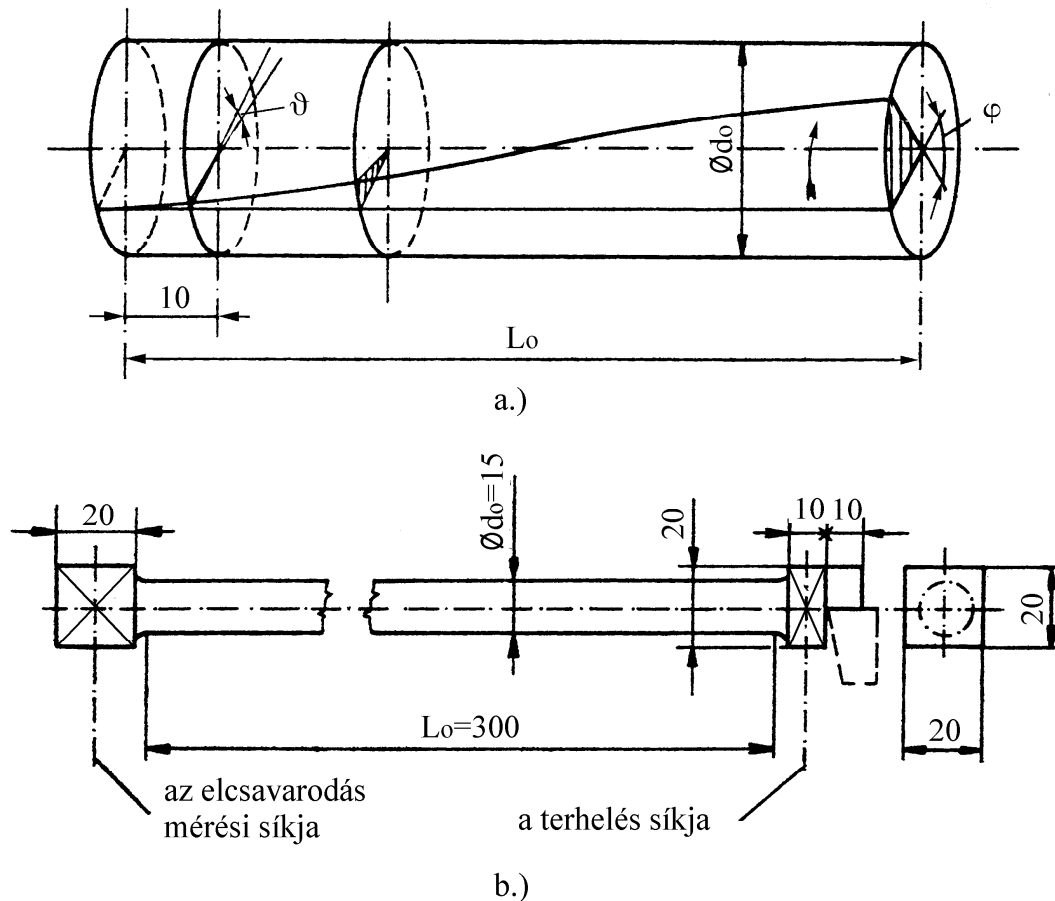
**A fajlagos elcsavarodás** értéke (théta -  $\vartheta$ ) a nyomaték, a próbatest átmérőjének és az anyagminőségnek a függvénye:

$$\vartheta = \frac{32}{\pi} \cdot \frac{M}{Gd^4} \left[ \frac{1}{mm} \right],$$

- G - a csavarómodulus  $[N/mm^2]$ ,
- d - a próbatest átmérője  $[mm]$ .

Az előbbi összefüggés azonban csak rugalmas alakváltozás esetén igaz. Az anyag jellemzésére a **csavarófeszültség** ( $\tau$ ) használatos, amely a csavarónyomaték ( $M$ ) és a poláris keresztmetszeti tényező ( $K_p$ ) hányadosa:

$$\tau = \frac{M}{K_p} = \frac{16M}{\pi d^3} \quad [N/mm^2].$$



2.13. ábra Csavaróvizsgálat a) elvi vázlat, b) próbatest

**A rideg anyag csavarószilárdsága** az előzőek alapján számítható:

$$\tau_B = \frac{M_m}{K_p} \quad [N/mm^2],$$

$M_m$  - a törést okozó nyomaték [ $Nmm$ ],

$K_p$  - a poláris keresztmetszeti tényező [ $mm^3$ ].

#### 2.1.1.4. Nyíróvizsgálat

Tiszta nyírás elvileg csak akkor következhet be, ha a próbatestet két, egy síkban ható erővel terheljük (2.15/a. ábra). A gyakorlatban azonban a nyírószerszám felfekvési felülete véges. A nyíró igénybevételén kívül - a  $k$  távolság miatt - hajlító igénybevétel is ébred (2.14/b. ábra).

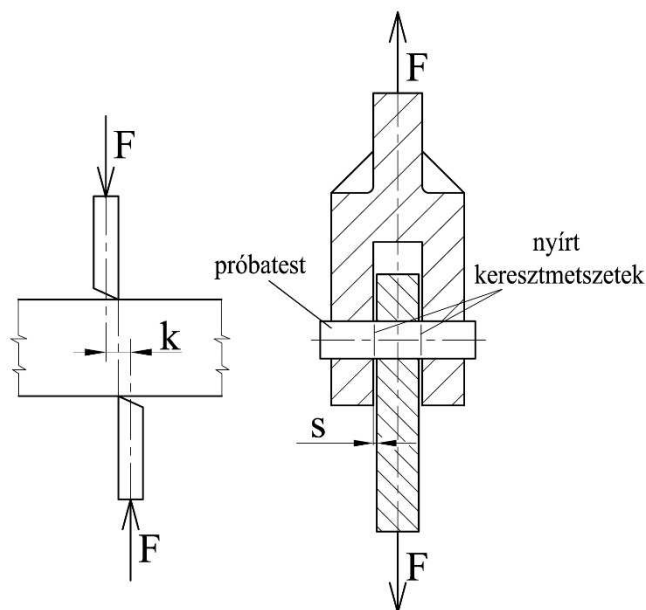
Ezeket a hátrányokat a **kettősnyrással** próbálják kiküszöbölni. Az előbbieket miatt azonban tiszta nyírás így sem jöhet létre. A vizsgálat pontosan csak azonos körülmények között ismételhető meg. A nyíróvizsgálattal kapcsolatos előírásokat az MSZ 105/7 szabvány ismerteti.

A nyíróvizsgálat egyetemes szakítógépen végezhető el a 2.14/c. ábrán látható *nyírószerszámmal*. A szerszám a szerszámházból és a benne súrlódásmentesen vezetett betétből áll. A házban és a betétben azonos átmérőjű furatokat készítenek, amelyekben a különböző furatú - cserélhető - szabványos keménységű befogótárcsa és nyírólap helyezhető el. A befogótárcsák és a nyírólapok közötti hézagok összege legfeljebb 0,1 mm lehet. Nyíróvizsgálattal csak a **nyírószilárdságot** ( $R_{ms}$ ) szokták meghatározni. Nyírószilárdságot a következő összefüggés alapján határozzák meg:

$$R_{ms} = \frac{F_m}{2S_o} = \frac{F_m}{2 \frac{d_o^2 \pi}{4}} = \frac{2F_m}{d_o^2 \pi} \quad [N/mm^2],$$

$F_m$  - a maximális nyíróerő [N],

$d_o$  - a próbatest eredeti átmérője [mm].



2.14. ábra Nyíróvizsgálat

#### 2.1.1.5 Keménységvizsgálatok

**A fémek és ötvözetek keménységének vizsgálatakor egy keményebb test behatolásával szembeni ellenállást határozzuk meg.** Ebből a célból nagyon kemény anyagból készített golyót, kúpot vagy gúlát, meghatározott ideig ható statikus erővel sajtolunk a vizsgálandó fém sima és sík felületébe. A

keménységet vagy a terhelőerő és a benyomódásra jellemző felület hányadosaként, vagy a benyomódás mélységével adjuk meg.

*A keménységmérési eljárások közös hiányossága, hogy mindegyik eredménye csak relatív mérőszámnak tekinthető. Ezért csak azonos módszerrel mért értékeket célszerű összehasonlítani.*

### **Brinell - keménységmérés szobahőmérsékleten**

A mérés lényege, hogy egy meghatározott átmérőjű, keményre edzett acélgolyót vagy keményfém golyót, adott terheléssel, meghatározott ideig a vizsgálandó felületbe nyomunk.

**A Brinell-keménység a terhelőerő és a lenyomat (gömbfüveg) felületének a hányadosa.** A Brinell - keménységméréssel kapcsolatos előírásokat az MSZ 105/9 szabvány tartalmazza.

A Brinell - keménységet a következő példák szerint kell jelölni:

**210 HBS**  $\Rightarrow$  acélgolyó alkalmazásakor;

**540 HBW**  $\Rightarrow$  keményfém golyó alkalmazásakor.

A Brinell - keménység értéke:

$$\text{HBS vagy HBW} = \frac{\text{vizsgálati terhelés}}{\text{lenyomatfelszíne}} \cdot \text{állandó}.$$

A geometriai összefüggések alapján a gömbfüveg alakú lenyomat felszíne:

$$A = D \cdot \pi \cdot h \text{ [mm}^2\text{]},$$

h - a gömbfüveg magassága [mm],

D - a golyó átmérője [mm],

F - a vizsgálati terhelés [N],

d - a lenyomat közepes átmérője [mm].

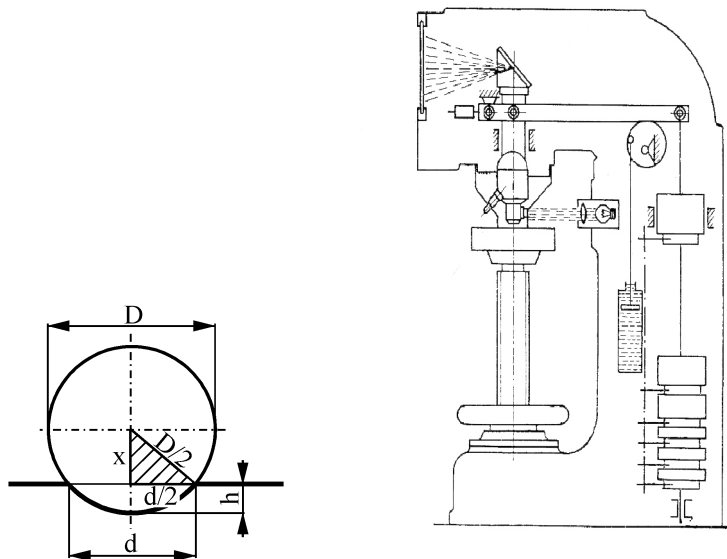
**A .15. ábra alapján:**  $h = \frac{D}{2} - x,$

$$x = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \frac{\sqrt{D^2 - d^2}}{2},$$

$$h = \frac{D}{2} - \frac{\sqrt{D^2 - d^2}}{2} = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2},$$

$$A = \pi \cdot D \left( \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} \right) \Rightarrow \text{HB} = \frac{2F}{\pi \cdot D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \cdot 0,102$$





2.15. ábra Vázlat a Brinell- keménység kiszámításához, a keménységmérő berendezés

A mértékegységek nemzetközi rendszerének (SI) hatályba lépése óta a terhelőerőt  $N$ -ban kell mérnünk. Emiatt a benyomódás egységére vonatkoztatott keménységértékek, a HB keménységi számok, egy nagyságrenddel nagyobbak lennének a megszokottnál. **Azért, hogy a leggyakrabban használt és megszokott keménységértékek ne változzanak meg, a terhelőerőt  $N$ -ban mérjük, de megszorozzuk 0,102-del.** Az így kiszámított keménység értékek megegyeznek a régóta megszokottakkal, amelyeknek  $kp/mm^2$  volt a dimenziójuk. Ezt a dimenziót az SI- rendszerben nem használhatjuk. Ez az oka annak, hogy **a keménységet mértékegység nélküli számnak tekintjük.**

A gravitációs gyorsulás mértékszámának reciproka (mértékegységet elhagyva):

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{9,806} = 0,102.$$

A **HBS** vagy **HBW** jelet megelőzi a keménység számértékét jelző szám, és követik a vizsgálat körülményeire utaló jelek, a következő sorrendben:

- a golyó átmérője,
- a terhelés nagysága,
- a terhelés időtartama, ha ezek eltérnek a szabvány szerint előírt alapértékektől.

Példák a jelölésre:

**350 HBS 5/750** = 350 Brinell-keménység, 5 mm átmérőjű acélgolyóval, 7355 N terhelőerővel, 15 s terhelési időtartammal mérve.

**600 HBW 1/30/20** = 600 Brinell-keménység, 1 mm átmérőjű, keményfém golyóval, 294,2 N terhelőerővel, 20 s terhelési időtartammal mérve.

A vizsgálathoz alkalmazható golyóátmérők: 10, 5, 2,5 vagy 1 mm. Az éppen szükséges golyó átmérőjét a vizsgálandó tárgy vastagsága szabja meg.

**A próbatest vagy az alkatrész olyan vastag legyen, hogy a vizsgálattal járó benyomódás a vizsgált anyag hátoldalán semmilyen alakváltozást ne okozzon.** A benyomódás mélysége - a vizsgált helyen - nem haladhatja meg a próbatest vagy alkatrész vastagságának egytizedét.

**A golyóátmérőt és a hozzá tartozó terhelőerőt úgy kell megválasztanunk, hogy a lenyomat átmérője**

$$0,24 D \leq d \leq 0,6 D \text{ legyen.}$$

*A Brinell-keménységmérés eredményét a vizsgálat időtartama is befolyásolja.*

*A golyó benyomásakor az anyagban maradó alakváltozás jön létre, amely csak bizonyos idő elteltével jut nyugalmi állapotba. A tapasztalat szerint a különböző fémek, illetve ötvözetek vizsgálati ideje a következő. Keményebb anyagoknál, pl. acélnál 15 s, Al- és Cu- ötvözeteknél 30 s, a lágy anyagoknál, pl. ólomnál 180 s.*

*A golyót a felületre merőlegesen, lökés és rezgés nélkül, egyenletesen növekvő terheléssel kell a felületbe nyomni. A benyomódás középpontja a vizsgálandó próbatest, illetve alkatrész szélétől acél, öntöttvas, réz és ötvözetek vizsgálatokor 2,5d, könnyűfémek és ötvözetek esetében 3d távolságnál közelebb ne legyen. Két benyomódás közepe között a távolság acél, öntöttvas, réz és ötvözetek vizsgálatokor 4d-nél, könnyűfémek és ötvözetek esetében 6d-nél kevesebb nem lehet.*

**A benyomódások átmérőjét két, egymásra merőleges irányban kell mérnünk, és a két mérés számtani középértéke alapján táblázatokból határozzuk meg a Brinell - keménységet.**

### **Brinell - keménységmérés meleg állapotban**

A hőmérséklet változásával a fémek és fémötvözetek keménysége is változik. Ez teszi szükségessé, hogy a magasabb hőmérsékletre, esetleg 200-600 °C-ra melegedő alkatrészek (pl. a belsőégésű motorok dugattyúi) keménységét az üzemi hőmérsékleten határozzuk meg. A meleg állapotban végzendő Brinell - keménységméréssel az MSZ 105/10 szabvány foglalkozik.

*A golyó átmérőjét és a terhelőerő nagyságát az előző fejezetben leírtak szerint választjuk meg. A teljes terhelést legalább 3 percig - ha pedig ennyi idő alatt sem fejeződik be az alakváltozás - még hosszabb ideig tartjuk a vizsgálandó darabon.*

**A lenyomat átmérőjét 0,01 mm pontossággal a szobahőmérsékletre hűlt darabon mérjük.** A Brinell-keménységértéket az előzőekben ismertetett módon számítjuk. A jelölésben a vizsgálati hőmérsékletet is meg kell adnunk. Például a **185 HBS 5/750/180/200** azt jelenti, hogy 5 mm átmérőjű golyóval, 7355 N (750 kp) vizsgálati terheléssel, 180 s terhelési idővel és kb. 200 °C-on mértük a keménységet.

### Poldi-féle keménységmérés

Gyakran előforduló feladat, hogy olyan méretű vagy alakú tárgy, illetve alkatrész keménységét kell megmérnünk, amely nem fér a keménységmérő gépbe, vagy a laboratóriumba be sem szállítható. Ilyenkor a Brinell-keménységmérés elvén alapuló ún. Poldi-kalapáccsal végezzük a vizsgálatot.

**Az eljárás lényege, hogy a mérendő tárgy keménységét egy ismert keménységű etalon segítségével határozzuk meg. A Poldi-kalapács (2.16 ábra) golyótartójában egy 10 mm átmérőjű edzett acélgolyó helyezkedik el, felette, pedig az ismert keménységű etalon hasáb. Keménységméréskor a felületre merőlegesen tartott ütőtüskére kalapáccsal ráverünk. A D átmérőjű golyó a vizsgálandó darabon  $d_x$ , az etalonon  $d_e$  átmérőjű lenyomatot hagy. A kalapács ütésekor mind az etalont, mind a vizsgálandó darabot ugyanaz az F erő terhelve. A Brinell-vizsgálatnál közölt összefüggés alapján:**

$$HBS_e = \frac{2 \cdot 0,102F}{D\pi(D - \sqrt{D^2 - d_e^2})},$$

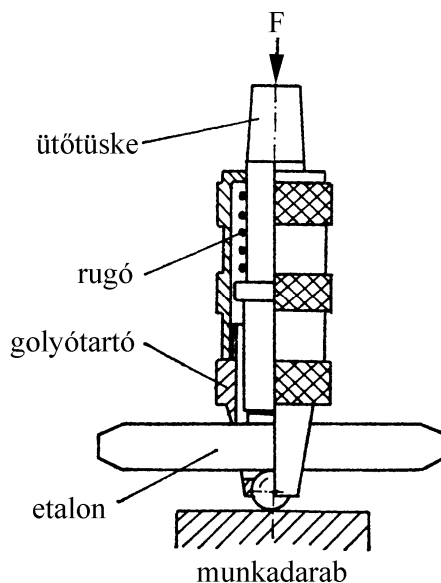
$$HBS_x = \frac{2 \cdot 0,102F}{D\pi(D - \sqrt{D^2 - d_x^2})},$$

$HBS_e$  - az etalon,

$HBS_x$  - a vizsgált darab Brinell-keménysége.

Ahogy a két benyomódási felület aránylik egymáshoz, úgy aránylik a két anyag keménysége is egymáshoz, így a vizsgált anyag keresett keménysége:

$$HBS_x = HBS_e \frac{d_e^2}{d_x^2}.$$



2.16. ábra Poldi-kalapács

**A lenyomatátmérők függvényében a vizsgált anyag keménysége táblázatokból állapítható meg.** Poldi-kalapáccsal kisebb pontosságot érhetünk el, mint a laboratóriumi keménységméréssel. A méréssel előnye, hogy a meghatározott Brinell-keménység értékéből az anyag szakítószilárdságának közelítő értéke is meghatározható a következő összefüggés alapján:

$$HBS \approx 0,35 \cdot R_m .$$

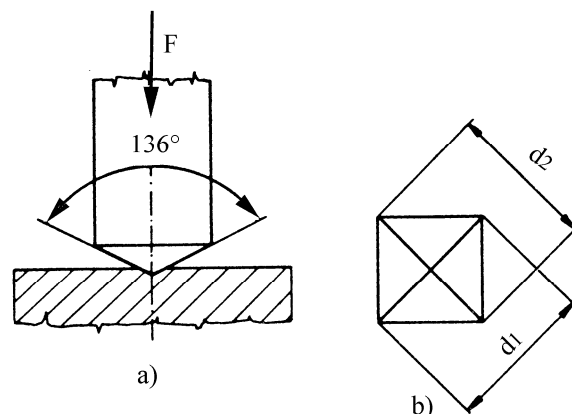
### Vickers-féle keménységmérés

Ez a keménységmérési eljárás hasonló a Brinell-eljáráshoz, de itt a benyomótest „hegyes”, így keményebb anyagokba is könnyebben benyomódik. A mérés során egy **négyzet alapú, 136° csúcshögű, egyenes gyémánt gúlát**, F terheléssel, meghatározott ideig a vizsgálandó anyagba nyomunk (2.17. ábra). A Vickers-keménység szintén a terhelőerő (F) és a benyomódási felületnek a hányadosa. E keménységméréssel kapcsolatos előírásokat az MSZ 105/12 szabvány tartalmazza. Itt a benyomat felülnézeti képe egy négyzet. Ennek átlóját (d) mérjük, és ebből határozzuk meg a gúla alakú benyomat felszínét. A Vickers-keménységet a terhelőerő (F), s a benyomat felszínének hányadosaként határozhatjuk meg:

$$\text{Vickers-keménység} = \frac{\text{vizsgálati terhelés}}{\text{lenyomatfelszíne}} \cdot \text{állandó} =$$

$$\frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \cdot 0,102 = 0,189 \frac{F}{d^2}$$

**Ezt a keménységet is mértékegység nélküli számnak kell tekintenünk.** (Okát a Brinell- keménységmérésnél már ismertettük.)



2.17. ábra Vickers-vizsgálat  
a) a mérési elvi vázlat, b) a benyomat átlói

A Vickers-keménységet a keménység számértékével és a **HV** betűkkel kell jelölni, ha a terhelés 294 N és a terhelési idő 10-15 s. Amennyiben a terhelés vagy a terhelési idő eltér az előbbiektől, a HV betűjel után a vizsgálati terhelést kp-ban, a terhelési időt s-ban, egymástól törtvonallal elválasztva kell megadnunk. Például **640 HV 40** azt jelenti, hogy a 640 Vickers-keménységet 392 N terheléssel 15-20 s terhelési idővel mértük.

Követelmény a *sík, sima és revementes vizsgálandó felület*, hogy a benyomódást az előírt pontossággal mérhessük. A próbatest vagy a vizsgálandó réteg *vastagsága* a benyomódás átlójának legalább másfélszerese legyen, hogy a vizsgálattal járó benyomódás a hátoldalon semmiféle alakváltozást ne okozhasson. A próbatest vagy a vizsgálandó réteg legkisebb vastagságára diagramok adnak tájékoztatást.

A vizsgálandó felületet merőlegesen, lökés és rezgés nélkül, egyenletesen kell terhelnünk. Az egymás melletti két lenyomat középvonala közötti legkisebb távolság a benyomódás átlójának legalább két és félszerese.

*A gyakorlatban a HV értéket általában nem számítják, hanem táblázatból olvassák ki a terhelőerő (F), valamint a lenyomat átlójának számtani középértéke (d) függvényében. Ha nem sík, hanem hengeres vagy gömbfelületű munkadarabokat vizsgálunk, a Vickers-keménység táblázati adatait alapján korrigálnunk kell.*

A Vickers-keménységmérés szűrőszerszáma gyémánt, tehát a legkeményebb anyagok vizsgálatára is alkalmas. A lenyomat kicsi, ezért legtöbbször a kész alkatrészeket sem károsítja. A kis terhelés nem töri át a vékony kérget, így segítségével, pl. betétedzett, felületileg edzett és nitridált felületek keménysége is megmérhető.

## Rockwell-féle keménységmérés

A Brinell- és Vickers-féle keménységmérések nem eléggé gyorsak, így főleg laboratóriumi, és nem gyártás közbeni tömeges mérésre alkalmasak. Erre a célra dolgozták ki a Rockwell-féle keménységmérési eljárást.

A mérés elve az, hogy **kúp alakú, gyémánt benyomótestet** vagy kétféle átmérőjű acélgolyót, két fokozatban (előterhelés majd főterhelés) a vizsgálandó felületbe nyomunk. Ezt követően a főterhelés megszüntetése után mérjük a **maradó benyomódás mélységét**. A Rockwell keménység ezzel lesz arányos.

A mérésre vonatkozó előírásokat az MSZ 105/11 szabvány ismerteti.

Kilenc féle Rockwell-keménységmérési lehetőség van:

### **A behatolótest 120°-os csúcshögű gyémántkúp.**

A keménység jele: HRA (ha a főterhelés: 490,3 N)

HRC (ha a főterhelés: 1373 N)

HRD (ha a főterhelés: 882,6 N)

### **A behatolótest 1,587 mm átmérőjű acélgolyó.**

A keménység jele: HRB (ha a főterhelés: 882,6 N)

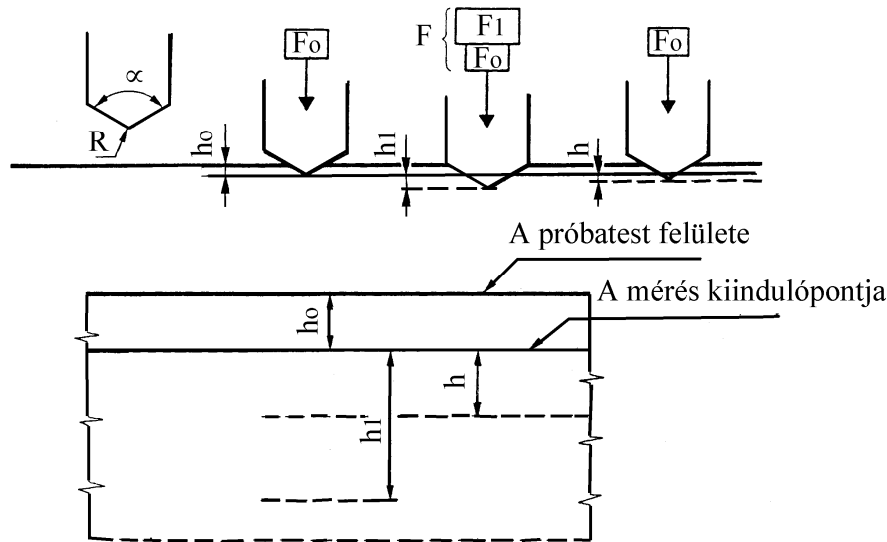
HRF (ha a főterhelés: 490,3 N)

HRG (ha a főterhelés: 1373 N)

### A behatolótest 3,175 mm átmérőjű acélgolyó.

A keménység jele: HRE (ha a főterhelés: 882,6 N)  
HRH (ha a főterhelés: 490,3 N)  
HRK (ha a főterhelés: 1373 N)

Az előterhelés mind a 9-féle mérésnél: **98,07 N**. Előterhelést azért kell alkalmazni, hogy elkerüljük a különböző felületi érdességekből származó hibát. Az előterhelés ( $F_0$ ) hatására létrejövő  $h_0$  mélység lesz a főterhelés ( $F = F_1 + F_0$ ) okozta maradó benyomódás mérésének a kiindulópontja (2.18. ábra).



2.18. ábra A Rockwell-keménységmérés elvi vázlatja

A Rockwell-mérés a már ismertetett Brinell- és Vickers eljárásokhoz képest egyszerűbb berendezést igényel, mivel a benyomódásnak nem az átmérőjét méri, hanem a benyomódás mélységét.

A Brinell és a Vickers eljárásoknál a vizsgált felületen a néhány tized, vagy század milliméteres átmérő méréséhez a felületet megfelelő nagyításban, láthatóvá kell tenni és ezred mm pontosan, mérni kell az átlókat. Ehhez a keménységmérő gépen egy megfelelő optikai berendezésre van szükség. A Rockwell-módszernél a benyomódás mélységét egy egyszerű mérőórával lehet mérni.

A mérés elve a következőkben foglalható össze. A benyomódás mélysége nem lehet a keménység mérőszáma, mivel az, fordítottan arányos a keménységgel (nagyobb benyomódáshoz kisebb keménység tartozik). Az arány megfordítása érdekében a mért értéket egy nagy számból (100-ból vagy 130-ból) kivonjuk (így egy adott számból kis számot kivonva nagy, nagyszámot kivonva kis számot kapunk).

További gondot jelent, hogy az adott (mértékegység nélküli) számból a mm-ben mért benyomódási mélységet nem lehet kivonni. Ezen okok miatt a benyomódás mélységét nem mm-ben, hanem benyomódási egységekben mérik.

Egy benyomódási egység nagysága:

$$e_1 = 0,002 \text{ mm.}$$

Ha pl. a benyomódás értéke  $h = 0,08 \text{ mm}$ , akkor ez benyomódási egységekben kifejezve:

$$e = \frac{0,08}{0,002} \cdot \frac{\text{mm}}{\text{mm}} = 40 \text{ egység (dimenzió nélküli szám),}$$

$h$  - benyomódási mélység [mm],

$e$  - benyomódás egységekben kifejezve.

Az  $e$  értéket már ki lehet vonni az adott számból, Pl. 100-ból.

Így a keménységérték:

$$100 - e = 100 - 40 = 60 \text{ HRC}$$

A Rockwell-keménység mérőszámának meghatározása a mérés típusától függően:

$$\text{HRA; HRC és HRD} = 100 - e,$$

illetve

$$\text{HRB; HRE; HRF; HRG; HRH; és HRK} = 130 - e.$$

Tehát a Rockwell-keménységet kifejező számnak nincs mértékegysége.

A vizsgálat menete a következő: az alkatrész felületét érintkezésbe hozzuk a behatoló testtel, majd lökésmentesen a kis előterheléssel benyomjuk a behatoló testet a felületbe. Ennek hatására a behatoló test kismértékben, ( $h_0$ ) mélyen benyomódik a felületbe. Így biztos kapcsolat lesz a felület és a benyomótest között. Ezután a mélységmérő-óra számlapját a kezdő állásba forgatjuk, azaz a *mérőórát nullázzuk*. Ezt követően lökés nélkül 2-8 s alatt a maximumra növeljük a főterhelést. Minthogy a benyomódás a képlékeny alakváltozás miatt csak hosszabb-rövidebb idő alatt alakul ki, a *főterhelés időtartama 2-15 s*. A behatoló test ekkor további  $h_1$  [mm] mély benyomódást okoz. *A főterhelés megszüntetése után csak az előterhelést tartjuk fenn*. Ekkor a vizsgált próbatestet vagy alkatrészt tulajdonságaitól függően jön létre a maradó benyomódás  $h$  [mm].

A legtöbb Rockwell-féle keménységmérő gép mérőóráján a keménységértékek közvetlenül leolvashatók.

A Rockwell-keménységet a keménység számértékével, a behatoló testre és a főterhelésre jellemző betűkkel kell jelölni. Például 60 HRC azt jelenti, hogy 60 Rockwell-keménység a C- skálán (gyémántkúp behatoló test, 1373 N főterhelés; 100-e összefüggés alapján).

A 9-féle eljárás lehetővé teszi a legkülönbözőbb lágy, szívós és kemény, pl. edzett acélok, fémek anyagok vizsgálatát.

Követelmény a próbatest, illetve az alkatrész tiszta, sík és sima felülete. A vizsgálandó réteg vastagsága nem lehet kevesebb a maradó benyomódás (h) mélységének nyolcszorosánál. Két szomszédos benyomódás középpontja és a próbatest széle közötti minimális távolság legalább 2 mm legyen. Domború felület keménységméréskor korrekciós tényezőt kell hozzáadnunk a keménységértékhez.

Nincs általános eljárás a Rockwell-keménységnek más keménységre való átszámításra. Tájékoztató értékeket az MSZ 105/13 szabvány közöl.

### **A mikrokeménység mérése**

A Vickers-keménységmérő gyémántgúlája olyan, relatíve nagy lenyomatot készít, amely több kristallit, szövetelem, illetve fázis keménységét jellemzi. A metallográfiában szükséges lehet egyes szövetelemek, fázisok keménységét külön meghatározni. Ez úgy lehetséges, hogy a  $136^\circ$  csúcsszögű gyémántgúlát igen kicsi,  $4,9 \cdot 10^{-2}$  N – 4,9 N erővel terhelik. Az így kapott keménységértéket **mikrokeménységnek** nevezzük. Jelölése **HVM X**, ahol X jelöli az alkalmazott terhelést pondban ( $1 \text{ pond} = 9,81 \cdot 10^3 \text{ N}$ ).

Például 1100 HVM 50 azt jelenti, hogy 0,49 N (50 pond) terheléssel mérve a mikrokeménység értéke 1100.

A mikrokeménység mérésekor a kisebb terhelőerő viszonylag nagyobb keménységi értéket eredményez, ezért kell a terhelés értékét is megadni. **A mikrokeménységet fémmikroszkópra szerelhető mikrokeménység-mérő műszerrel mérjük.**

A mikrokeménységet a következő összefüggéssel számítjuk ki:

$$HVM = 189,15 \frac{F}{d^2},$$

F - a terhelőerő [N],

d - a lenyomat átlója [mm].

### **Dinamikus keménységvizsgálatok**

A dinamikus keménységméréseknek két fajtája terjedt el. Az egyik elvileg hasonló a Brinell- eljáráshoz. Egy golyó alakú szúrószerszámot **dinamikus igénybevétellel** nyomunk a vizsgálandó felületbe, és a lenyomatból következtetünk a keménységre. *Ezen az elven működik a Poldi-kalapács is.*

A dinamikus keménységvizsgálatok másik csoportja a **rugalmas visszahatás elvén** alapul. Abból a feltételből indul ki, hogy a keményebb tárgy rugalmasabb is, tehát a rugalmas ütközés révén a ráejtett szerszámot magasabbra löki vissza. Ezen az elven működik a **szkleroszkóp**. A használatával mért értékeket **Shore-keménységnek** nevezzük.

A Shore-keménység mérőszáma a vizsgálandó felületre 254 mm magasságból leejtett, gyémántcsúccsal ellátott, kb. 0,0025 kg tömegű test rugalmas visszapattanásának a magassága.



Ez a keménység azonban nem felel meg a szokásos meghatározásnak, mert főleg a próbatest, illetve az alkatrész rugalmasságát veszi figyelembe. Emiatt olyan értelmetlen eredmények is adódhatnak, mint például az, hogy a gumi keményebb az acélnál. **E méréssel tehát nem anyagjellemző megállapítása a cél, hanem annak összehasonlító ellenőrzése, hogy pl. egy vizsgált sorozat minden darabja megközelítően azonos keménységű-e, illetve, hogy egy nagyobb felületen egyenletes-e a keménység.**

A módszer előnye, hogy gyors, egyszerűen elvégezhető, és segítségével olyan nagyméretű, illetve tömegű tárgyak is vizsgálhatók, amelyeknek felületét szűrő keménységvizsgálattal nem szabad megsértenünk, pl. a forgattyú tengely edzett csapjait.

#### 2.1.1.6 Dinamikus szilárdsági vizsgálatok

A gépalkatrészek, illetve szerkezetek egy része az üzemelés folyamán dinamikus igénybevételt szenved. Ezért ezeknek az alkatrészeknek, illetve szerkezeteknek az anyagát dinamikus szilárdsági vizsgálatnak kell alávetnünk. A leggyakrabban alkalmazott dinamikus vizsgálatok:

- a bemetszett próbatest ütővizsgálata (Charpy-vizsgálat)
- dinamikus szakítóvizsgálat

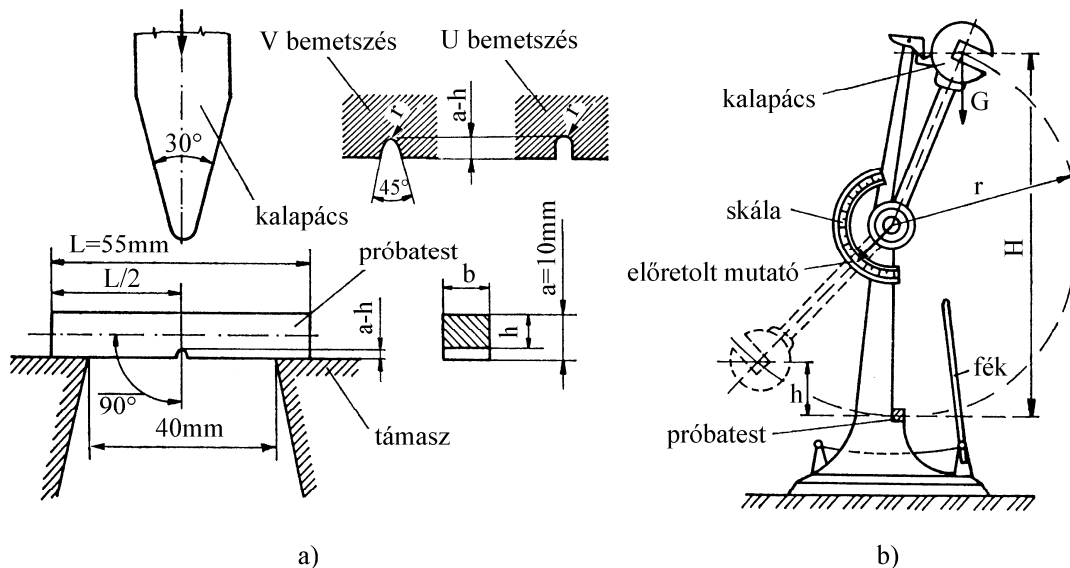
#### **Bemetszett próbatest ütővizsgálata**

A vizsgálat abból áll, hogy a közepén V vagy U bemetszésű, két végén megtámasztott próbatestet a bemetszéssel átellenes oldalról az ütőgép kalapácsával eltörjük, és meghatározzuk az eltöréshez használt energiát (törési munkát). A bemetszett próbatest ütővizsgálatával az MSZ EN 10045-1 szabvány foglalkozik.

**Ütőmunka** a próbatest eltöréséhez felhasznált ütőenergia az anyag ütésszerű igénybevétellel szembeni ellenálló képességét mutatja a Joule-ban (J) kifejezve (2.19. ábra)

Az 2.19/a. ábra jelölései a következők:

- a - a próbatest vastagsága, amely mindig 10 mm;
- b - a próbatest szélessége: 10 mm- normál méretű próbatestnél.



2.19. ábra Bemetszett próbatest ütővizsgálata  
a) a próbatest méretei, b) Charpy inga

Ha vizsgálati anyagból nem lehetséges **normál méretű próbatestet** kimunkálni, akkor 7,5 mm vagy 5 mm széles, **kisméretű próbatestet** kell készíteni.

- h - a próbatest vastagsága a bemetszés helyén: V-alakú bemetszés esetén 8 mm; U-alakú bemetszésnél 5mm.
- (a-h) - a próbatest bemetszésének mélysége [mm]: V-alakú bemetszés 2 mm; U-alakú bemetszés 5 mm.
- r - a bemetszés lekerekítésének sugara; V-alakú bemetszésnél 0,25, U alakúnál 1 mm.

A próbatestet minden oldalán meg kell munkálni a szabvány által előírt méretpontossággal és felületi érdességnek megfelelően. A bemetszés tövében megmunkálási egyenetlenség, karc, illetve sorja nem tűrhető. Ha a próbatestet hőkezelni kell, akkor a műveletet a bemetszés elkészítése előtt kell elvégezni.

Az ütőmunka vizsgálat eszköze a **Charpy-féle inga** (2.19/b. ábra). Szilárdan alapozott állványa felső részében két golyócsapágy illeszkedik, amelyek csaknem csapsúrlódás mentesen ágyazzák az ingatengelyt. Az ütőkalapácsot felső helyzetébe emelik, és ott kilincsszerkezettel rögzítik. A kilincs oldása után az ütőkalapács lefelé lendül, és körpályájának legmélyebb pontján éri a próbatestet, amely - az 3.20/a. ábra szerinti elrendezésben - két támaszon fekszik fel. **A próbatest törésekor az ütőkalapács mozgási energiájának egy része ütőmunkává alakul, a megmaradó rész viszont egy bizonyos magasságig továbblendíti az ütőkalapácsot.**

A 2.19/b. ábra jelölései szerint  $r$  az inga sugár, amelyre az ütőkalapács  $G$  súlyát redukálták. A  $H$  esési magasság, a felső és alsó kalapács helyzet függőleges távolsága,  $h$  az túllengés magassága.

Ha  $G \cdot H$  az ütéskalapács helyzeti energiája és  $G \cdot h$  a fel nem használt energia, akkor a próbatest eltörésére szükséges energia (munka):

$$KV, \text{ illetve } KU = G \cdot H - G \cdot h = G(H-h) \quad [J].$$

A töréshez felhasznált energiát (munkát) az átlendült ütéskalapács által előretolt mutató skálahelyzetéből olvassuk le. Mivel a vizsgálati eredményeket az ütéskalapács sebesség nagymértékben befolyásolja, értékét a szabványok **3,0-5,5 m/s-ban** rögzítik.

Szabványos vizsgálatnak kell tekinteni a  $300 \pm 10J$  névleges ütőenergiájú vizsgálógéppel, szabványos, normál próbatesten végzett vizsgálatot. Ilyen feltételek között kapott ütőmunkaértékeket a következőképpen kell jelölni:

- KV - a V-bemetszésű próbatest esetén,
- KU - az U bemetszésű próbatest esetén.

Például a **KV = 121 [J]** jelentése:

- 300 J névleges ütőenergiájú ütőgép,
- V-bemetszésű szabványos normál próbatest,
- a töréshez szükséges ütőmunka 121 [J].

Alkalmazhatók más ütőenergiájú vizsgálógépek is. Ebben az esetben a KV és KU- jeleket ki kell egészíteni a vizsgálógép energiáját jelölő indexszel, pl. **KV 150 = 65 [J]**, amelynek jelentése: 150 J névleges energiájú ütőgép; szabványos V-bemetszésű normál próbatest; a töréshez szükséges ütőmunka 65 J.

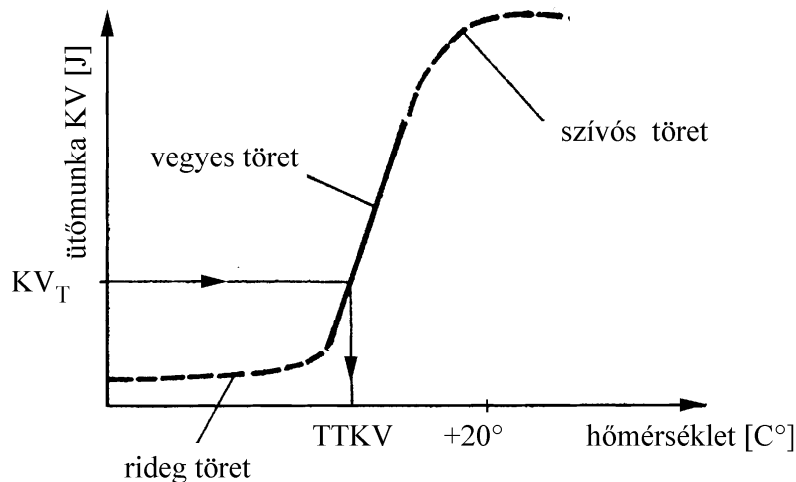
A kisméretű, V-bemetszésű próbatesttel végzett vizsgálat esetén az ütőenergiát jelölő indexszel kiegészített KV jel után a próbatest szélességét is fel kell tüntetni

Például: **KV 100/7,5 = 83 [J]** jelentése: 100 J névleges energiájú ütőgép; a kisméretű próbatest szélessége 7,5 mm; a töréshez szükséges ütőmunka értéke 83 J.

**Az ütőmunka értéke függ a próbatest hőmérsékletétől is.** Legfontosabb szerkezeti anyagunk, az acél térközepes köbös rácsszerkezetű szobahőmérsékleten, ezért hajlamos az elridegedésre. Például **csökkenő hőmérséklet hatására rideggé válik.** Ezért az acélok **ridegtörés-érzékenység** szerinti rangsorolása céljából meghatározzák a V bemetszésű próbatestek ütővizsgálata alapján az átmeneti hőmérsékletet.

**Az átmeneti hőmérséklet (TTKV)** alatt azt a hőmérsékletet értjük, amelytől az acélok *ridegen* törnek. E hőmérséklet felett *szívósak* ez alatt ridegen viselkednek. A TTKV meghatározása céljából diagramot szerkesztenek. Ehhez szabványos V bemetszésű próbatesteket készítenek, amelyeket szárazjég és 96%-os alkohol keverékében több fokozatban, különböző hőmérsékletre hűtenek (legalább 5 °C-kal a vizsgálati hőmérséklet alá). Szobahőmérséklettől kezdődően 10 °C hőmérsékletközökkel egyre alacsonyabb hőmérsékleten ütővizsgálatokat végeznek. A különféle

hőmérsékleteken nyert ütőmunkaértékek adják a vizsgált acél **elridegedési diagramját** (2.20. ábra).



2.20. ábra Az átmeneti hőmérséklet meghatározása

A diagram segítségével a TTKV a következő módon határozható meg. Mivel a repedés keletkezésének munkája azonos bemetszés-geometria esetén nagymértékben függ az acél folyáshatárától, **az átmeneti hőmérsékletet kijelölő ütőmunka értéke a folyáshatár függvénye.** A *ferrit-perlites szerkezeti acélok* ridegtörési ellenállásának jellemzéséhez  $275 \text{ [N/mm}^2\text{]}$  folyáshatárig a  $KV_T = 27,5 \text{ [J]}$ , a  $275 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ -nél nagyobb folyáshatár esetén a  $KV_T = 38,2 \text{ [J]}$  ütőmunkához tartozó hőmérsékleteket tekintjük **átmeneti hőmérsékletnek**. Jelölésük  $TTKV_{2,8}$ , illetve  $TTKV_{4,0}$ .

**A V bemetszésű próbatest ütővizsgálattal meghatározott átmeneti hőmérséklete a szerkezeti acélok ridegtörési érzékenység szerinti sorrendbe állítására alkalmas. Nem alkalmas azonban arra, hogy a megengedhető üzemi hőmérsékletre egyértelműen nyilatkozni tudjunk.** A szerkezetek ridegtöréssel szembeni biztonságát - például a szerkezetre megengedhető legkisebb üzemi hőmérsékletet - csak a következő fejezetben ismertetett törésmechanikai vizsgálatok eredményére támaszkodva lehet meghatározni.

Az ütőmunka a szerkezeti anyag szívósságának egyik igen elterjedt mérőszáma. Felhasználható a szívósságfokozó hőkezelések eredményességének ellenőrzésére, továbbá a megeresztési elridegedés kimutatására. Ezzel a vizsgálattal állapítják meg az acél öregedési hajlamát is. Az acél öregedési hajlamát az eredeti és az öregített (alakított és hőkezelt) próbatesteken mért ütőmunka értékek hányadosa jellemzi. A hegesztett kötések szívósságának egyik leggyakoribb alkalmazási területe a hegesztési hőhatásövezet vizsgálata. Az eljárás lényege, hogy a megfelelően kialakított és meghegesztett próbadarabokból kimunkált ütő- próbatestek V-bemetszése a beolvadás szélétől 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10 és 15 mm távolságban helyezkedik el. Az alapanyag átmeneti hőmérsékletén elvégzett vizsgálat eredményei lehetővé teszik a legkisebb szívósságú övezet kijelölését.

### 2.1.1.7 A ridegtöréssel kapcsolatos vizsgálatok

A ridegtöréssel azért kell foglalkoznunk, mert a legnagyobb mennyiségben használatos és egyben egyik legfontosabb szerkezeti anyagunk, az acél, hajlamos a ridegtörésre. A törés e fajtája gépek üzemeltetése közben is súlyos balesetet okozhat. A nagyméretű hegesztett szerkezetek, pl. hidak, hajók, nyomástartó edények ilyen jellegű törése tömegkatasztrófát okozhat.

Az anyagvizsgálati mérőszámokat, az anyagjellemzőket az **állapot tényezők** befolyásolják. A változó állapot tényezők hatására a képlékeny anyag is viselkedhet rideg anyagként és fordítva, a rideg anyag is képes képlékeny alakváltozásra. **A ridegség vagy képlékenységi tehát nem sajátossága az anyagnak, csupán egy állapotra vonatkozik.**

Három állapot tényezőt különböztetünk meg:

1. a hőmérsékletet,
2. a feszültségi állapotot,
3. az igénybevétel sebességét.

**A hőmérséklet hatása.** Az emelkedő hőmérséklet rendszerint növeli az anyag képlékenységi. Megfordítva a folyamatot, viszont található egy olyan alacsony kritikus hőmérséklet, amelyen az eredetileg képlékeny anyag ridegen viselkedik. A szobahőmérsékletnél alacsonyabb hőmérséklet elridegítő hatását a *Dinamikus szilárdsági vizsgálatok* című fejezetben már megismerhettük.

**A feszültségállapot hatása.** A fémes szerkezeti anyagban ébredő többtengelyű húzófeszültség hatására rideg állapotba kerülhet, a többtengelyű nyomó igénybevétel hatására, pedig az eredetileg rideg anyag is képlékenyé válhat. A többtengelyű feszültségállapot a külső és belső tényezők hatásaként jöhet létre. Külső tényezőn **az alkatrész terhelését** értjük.

**Belső tényezőként** említhetjük az anyagban levő *folyamatossági hiányokat*, pl. repedéseket, gáz- és salakzárványokat, amelyek megzavarhatják az egyébként egytengelyű feszültségi állapotot. Belső tényezőként hat továbbá, pl. az acélban az edzett *hőkezelési állapot*.

**Az igénybevétel sebessége.** Az igénybevétel sebességének, valamint az igénybevétel miatt jelentkező alakváltozási sebesség hatása abban jut kifejezésre, hogy egy bizonyos érték fölött mindinkább rideg állapotba juttatja az anyagot. Minden anyagnál található ugyanis egy olyan igénybevételi sebesség, amelyen az anyagnak csak egyenletes alakváltozása van, helyi kontrakciója már nincs. Ezt a sebességet **kritikus sebességnek** nevezzük. Sajátságaitól és a szakítási diagram alakjától függően az acél kritikus sebességértéke kb. 40-60 m/s.

**A ridegtörés jellemzője**, hogy a törést gyakorlatilag nem előzi meg képlékeny alakváltozás, és a törést okozó feszültség kisebb vagy egyenlő a folyáshatárral:

$$\sigma_{\text{törés}} \leq R_{eH}$$

A fémes szerkezeti anyagok **ridegtörési hajlama** nagymértékben függ kristályrács típusától. A lapközepes köbös térrácsnak (pl. ausztenites acélok) olyan sok csúszási síkja van, hogy a ridegtörés előfordulása gyakorlatilag kizárt. A térközepes köbös térrácsú fémek, illetve ötvözetek (pl. a ferritet tartalmazó acélok) esetében az intersztíciós atomok a csúszási síkok egy részét működésképtelenné tehetik, tehát az állapot tényezőktől függően ridegen törhetnek. A hexagonális rácsú fémeknek csak egy csúszási síkjuk van, ezért igen hajlamosak a ridegtörésre.

*A fémes szerkezeti anyagok törését vizsgáló eljárások közül a legrégebben elterjedt a bemetszett próbatest ütővizsgálata, amelyet már megismertünk. Üzemi ellenőrző vizsgálatként ezt széles körben alkalmazzák is. Később, a nagyméretű szerkezetek ridegtöréses káresetei hívták fel a figyelmet arra, hogy az anyagok ridegtörési hajlama a már megismert állapot tényezőktől függ. Ebben az időszakban a bemetszett próbatest ütővizsgálatát kiterjesztették a hőmérséklet függvényében végzett mérésekre, majd újabb vizsgálatokat vezettek be, amelyekkel a nagyméretű szerkezetek feszültségállapotát és igénybevételi módját kívánták modellezni.*

Az 1950-es évek óta ezen a területen kifejtett széleskörű kutatások eredményeként a **törésmechanikai vizsgálatoknak** két nagy csoportját dolgozták ki:

- a repedés keletkezésének vizsgálatát,
- a repedés továbbterjedésének vizsgálatát.

A **repedések keletkezésével** többnyire fémtani vizsgálatok foglalkoznak, és ezek a repedés keletkezésének okkereső vizsgálatai.

A **repedés továbbterjedését** vizsgáló eljárások az alkatrészekben, szerkezetekben meglévő repedésszerű hibák növekedésének, terjedésének feltételeit elemzik, **anyagvizsgálati mérőszámaikkal a ridegtörés elkerülésének méretezési alapját adják.**

Ezek alapján fejlesztettek ki olyan anyagjellemzőket, amelyek az anyagban levő **repedés mérete és az anyag terhelhetősége** között teremtenek kapcsolatot.

Áttekintésükhöz néhány fogalmat kell tisztázni. A **feszültségintenzitási tényező (K)** a *lineáris rugalmas közegben, a repedés csúcsának környezetében jellemzi a feszültségmezőt. Nem anyagjellemző.* Értéke az anyagra ható átlagfeszültségtől ( $\sigma$ ), a repedés hosszától ( $a$ ) és a próbatest valamely jellemző méretétől ( $x$ ) függ:

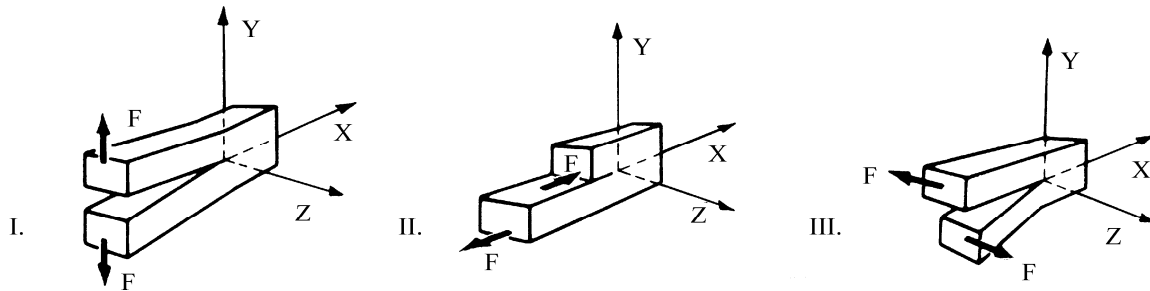
$$K = f(\sigma; a; x).$$

**Átlagfeszültségen** a keresztmetszetben egyenlőtlenül eloszló feszültség középértékét értjük. *Kimutatható, hogy hasonló módon viselkednek majd azok a próbatestek, illetve alkatrészek és szerkezetek, amelyek mérete,*

repedéshossza és átlagfeszültsége egymástól eltérő ugyan, de a kombinációjukból származó  $K$  paraméter értéke azonos. Ez azért fontos, mert lehetővé teszi, hogy a viszonylag kis méretű próbatesteken kapott eredményeket a tényleges szerkezetre adaptáljuk.

A feszültségintenzitási tényező gyakorlatban három terhelési mód szerinti jelölését a 2.21. ábra szemlélteti:

- I - a nyitó ( $K_I$ ),
- II - a csúsztató ( $K_{II}$ ) és
- III - a tépő ( $K_{III}$ ) terhelésmód.



2.21. ábra A törésmechanikában előforduló három jellegzetes igénybevétel  
 I. A terhelő erő a repedés síkjára merőleges; II. A terhelő erő a repedés síkjában és a repedés irányában hat; III. A terhelő erő a repedés síkjában, a repedés irányára merőleges

### A törési szívósság (KIC) vizsgálata

A **törési szívósság** a feszültségintenzitási tényezőnek az a kritikus értéke, ahol az instabil repedésterjedés síkbeli alakváltozási állapotban megkezdődik. Az anyag repedésterjedéssel szembeni ellenállását kifejező anyagjellemző, amelynek értéke független a próbatest méretétől.

Az **instabil repedésterjedés** a repedéshossz energiacsökkenéssel járó, hirtelen megnövekedése.

Az eljárás egy előzetes bemetszéssel ellátott és a bemetszés élében előzetesen berepesztett próbatest hajlítással vagy excentrikus szakítóvizsgálattal történő vizsgálatából áll. A vizsgálat során mérni és regisztrálni kell a terhelőerőt az elmozdulás függvényében. E diagramból kell meghatározni azt az erőt, amely a törési szívósság számításának alapját képezi.

Az MSZ 6855/2- szabvány szerint használatos **próbatest kialakítások**, a terhelési mód feltüntetésével a 2.22. ábrán láthatók.

A 2.22/a. ábra a hárompontos terhelésű hajlításra (TPB- próba), a 2.22/b. ábra a CT- típusú próbatest húzóvizsgálatára mutat példát.

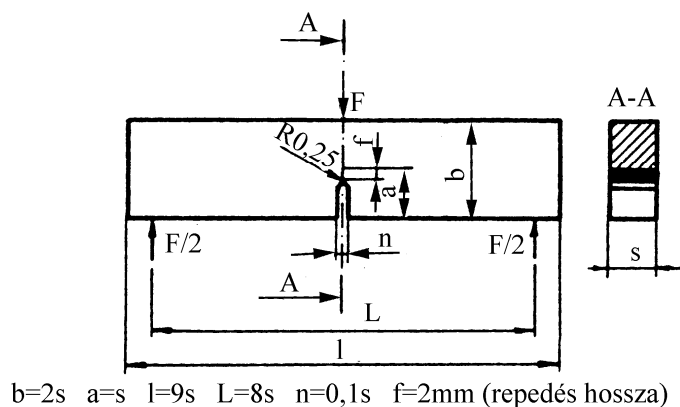
**A próbatest vastagságának a törési szívósságra jelentős befolyása van.**

A próbatest vastagságát olyanra kell választani, hogy a vizsgálat során a **síkalakváltozási** állapot lehetőleg fennálljon. A síkbeli alakváltozási állapot a

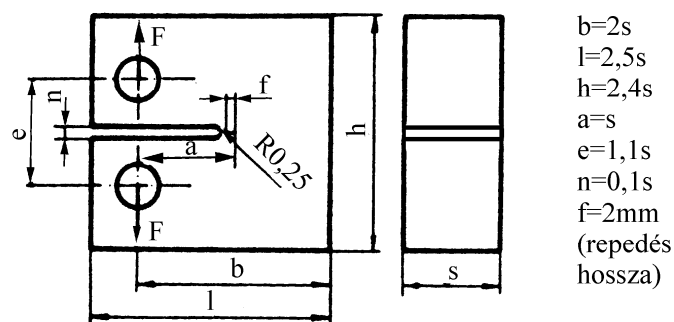
ridegtörés szempontjából a legveszélyesebb, mert ebben az esetben háromtengelyű feszültségi állapot áll fenn. Éppen ezért a törésmechanikai vizsgálatokat síkbeli alakváltozási állapotú, tehát elegendően vastag próbatesteken kell végezni. A próbatest vastagságát a 2.23. ábrán látható diagram alapján célszerű megválasztani. Fárasztóvizsgálattal, a bemetszés tövében,  $f$  méretű repedést hozunk létre.

A terhelőerő-elmozdulás diagram felvételéhez villamos mérés technikát (villamos erő és alakváltozás mérés) kell alkalmazni (2.24. ábra). Vizsgálati diagramunk a 2.25. ábrán látható 3 diagramtípus valamelyikének fog megfelelni.

Az 2.25/a ábra rideg anyag viselkedését mutatja, a 2.25/b ábra kismértékű képlékeny alakváltozás utáni törést jelez, a 2.25/c és 2.25/d ábrák diagramjai a kezdeti repedésnövekedés utáni képlékeny alakváltozás lehetőségére utal.



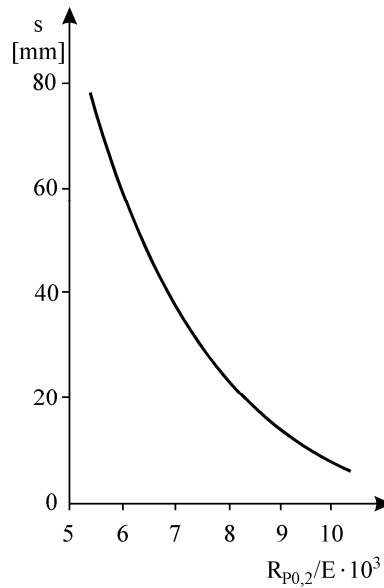
Hajlítópróba a  $K_{IC}$  meghatározásához



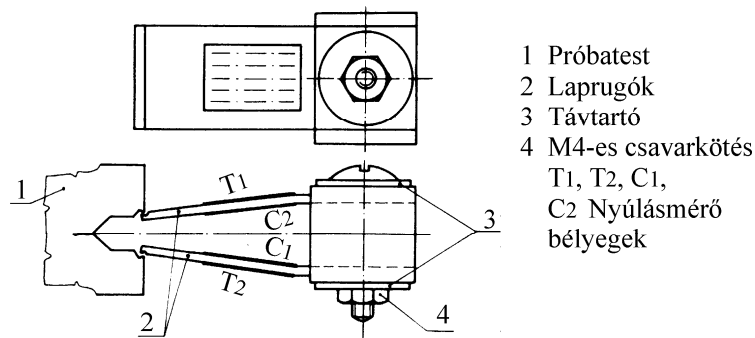
C-T próba a  $K_{IC}$  meghatározásához

2.22. ábra Szabványos próbatestek: hajlítópróba a  $K_{IC}$  meghatározásához; C-T próba a  $K_{IC}$  meghatározásához





2.23. ábra Diagram a próbatest vastagságának megválasztásához



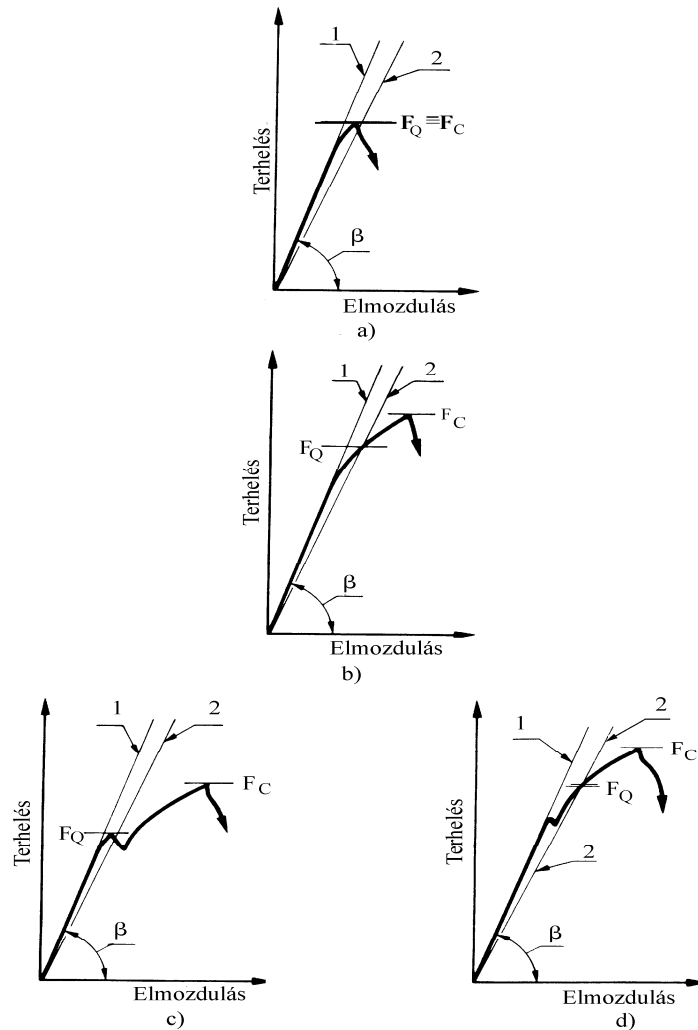
3.24 ábra Elmozdulásérzékelő kialakítása

**A vizsgálat értékelése.** A próbatest terhelése során a repedés csúcsánál többtengelyű feszültségállapot alakul ki. A repedés terjedése akkor következik be, ha a feszültségintenzitási tényező ( $K_I$ ) a terhelés során olyan értékűre növekszik, amelyet az anyag nem visel el. A repedésterjedéshez tartozó feszültségintenzitási tényező ekkor eléri az anyagra jellemző kritikus értéket:

$$K_I = K_{IC}$$

**A kritikus feszültségintenzitási tényező**, az MSZ- szerinti elnevezéssel, **a törési szívósság ( $K_{IC}$ ) már anyagjellemző** (2.25. ábra). Értéke a vizsgált anyagtól, az igénybevételi sebesség ( $v$ ) és a hőmérséklet ( $T$ ) állapot tényezőktől függ:

$$K_{IC} = f(\text{anyag}; v; T)$$



2.25. ábra Jellegzetes terhelés-elmozdulási diagramok  
 1-jelű egyenes a görbe rugalmas szakaszának meghosszabbítása  
 2-jelű egyenes 5%-al kisebb meredekségű egyenes

A mérési eredményekből, diagramokból az egyezményes törési szívósságot a következő összefüggéssel határozhatjuk meg.

Hajlító-próbánál (TPB- próba):

$$K_Q = \frac{F_Q \cdot L}{s \cdot b^{3/2}} \cdot g_1 \frac{a}{b} \quad [N/mm^{3/2}].$$

CT- próbánál:

$$K_Q = \frac{F_Q}{s \cdot b^{1/2}} \cdot g_2 \left(\frac{a}{b}\right) \quad [N/mm^{3/2}].$$

A  $g_1(a/b)$  és  $g_2(a/b)$  geometriai tényezőket a 2.26 ábra tartalmazza.

Ha a mért és a számított geometriai, szilárdsági és törésmechanikai jellemzők között az alábbi feltételek teljesülnek, akkor a számított  $K_Q$  anyagjellemző, azaz a  $K_{IC}$  törési szívósság

$$(K_Q = K_{IC}).$$

A következő feltételeknek kell teljesülnie:

$$a; (b-a); s \geq \gamma \left( \frac{K_Q}{R_{p0,2}} \right)^2,$$

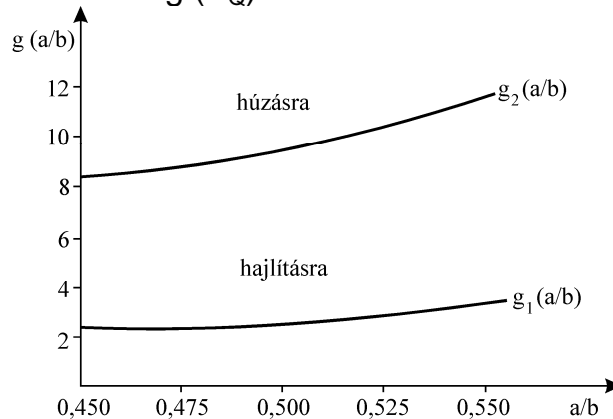
ahol:  $\gamma$ - az anyagra jellemző tényező ( $\gamma = 2,5$  - acélra;  $\gamma = 4$  - alumíniumötvözetekre),

$a; b; s$  - a próbatest méreteivel kapcsolatos (lásd. 3.22. ábra).

Továbbá legyen:

$$\frac{F_{\max}}{F_Q} \leq 1,1.$$

Ha e feltételek valamelyike nem teljesül, akkor a vizsgálat eredménye az egyezményes törési szívósság ( $K_Q$ ).

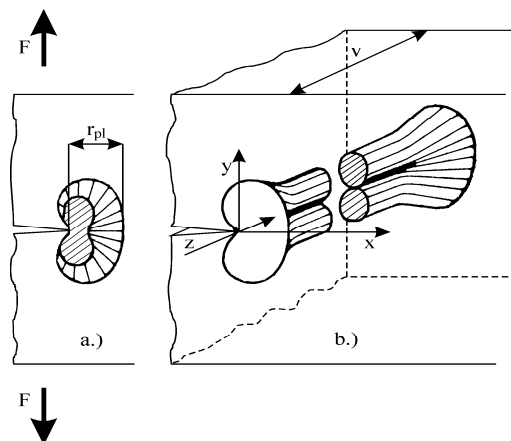


2.26. ábra A törési szívóssági vizsgálat próbatestjeinek geometriai tényezői

A törési szívósság meghatározásához figyelembe kell vennünk azt is, hogy a repedés csúcsa előtt egy olyan zóna keletkezik, amelyben képlékeny alakváltozás jön létre. Fontos követelmény, hogy a képlékeny alakváltozási zóna mérete a repedéséhez képest kicsiny legyen. A képlékeny alakváltozási zóna egy térbeli felület, amelynek képét a 2.27. ábra mutatja.

A képlékeny zóna méretét a repedés csúcsától a következő összefüggés fejezi ki:

$$r_{pl} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K_{IC}}{R_{p0,2}} \right)^2$$



2.27. ábra A képlékeny alakváltozás zónája a repedés csúcsa előtt  
a) az xy koordinátasíkban b) térben ábrázolva

**A törési szívósság ( $K_{IC}$ ) csak nagyszilárdságú anyagokra alkalmazható,** illetőleg közepes szilárdságú anyagokra is, ha a szerkezet falvastagsága igen nagy, tehát közel áll a síkbeli alakváltozási állapothoz.

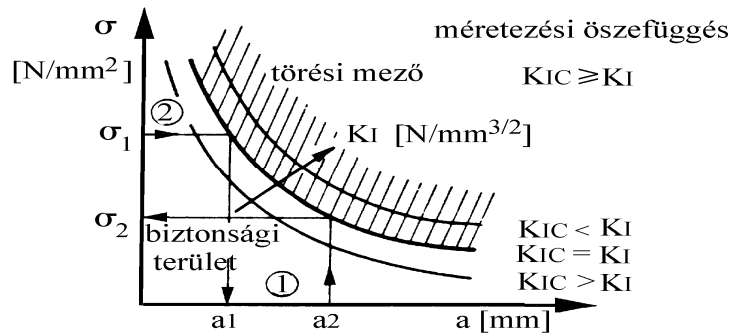
Ha meghatároztuk az anyag törési szívósságát, megállapíthatjuk azt a kritikus repedésméretet, amely már az átlagfeszültség hatására is terjedni fog. **Így a roncsolásmentes hibakereső anyagvizsgálat részére pontos útmutatás adható arról, hogy pl. a szerkezet egyes részeiben mekkora repedések engedhetők meg, és melyeket kell javítani** (2.28. ábra).

Az ábrában:

- $\sigma$  - átlagfeszültség [ $N/mm^2$ ],
- $a$  - kritikus repedésméret [ $mm$ ].

Kétféle lehetőség állapítható meg a 2.28. ábra alapján:

1. Adott feszültséghez ( $\sigma_1$ ) kijelölhető a kritikus repedés, illetve repedésszerű hiba mérete ( $a_1$ ). Ha a repedés e határértéknél kisebb, a szerkezet vagy alkatrész megfelelő. A határértéknél kisebb repedés esetén a repedés terjedési sebességének ismeretében (lásd Fárasztóvizsgálatok c. fejezet) lehetőség adódik az élettartam méretezésre is.
2. Ismert méretű repedés ( $a_2$ ) esetén meghatározható azon feszültséghatár ( $\sigma_2$ ), amely még nem okoz ridegtörést. A megengedett feszültség ( $\sigma_{meg}$ ) ezen értékből egy biztonsági tényezővel számítható.



2.28. ábra A törésmechanikai méretezés elve

### A kritikus repedéskinyílás ( $\delta_c$ ) meghatározása

Kis szilárdságú anyagokhoz a törési szívósság anyagjellemzőként nem használható. Ilyenkor az előzetesen, fárasztással előreresztett próbatest kritikus **repedéskinyílását mérjük**. A kritikus repedéskinyílás ( $\delta_c$ ) a repedéskinyílásnak az a mm-ben meghatározható mérete, amelynél a repedés instabil továbbterjedése megkezdődik. A vizsgálattal kapcsolatos előírásokat az MSZ 6855/4 szabvány tartalmazza.

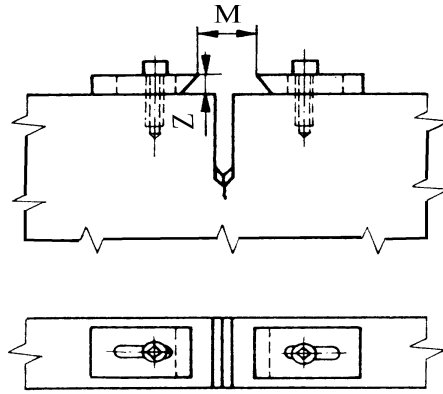
**A vizsgálat elve.** A kritikus (az instabil repedésterjedés kezdetéhez tartozó)  $\delta_c$ -repedéskinyílást számítással kell meghatározni a statikus hajlító- vagy húzóvizsgálat során felvett terhelés-elmozdulás diagramok alapján.

**A próbatest.** A szabvány szerint alkalmazandó próbatestek azonosak a *törési szívósság vizsgálatánál* közöltekkel.

A próbatest vastagsága (s) egyezzen meg a vizsgálandó anyag vagy hegesztett kötés vastagságával.

**A vizsgálat.** A terhelőerő-elmozdulás diagram felvételéhez villamos méréstechnikát kell alkalmazni (lásd 3.25. ábra). Az elmozdulás a repedés felületeinek egymáshoz képest történő eltávolodása a próbatest homloklapfelületétől Z-távolságban mérve. (2.29. ábra).

Jellegzetes erő-elmozdulás diagramokat szemléltet a 3.31. ábra. Az 2.31./a ábra olyan esetre jellemző, ahol a  $F_c$  kritikus terhelés elérésekor a próbatest eltörik, 2.31./b ábra pedig olyanra, ahol az  $F_c$  terhelés hatására hirtelen ugrás ("pop-in") mutatkozik. Az 2.31./c ábra olyan esetre jellemző, ahol instabil repedésterjedés nem lép fel, a terhelés pedig legnagyobb  $F_m$  értékének elérése után folyamatosan csökken.



2.29. ábra Elmozdulásmérés helyének kialakítása

A 2.30. ábrán az 1-jelű egyenes a görbe rugalmas szakaszának meghosszabbítása, a 2-jelű, pedig az  $F_c$  kritikus terhelés, illetve  $F_m$  legnagyobb terhelés pontjából az 1-jelűvel párhuzamos egyenes, amellyel a  $V_c$ , illetve a  $V_m$  teljes elmozdulás felbontható egyezményes rugalmas és maradó ( $V_{cp}$  illetve  $V_{mp}$ ) összetevőre.

#### A vizsgálat értékelése.

A kritikus repedés-kinyílást a következőképpen határozzuk meg:

$$\delta_c = \delta_{ce} + \delta_{cp} \quad [mm],$$

ahol a repedés-kinyílás egyezményes rugalmas összetevője:

$$\delta_{ce} = \frac{K_I^2(1-\nu^2)}{2E \cdot R_{p0,2}} \quad [mm],$$

az egyezményes maradó összetevője pedig:

$$\delta_{cp} = \frac{V_{cp}}{1 + 2,5 \frac{a+z}{b-a}} \quad [mm],$$

A  $K_I$  feszültségintenzitási tényezőt a következő összefüggéssel kell meghatározni:

$$K_I = \frac{F_c}{s \cdot b^{3/2}} \cdot g_1 \text{ vagy } g_2 \left(\frac{a}{b}\right),$$

ahol:  $E$ ;  $\nu$ ; és  $R_{p0,2}$  - a vizsgált alapanyag vagy hegesztett kötés rugalmassági modulusa,

Poisson- tényezője és egyezményes folyáshatára a vizsgálati hőmérsékleten,

$V_{cp}$  - az elmozdulás maradó összetevője [mm],

$a$ ;  $b$ ;  $s$  - a próbatest jellemző méretei (2.23. ábra),

$Z$  - a mérőék magassága [mm] (2.30. ábra),

$g_1 \left(\frac{a}{b}\right)$  ill.  $g_2 \left(\frac{a}{b}\right)$  geometriai tényezők (2.27. ábra).

A kritikus repedés-kinyílást az angolszász irodalom COD (crack opening displacement) - nek nevezi.

## A szívóssági mérőszám (JIC)

### A szívóssági mérőszám energia jellegű törésmechanikai anyagjellemző.

Abban az esetben is jellemzi a vizsgált fémötövet ridegtörési hajlamát, ha a repedéscsúcs környezetében képlékeny alakváltozás is fellép. Elméleti jelentősége elsősorban az, hogy lehetővé teszi a ridegtöréssel kapcsolatos anyagvizsgálatok eddigi eredményeinek egységes kezelését.

A következő összefüggések állnak fenn a törési szívósság ( $K_{IC}$ ), a kritikus repedéskinyílás ( $\delta_c$ ) és a szívóssági mérőszám ( $J_{IC}$ ) között:

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{J_{IC} \cdot E}{1 - \nu^2}}, \text{ és}$$

$$J_{IC} = m \cdot R_{p0,2} \cdot \delta_c,$$

ahol:

**E**;  **$\nu$** ;  **$R_{p0,2}$**  - a vizsgált alapanyag vagy hegesztett kötés rugalmassági modulusa, Poisson-

tényezője és egyezményes folyáshatára a vizsgált hőmérsékleten.

**m** - a próbadarab méreteitől függő tényező.

*A szívóssági mérőszám meghatározását az MSZ 6855/5-szabvány ismerteti.*

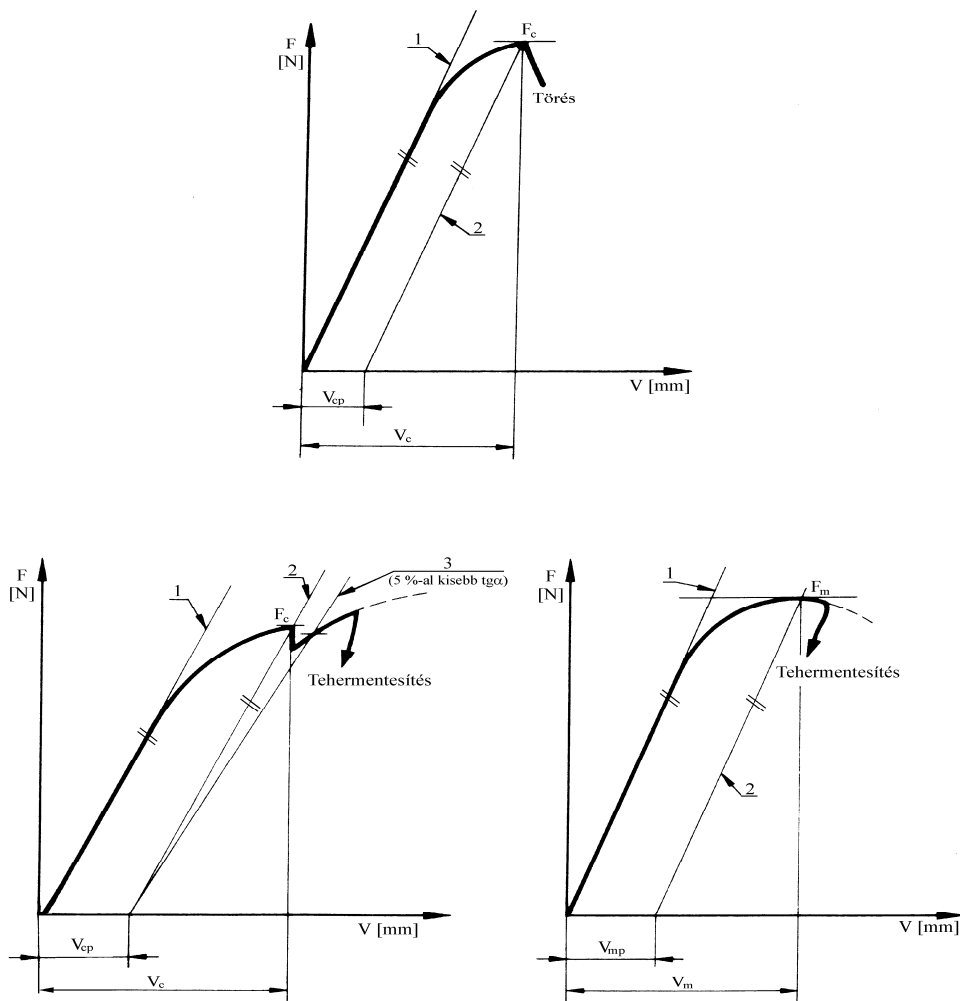
### 4.1.1.8 Fárasztóvizsgálatok

Az ismétlődő igénybevételeknek kitett alkatrészek, szerkezetek gyakran olyankor is meghibásodnak, amikor az alkatrészben ill. szerkezetben létrejövő feszültség nem éri el a folyáshatár értékét.

A kifáradás jelenségét A. WÖHLER ismerte fel az 1800-as évek végén, angliai tapasztalatok alapján. Olyan vasúti kocsik tengelyeinek törését vizsgálta, amelyeket jóval az anyag folyáshatára alatti feszültségek terheltek ( $\sigma_{ébr.} \ll R_{eH}$ ), de forgó mozgásuk következtében igen nagyszámú, ismétlődő igénybevételnek voltak kitéve. A törésekkel kapcsolatos további érdekesség volt a törött felület jellege, kagylóra emlékeztető felülete.

Az **ismételt igénybevétel hatására** az alkatrészekben ill. szerkezetekben mikroszerkezeti változások következnek be, amelyek repedéshez vezetnek, a repedés növekedhet, végül bekövetkezik a törés. A folyamatot az anyag kifáradásának, a törést, fáradt törésnek nevezzük.

Valamely próbatest, alkatrész vagy szerkezet ismétlődő igénybevétellel szembeni viselkedéséről fárasztóvizsgálattal lehet meggyőződni.

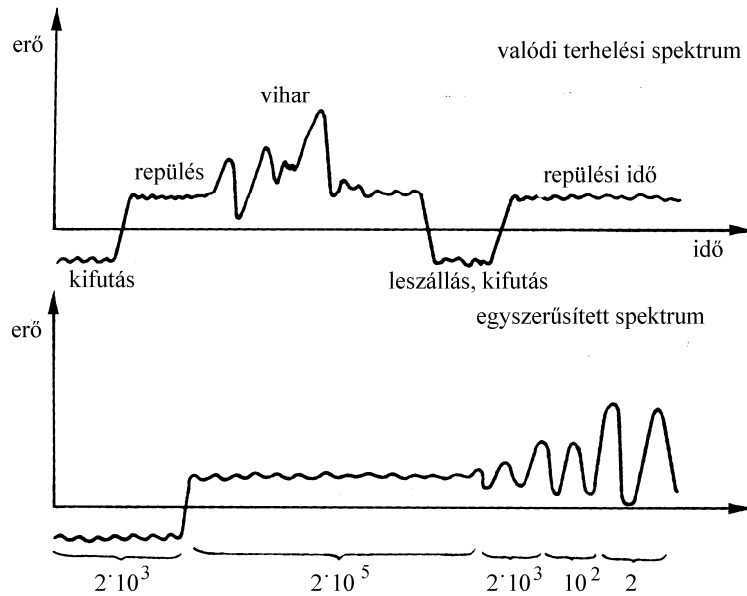


2.30. ábra Jellegzetes terhelés-elmozdulás diagram

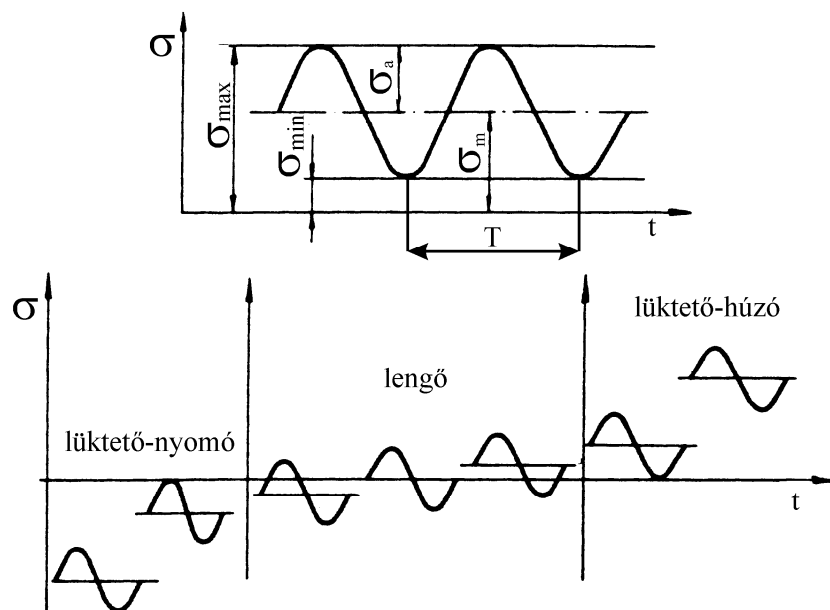
## A fárasztóvizsgálatok módszere és eszközei

**Terhelési módok.** Az üzemelő alkatrész, szerkezet ismétlődő igénybevétele leggyakrabban húzó-nyomó, hajlító-csavaró jellegű vagy ezek kombinációja. Ezen igénybevételek időbeli változása nagyon különböző lehet. A 2.31. ábra példaképpen egy repülőgép szárnyra ható **erőhatások spektrumát** mutatja, az igénybevételek tényleges ismétlődésével és az egyszerűsített modelljével. A terhelési spektrumok felvételét elektronikus úton, pl. mérőbélyeges méréssel valósítják meg. E mérésből állapítják meg a *terhelési szinteket*, az ismétlődés *frekvenciáját* és *számát*. Ezek alapján lehetővé válik az **egyszerűsített modell** megalkotása. Az ismétlődő igénybevételeket gyakran szinuszos jelalakkal modellezzük. A terhelés típusát 2.32. ábrának megfelelően csoportosíthatjuk.





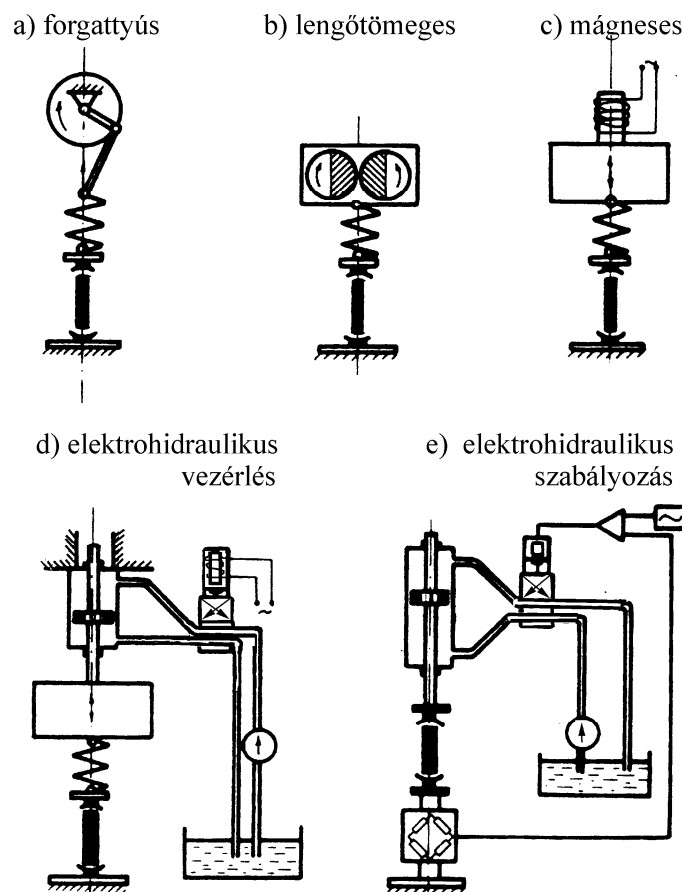
2.31. ábra Terhelési spektrumok



2.32. ábra Terhelési módok

**Fárasztási elvek, fárasztógépek.** A húzó-nyomó igénybevételek megvalósítására szolgáló anyagvizsgáló gépeket **pulzátoroknak** nevezzük. A pulzátorok leggyakrabban olyan szakítógépek, amelyekkel a terhelés időben periodikusan változtatható. A pulzátorokkal megvalósítható fárasztási elvekre a 2.33. ábra mutat néhány példát. Az 2.33/a. és 2.33/b. ábra az excenteres fárasztógépek elvét mutatja. Ezek 10-50 Hz frekvenciával működnek, maximálisan 10-50 KN terhelésig alkalmazhatók. Nagyon gyors terhelésváltozás váltóáramú elektromágnes alkalmazásával valósítható meg (3.33/c. ábra). Ez esetben a frekvencia 1000 Hz is lehet.

Hátránya ezen megoldásnak a kis terhelhetőség. A 3.34/d. ábra elvei alapján működő pulzátorok nagy terhelésre alkalmasak. Az ismétlődő igénybevételt ezeknél a pulzáló olajnyomás adja. **A pulzátorokkal nemcsak próbatesteket, hanem alkatrészeket, hegesztett kötéseket és szerkezeti egységeket is fárasztunk.** A 2.35. ábrán a **forgó-hajtító fárasztógépek** terhelési módjai láthatók. Az MSZ 105/19 a forgó-hajtogató, az MSZ 105/20 a húzó-nyomó, az MSZ 105/21 a csavaró és az MSZ 105/22 a hajtító fárasztóvizsgálatokat és a hozzájuk szükséges próbatesteket írja elő.



2.33. ábra Fárasztási elvek

A fárasztóvizsgálatokkal kapcsolatos **fogalmak és jelölések** a következők. A fárasztóvizsgálatok periodikusan változó igénybevétele következtében normál ( $\sigma$ ), csúsztató ( $\tau$ ) vagy redukált ( $\sigma_{red}$ ) **feszültség** jön létre. Bonyolultabb alkatrészek, szerkezetek vizsgálatánál gyakran csak a jellemző igénybevétel nagyságát lehet megadni.

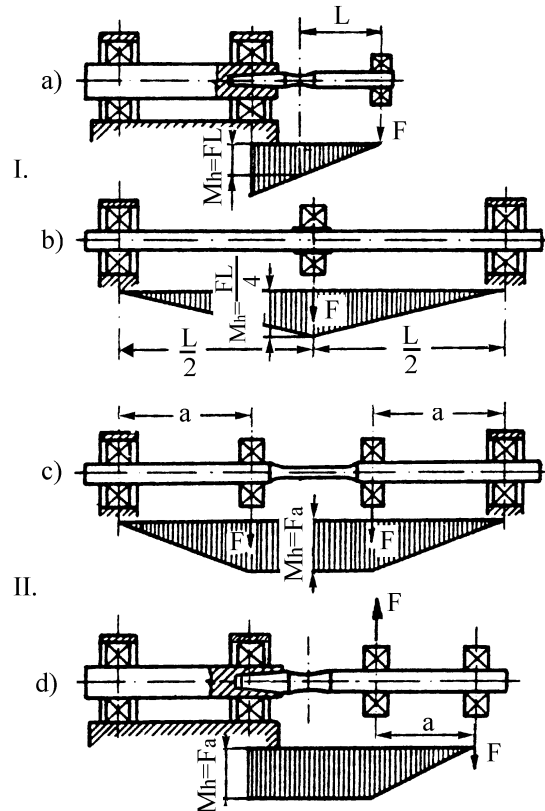
**Feszültségperiódus** feszültség-idő függvény legkisebb ismétlődő egysége (2.32. ábra).

A **középfeszültség** ( $\sigma_m$ ) a legnagyobb és a legkisebb feszültség algebrai összegének a fele.

A **feszültségarány** ( $R_s$ ) a legkisebb és a legnagyobb feszültség hányadosa:

$$R_s = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

A  **feszültséglengés**, vagy a  **feszültség amplitúdója** ( $\sigma_a$ ) a folyamatosan változó feszültség változó része. A legnagyobb ( $\sigma_{\max}$ ) és a legkisebb ( $\sigma_{\min.}$ ) feszültség algebrai különbségének a fele.



2.34. ábra Forgó-hajtogató fárasztások

### A kifáradás anyagszerkezeti lefolyása

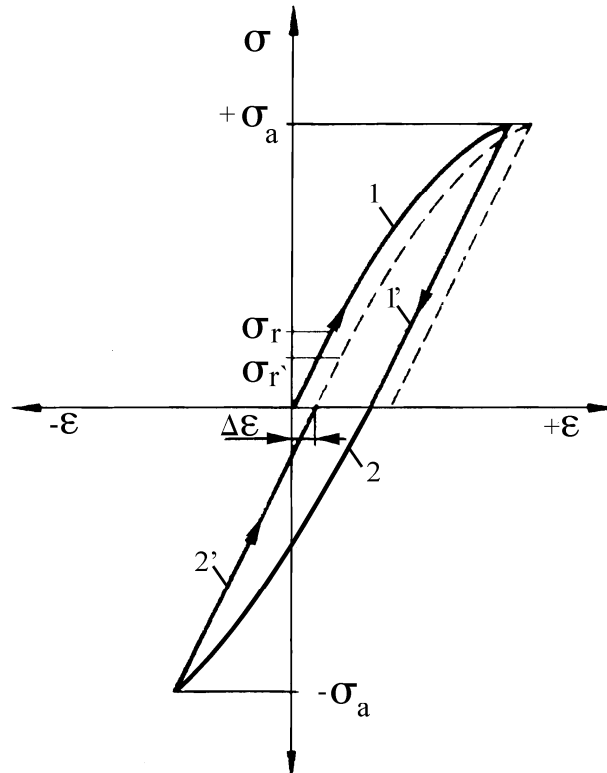
A szakítóvizsgálat című fejezetből ismeretes, hogy az anyag folyási határa a nagymértékű maradó alakváltozások kezdete. Viszont a rugalmas alakváltozás nem eddig, hanem csak a  **valódi rugalmassági határig** ( $\sigma_r$ ) tart. Az acéloké megközelítőleg csak 40-80 N/mm<sup>2</sup>, ami igen kicsi érték.

**Egy fémes szerkezeti anyagban a valódi rugalmassági határnál kisebb, ismételt, váltakozó feszültség nem okoz fáradt törést. A valódi rugalmassági határnál nagyobb, de a folyási határnál kisebb, váltakozó feszültség hatására viszont a fémek egyes kristallitjaiban, már maradó alakváltozás jön létre.**

A folyamatot a 2.35. ábra szemlélteti. Húzó igénybevétel hatására a  $\sigma_r$  rugalmassági határig a legtöbb ötvözetnél a fajlagos nyúlás lineárisan arányos a feszültséggel. A  $\sigma_r$ -nél nagyobb húzófeszültség már képlékeny alakváltozást is okoz. A  $\sigma_A$  feszültségnek az ábrából megállapítható, kismértékű fajlagos nyúlás felel meg. A terhelést megszüntetve, a leterhelést jelző 1'-vonal a  $\sigma_r$ -ig terjedő rugalmas szakasszal párhuzamosan helyezkedik el. A tisztán 1-1' húzó terhelés és azt követő leterhelés után az ötvözet

rugalmassági határa  $\sigma_r$  -ről  $\sigma_A$  -ra nő. A **Bauschinger-effektus** hatására azonban a nyomó terhelés következtében az ötvözet rugalmassági határa gyakorlatilag zérus (0) lesz és így a 2-es jelű görbe ábrázolja a feszültség és fajlagos nyúlás közötti kapcsolatot. A nyomóterhelés megszüntetése után a  $\sigma_A$  -ig terhelte próbatestnek valamilyen  $\Delta\varepsilon$  maradó nyúlása lesz. A  $\Delta\varepsilon$  maradó nyúlás értéke a  $\sigma_A$  amplitúdó feszültségtől függ. Minél nagyobb a  $\sigma_A$ , annál szélesebb lesz a 2.35. ábrán látható *hiszterézishurok*.

**Minden ismételt igénybevételi ciklus tehát egy bizonyos képlékeny alakváltozási munkával jár, amely után a próbatestben vagy alkatrészben,  $\Delta\varepsilon$  maradó alakváltozás keletkezett.**



2.35. ábra Hiszterézis-hurok keletkezése

Hangsúlyozva azt, hogy a  $\Delta\varepsilon$  értéke nagyon kicsiny, a próbatest, vagy alkatrész a második hasonló terhelési ciklusban úgy fog viselkedni, mint egy  $\Delta\varepsilon$  mértékű előzetes hidegalakítást szenvedett próbatest vagy alkatrész. Egy-egy ismételt igénybevételi ciklusban két jelenség játszódik le:

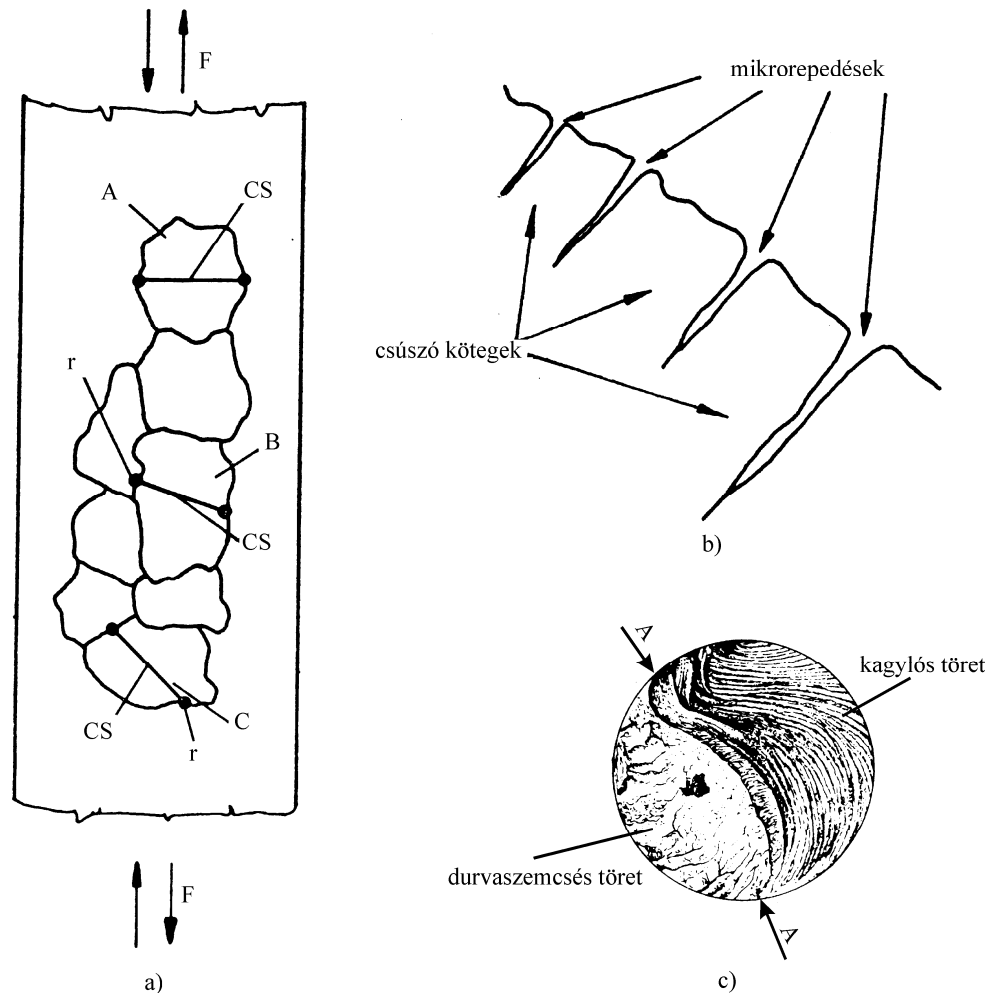
1. Minden ismételt igénybevételi ciklus egy bizonyos mértékű képlékeny alakváltozási munkát fogyaszt.
2. Minden ismételt igénybevételi ciklusban bekövetkezik a fémes szerkezeti anyagnak egy bizonyos fokú keményedése.

A második ismételt igénybevételi ciklus hiszterézis-görbáját a 2.35. ábrán szaggatott vonal mutatja.

Vizsgáljunk meg három olyan krisztallitot, amelyeknek az egyszerűség kedvéért csak egy-egy csúszósíkjuk van (2.36. ábra). A valódi rugalmassági határnál nagyobb húzó-, illetve nyomófeszültség hatására az **A** -jelű

krisztallitban csak rugalmas alakváltozás jöhet létre (2.36/a. ábra). Csúszósíkja (cs) ugyanis merőleges a terhelés irányára, tehát csúsztatófeszültség nem ébred. A **C** -jelű krisztallit csúszósíkjának iránya a fellépő terhelés irányával  $45^\circ$ -os szöget zár be, ezért benne maradó képlékeny alakváltozás jön létre. A **B** -jelű krisztallitban is létrejön képlékeny alakváltozás, ami kisebb mértékű lesz, mint a C-jelűben.

Amikor a terhelés, illetve a feszültség iránya az előbbivel ellentétessé válik, a C-jelű krisztallit - a képlékeny alakváltozás miatt - már bizonyos mértékig keményedett, de még a legkedvezőbb helyzetben van ahhoz, hogy a fordított irányú alakváltozásban részt vegyen. Bizonyos számú ismételt igénybevétel után a C-jelű krisztallitban - a húzó-nyomó igénybevételek következtében - elcsúszási vonalak, majd mikroszkópikus méretű csúszókötegek alakulnak ki. További ismételt igénybevétel hatására a C-jelű krisztallit alakváltozó képessége kimerül, és benne repedés (r) jön létre. **A kifáradás első szakaszában tehát az egyes krisztallitokban mikrorepedések keletkeznek** (2.36/b. ábra).



2.36. ábra A fáradt törés keletkezése

a) a fáradás mechanizmusa a krisztallitokban, b) a fáradt törést megindító repedések, c) a fáradt törés képe

Ezek a repedések attól függően terjednek tovább, hogy mellette milyen krisztallitok helyezkednek el. Ha a keletkezett repedés olyan krisztallittal határos, amely az ismételt igénybevételek hatására megkeményedett - mint például a *B* -jelű -, a repedés nem terjed tovább. **A kifáradásnak ezt a második szakaszát a nem terjedő repedések szakaszának nevezzük.**

A további ismételt igénybevételek hatására a *B* -jelűhöz hasonló helyzetben levő krisztallitokban is bekövetkezhet repedés. **Ha a repedés több egymás melletti krisztalliton is keresztülhatol, hossza elérheti a kritikus méretet, és a feszültség hatására terjedni kezd.** Ezt a harmadik szakaszt a **terjedő repedés szakaszának nevezzük. Ez az anyag töréséhez vezet.**

A legtöbb **repedésterjedést** leíró összefüggés valamilyen függvénye az igénybevételnek, a repedés hosszának, és egy *C* -konstansnak, amely anyagtulajdonságokat fejez ki. Így általánosan felírható:

$$\frac{da}{dN} = f(\sigma; a; C)$$

- $\frac{da}{dN}$  - a repedés ciklusonkénti terjedési sebessége,
- $\sigma$  - az igénybevételt leíró rész,
- a* - a repedés hossza,
- C* - anyagi állandó.

**Paris-** és **Erdogan** elméleti megfontolások és kísérleti adatok empirikus feldolgozása után jutottak el a ma is leginkább használt összefüggéshez:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m,$$

- $\Delta K$  - a feszültségintenzitási tényező amplitúdójának egy ismételt igénybevétel alatti megváltozása, *C* és *m* - anyagi állandók.

A kifáradás helyi jelenség, mivel a repedések mindig a próbatest vagy alkatrész legkedvezőtlenebb orientációjú, illetve a legjobban igénybe vett krisztallitjaiban keletkeznek. Ezt követően a terhelés lefolyásától és az anyag sajátságaitól függően terjednek, vagy nem terjednek tovább. A fáradt törést szenvedett próbatest vagy alkatrész töretén maradó képlékeny alakváltozás nyoma csak néhány elemi cellára vonatkozóan mutatható ki. **A törésfelület** (2.36/c. ábra) egyik része a repedés terjedésének megfelelő terület, amely kagylóra emlékeztető törésfelület, **kagylós töret**. A kialakult törésfelület nem okozza rögtön a szerkezet törését. A törésnek ez a része sima, fényes az üzem közbeni „összedörzsölődés” miatt. Amikor a kagylós (repedt) felület akkorára nőtt (repedések elérték az *AA* vonalat), az még épen maradt, lecsökkent keresztmetszetben a terhelés akkorára nőtt, hogy a benne ébredő feszültség meghaladja az anyag szilárdságát, és ekkor az anyag egyszerre

törnek. A töret e részén a törés, inkább ridegen fejeződik be, aminek eredménye a **durvaszemcsés kristályos törésfelület**.

### Kifáradási határ, a Wöhler-görbe felvétele.

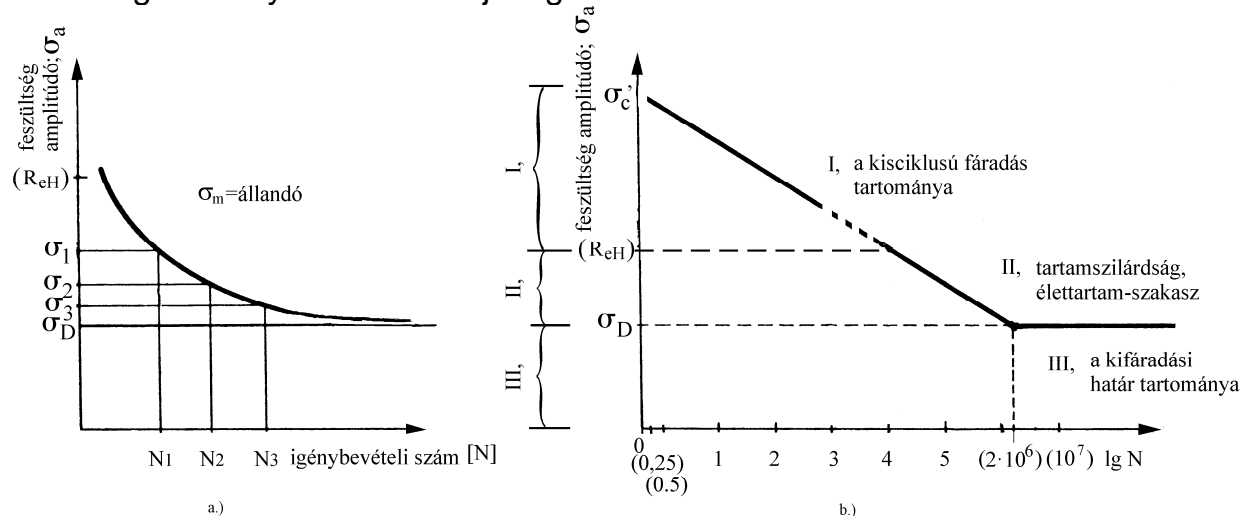
A kifáradási határ meghatározásához a Wöhler-módszer szerint 6-8 db próbatest szükséges, amelyeket különböző feszültség szinten terhelnek. Az elsőt magas, **közel a folyási határnál**

$\sigma_1$  feszültséggel terhelik, és így néhány ( $N_1$ ) igénybevétel után eltörnek (2.37. ábra). Az előbbinél kisebb  $\sigma_2$  feszültség hatására a törés az  $N_1$ -nél nagyobb  $N_2$  igénybevételi számnál következik be (2.37/a. ábra). A további próbatesteken fokozatosan csökkentve a terhelő feszültséget a határozott folyáshatárral rendelkező anyagoknál - mint pl. acéloknál - adódik egy olyan határfeszültség, amelyen a próbatest már gyakorlatilag végtelen számú igénybevétel hatására sem törnek el. Ezt a határfeszültséget **kifáradási határnak** ( $\sigma_D$ ) nevezzük.

**Az MSZ 105/14 szabvány szerint a kifáradási határ ( $\sigma_D$ ) az a legnagyobb feszültséglengés, amelyet a vizsgált anyag végtelenszer elvisel.**

A 2.37/a. ábrán a kifáradási határ ( $\sigma_D$ ) a Wöhler-görbéhez húzott **aszimptota**. A műszaki gyakorlatban végtelen számú igénybevételnek tekintik a  **$N = 10^7$  igénybevételt**. A tapasztalat szerint, ha az alkatrész eddig nem tört el, akkor a további igénybevételek hatására sem törnek el. Acéloknál tehát  $N = 10^7$  igénybevétel után a Wöhler-görbe további szakasza párhuzamos az abszcissza tengellyel. A Wöhler-görbe felvételénél az abszcisszatengelyre az ismételt igénybevételek számát ( $N$ ), az ordinátatengelyre a feszültséglengés ( $\sigma_a$ ) értékeit (2.37/b. ábra), illetve az ismétlődő terhelés típusától függő bármilyen más feszültséget kell felrajzolni.

A legtöbb fémnek vagy ötvözetnek - mint pl. alumíniumötvözeteknek - nincs kifejezett kifáradási határ, vagyis az igénybevételi szám függvényében a Wöhler-görbe folytonosan eső jellegű.



2.37. ábra A Wöhler-görbék felvétele

- a) Wöhler-görbe a  $\sigma$  - N koordináta rendszerben, b) a teljes Wöhler-görbe vázlatos alakja  $\sigma$  -  $\lg N$  koordináta-rendszerben

Az ábrázolás megkönnyítése céljából a Wöhler-görbét a  $\sigma - \lg N$  koordinátarendszerben ábrázolják. Így a görbe transzformálódik. Ezáltal a  $10^7$  igénybevételi számig folytatott kísérletek az alacsonyabb igénybevételi tartományokban is jól ábrázolhatók. Az acélananyagokra felvett Wöhler-görbének két egymástól jól megkülönböztethető – egy vízszintes és egy meredeken eső, ferde – szakasza lesz. Acélok esetében a két szakasz metszéspontja az  $N=2 \cdot 10^6$  igénybevételi számnál adódik (3.38.ábra). A Wöhler-görbe a  $\sigma$ -tengelyt a szakítókísérletből **kiszámítható kontrakciós feszültségnél** ( $\sigma_c'$ ) közelíti meg (lengő igénybevétel esetén 0,5, lüktető igénybevételnél 0,25 N mértékig).

A diagram az ordinátatengely irányában három (I-II-III.) szakaszra osztható.

**Az I. jelű szakaszon az ismételt igénybevételek során fellépő feszültségek nagyok, a folyáshatárnál nagyobbak,** tehát minden ismételt igénybevétel után nagymértékű képlékeny alakváltozás jön létre. Ez jelentős hőfejlődéssel jár. Ezért a fásztást csak kis ciklusszámmal **1/min** igénybevétellel szabad végezni. Ezért ezt a szakaszt **kisciklusú fásztás szakaszának** nevezik. A törést viszonylag kis számú ( $N = 1 \cdot 10^3$ ) igénybevétel okozza.

A kis ciklusú fáradás folyamán a repedés megjelenéséig szükséges fajlagos munka megegyezik a szakítókísérlet során meghatározott fajlagos törési munkával ( $W$ ). A terjedő repedés megjelenése nem jelent azonnali törést. A törésig több ismételt igénybevételt is elviselhet az ötvözet ( $N = 1 \cdot 10^3$ ), attól függően, hogy a terhelés  $R_{eH}$ -hoz vagy a  $\sigma_c'$ - esik közelebb. Minél alacsonyabb feszültség szinten fásztunk, annál nagyobb a törésig lehetséges igénybevételek száma. Kisciklusú fáradásra méretezik, pl. az olyan repülőgép alkatrészeket, amelyek tömegét csak így lehet csökkenteni, vagy rakétaalkatrészeket, amelyeket csak egyszer használnak fel.

**A II. szakaszt - Wood nyomán - tartamszilárdsági, illetve élettartam-szakasznak nevezzük.** Tartamszilárdságra, illetőleg élettartamra célszerű méretezni azokat a szerkezeteket, pl. az időszakosan üzemelő gépek vázszerkezetét, amelyek az **elavulás**, az **erkölcsi kopás** ideje alatt  $N = 10^4$ - $2 \cdot 10^6$  ismételt igénybevételt szenvednek. Ezeket az eszközöket nagyobb élettartam esetén sem használnák tovább elavulásuk miatt. Ha ezeket a szerkezeteket a kifáradási határ alapulvételével méreteznénk, fölöslegesen növelnénk a gépek tömegét.

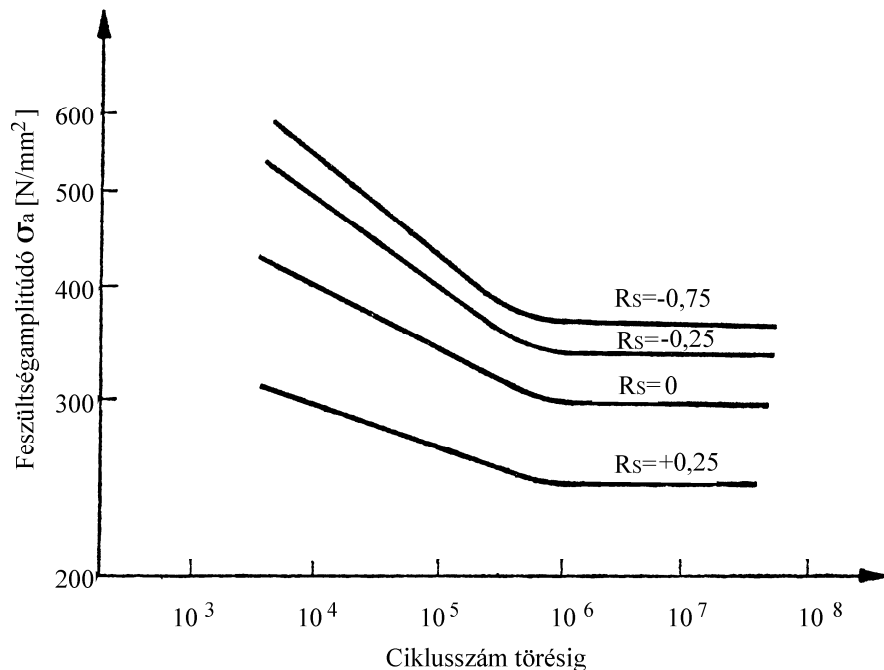
Mint az ábrán látható a diagram I.-II. szakasza szaggatott vonallal van összekötve. Ennek az a magyarázata, hogy a két szakaszt nem azonos módon veszik fel. A kisciklusú szakaszon a fásztás frekvenciája 1/min, a többi szakaszon viszont, a kísérleti idő rövidítése miatt,  $10^2 \text{ min}^{-1}$ -nél lényegesen nagyobb frekvenciával vagyunk kénytelenek elvégezni a fásztást.



**A III. szakasz a kifáradási határ tartománya.** Kifáradási határra kell méretezni azokat a gépalkatrészeket és szerkezeti elemeket, amelyeknek aránylag rövid idő alatt igen nagyszámú ( $N \geq 10^6$ ) ismételt igénybevételt kell elbírnunk. Például a belsőégésű motor forgattyútengelyének átlagos üzemi fordulatszáma  $n \cong 2000 \text{ min}^{-1}$  ( $33,3 \text{ s}^{-1}$ ). A tengely tehát már 100 üzemóra alatt eléri a gyakorlatban végtelennek számító  $N=10^7$  ismételt igénybevételt. A **tartamszilárdságot**, illetve a **kifáradási határt** igen sok tényező befolyásolja. Közülük fontosabbak a következők:

- a feszültségi állapot jellege,
- a feszültséggyűjtő helyek,
- a feszültség időbeli lefolyása,
- az igénybevétel frekvenciája,
- a próbatest mérete stb.

A 2.38. ábra például különböző feszültségaránynál ( $R_s$ ) szemlélteti a Wöhler-görbét adott minőségű acélnál.



2.38. ábra Ciklus szám törésig

**A kifáradás sztochasztikus jelenség** (időben lejátszódó véletlen, ingadozó folyamat). A független változó meghatározott értékéhez a függő változó több értéke is tartozik. Például a tartamszilárdság szakaszában adott feszültség szinten végzett egyetlen mérés - tegyük fel - Wöhler-módszerrel, nem az adott feszültség szinthez tartozó, törést okozó igénybevételek számát adja meg, hanem csupán egyetlen értéket a sok lehetséges közül. Ezért a **fárasztóvizsgálatokat és adataikat a valószínűségelmélet és a matematikai statisztika alapján kell megtervezni, illetve értékelni.**

### 2.1.1.9 Technológiai próbák

Azokat a vizsgálatokat, amelyekkel nem valamilyen anyagjellemzőt vagy szilárdsági mérőszámot határozunk meg, hanem egy technológiai eljárást modellezve az anyag várható viselkedéséről akarunk átfogó képet kapni, **technológiai próbáknak nevezzük**. A technológiai próbákat igen sok esetben a gyakorlat alakította ki, és így azt a tényt, hogy a próba bizonyos tulajdonság, jelenség megítélésére alkalmas, gyakorlati tapasztalat igazolja.

#### Fémek hajlító vizsgálata

A vizsgálat folyamán különféle keresztmetszetű próbatesteket hajlítunk adott  $D$  átmérőjű nyomótest körül, meghatározott  $\alpha$ -hajlítási szögig (2.39 ábra), vagy a repedés megjelenéséig. A hajlító vizsgálat végrehajtásának módját az MSZ ISO 7438 szabvány írja elő (2.39/a. ábra). A különböző keresztmetszetű próbatestek szélessége általában 20-50 mm, vastagsága 50 mm-ig terjedhet. A vizsgálathoz támasztóhengereket, V alakú hajlítónyereggel ellátott vizsgálógépet vagy prést használunk (2.39/b. ábra). A támasztóhengerek közötti távolság

$$l = (D + 3a) \pm a/2 .$$

A hajlítás mértéke *megadott hajlítási szögig, az első repedés megjelenéséig vagy a száruk párhuzamosságáig terjedhet*. A száruk párhuzamosságáig végzett hajlításkor a próbatestet először az előzőek szerint meghajlítjuk, majd a vizsgálógép párhuzamos, sík nyomólapjai közé helyezzük és összenyomjuk. A hajlító vizsgálat érzékenyen jelzi az anyagban levő zárványokat, szennyeződéseket, alakítási, megmunkálási repedéseket, valamint a hidegalakítás nemkívánatos hatását.

#### Hajtogató vizsgálat

E technológiai próbával a 3 mm-nél vékonyabb lemezeket és szalagokat, illetve huzalokat vizsgáljuk (MSZ ISO 7799 szabvány). A próbatestet befogópofák közé szorítjuk, majd meghatározott sugarú hengerek között, a kiinduló helyzetből váltakozva, 90°-os ívben, egymással ellentétes irányban hajtogatjuk (2.39/c. ábra).

Egy hajtogatás a szabad vég 90°-os lehajlításából, majd azt követően az eredeti helyzetbe való visszahajlításából áll. A hajtogatások között a vizsgálatot nem szabad abbahagyni. Másodpercenként legfeljebb egy hajtogatás hajtható végre.

A hajlítóhengerek átmérőjét a próbatest vastagságának alapján választjuk meg. *A vizsgálatot vagy adott hajtogatási számig - repedés megjelenése nélkül - vagy szabad szemmel látható repedés megjelenéséig folytatjuk.*

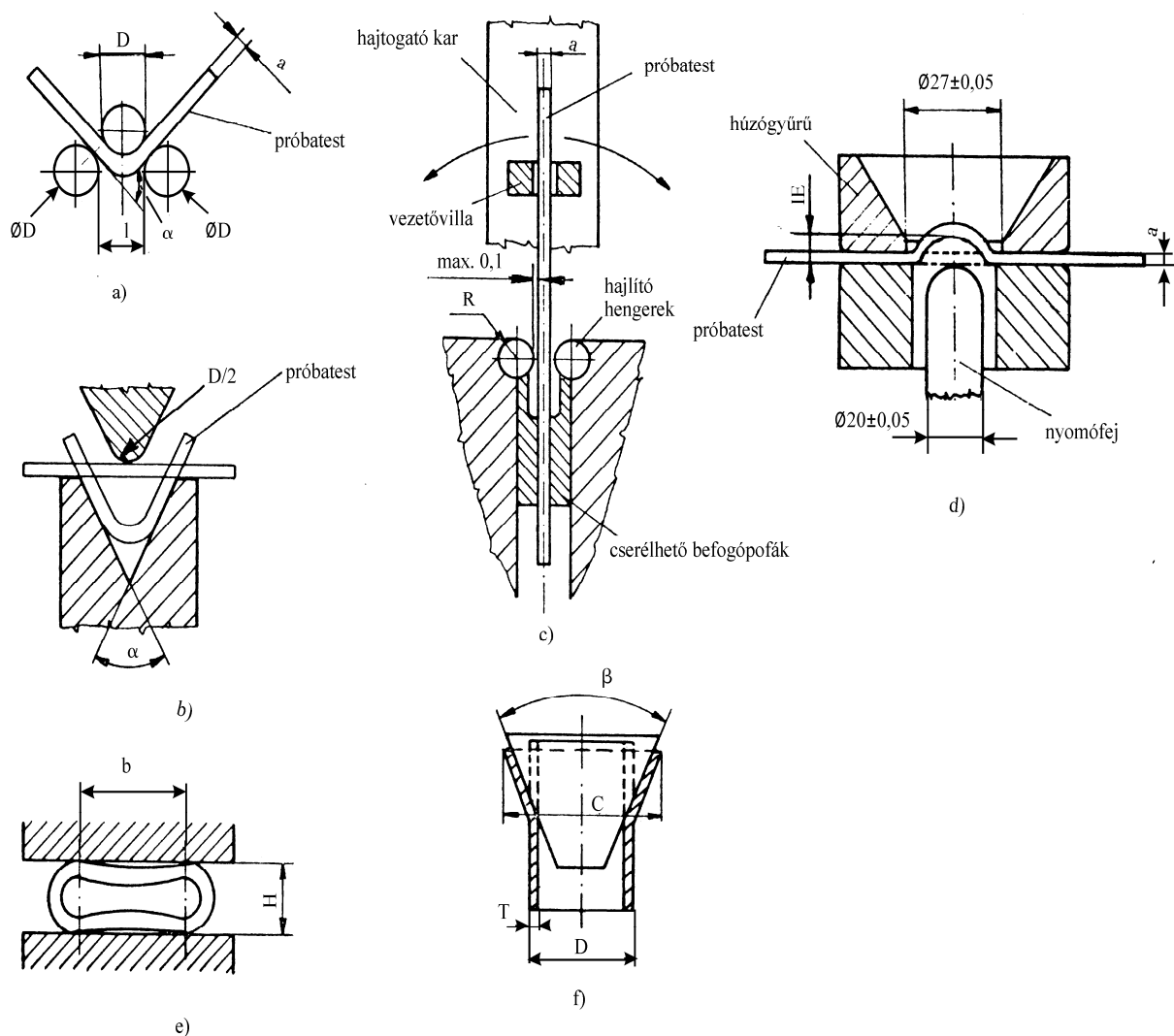
#### A lemezek és szalagok Erichsen-féle mélyítő vizsgálata

A húzógyűrű és szorítógyűrű közé fogott próbatestet gömbvégű nyomófejjel addig mélyítjük, amíg az a mélyítés helyén megreped, átszakad (2.39/d. ábra). A próbatest szélessége vagy átmérője  $\geq 90$  mm. Vizsgálat előtt a nyomófejet

és a próbatest mindkét felületét grafitos kenőanyaggal kenjük be, majd a vizsgálóberendezéssel folyamatosan, lökésmentesen terheljük. A mélyítés sebessége 5-20 mm/min lehet. Az átszakadás kezdetének azt az állapotot tekintjük, amikor a munkadarabon annyira szétnyílt a repedés, hogy teljes hosszában vagy egy részén átengedi a fényt.

A mélyítés mértéke az anyag mm-ben kifejezett **Erichsen-féle mélyítési száma**. Jele: **IE**.

Az Erichsen-féle mélyítővizsgálattal az MSZ ISO 8490 szabvány foglalkozik.



2.39. ábra Technológiai próbák

a) hajlítóvizsgálat hengerekkel, b) nyomóékkal, c) hajtogatóvizsgálat, d) a lemezek, szalagok Erichsen-féle mélyítővizsgálata e) lapító-, f) tágító próba

A fémcsövek technológiai vizsgálata

A fémcsöveket **hajlító-, lapító-, tágító-, peremező-, gyűrűtágító és gyűrűszakító vizsgálatokkal, továbbá nyomáspróbával az MSZEN 10232, 10233, 10234, 10235, 10236 és 10237 előírásai szerint ellenőrizzük.**

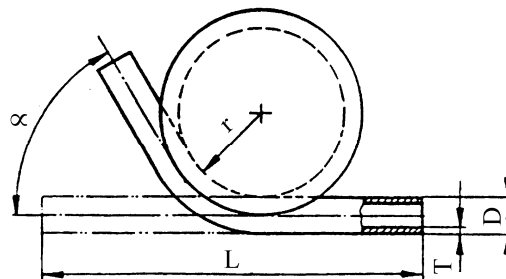
**Teljes keresztmetszetű hajlítóvizsgálat** során az egyenes teljes keresztmetszetű  $L$  hosszúságú csövet előírt  $r$  sugarú hornyolt görgő körül a termékre vonatkozó szabványban előírt  $\alpha$ -szögig hajlítják meg (2.40. ábra). A hajlítógörgő hornyának alakja meg kell, hogy feleljen a cső külső átmérőjének. Az  $r$  sugár értékét a termékre vonatkozó szabványban írják elő. A vizsgálat eredménye akkor megfelelő, ha a próbatesten nincsenek szabad szemmel látható repedések, szakadások.

**A lapítóvizsgálatot** a csőből levágott próbatesten vagy magán a csövön, két párhuzamos síklap egyenletes összenyomásával végezzük (2.39/e. ábra). A lapítás  $H$  mértékét a termék előírásai tartalmazzák, és a terhelés alatt ezt mérjük.

Ha a lapítást teljes felfekvésig végzik, akkor a próbatest belső felületei olyan hosszon érintkezzenek, amely a lapított próbatest  $b$  szélességének legalább a felével egyenlő.

A lapítóvizsgálatot a termékre vonatkozó szabvány előírásai szerint kell értékelni. Ilyen követelmények hiányában a vizsgálati eredmény akkor megfelelő, ha a próbatest felületén szabad szemmel látható repedések nincsenek. Az éleken levő kisméretű hibák nem kifogásolhatók.

Hegesztett csövek vizsgálatakor a hegesztési varrat helyzete a termékre vonatkozó szabvány előírása szerinti legyen.



2.40. ábra A hajlítóvizsgálat jelei

**A tágító vizsgálattal** a cső egyik végét  $\beta$ - kúpszögű túske egyenletes benyomásával tágítjuk mindaddig, amíg az előírt  $C$  külső átmérőt el nem éri (2.39/f. ábra). A tágító túske kúpszögét ( $\beta$ ) a termékre vonatkozó szabvány írja elő, ennek hiányában a tágító túske javasolt kúpszögei  $30^\circ$ ;  $45^\circ$  vagy  $60^\circ$ .

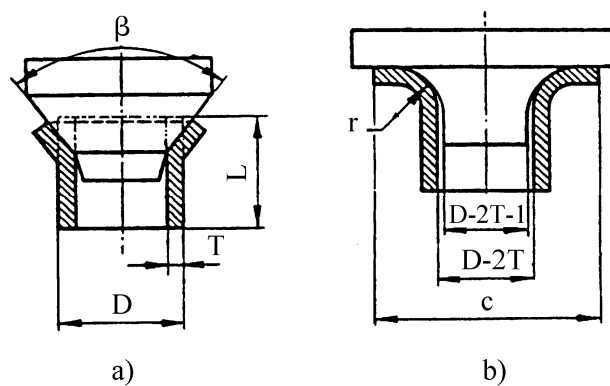
A próbatest kitágított részének  $C$  legnagyobb külső átmérőjét, mint az eredeti  $D$  átmérő százalékban kifejezett **relatív tágulását** a termékre vonatkozó szabványban írják elő.

A tágítótúske bevonható kenőanyaggal, vitás esetben a tágító túske sebessége ne haladja meg a 50 mm/min értéket. A vizsgálat eredménye akkor megfelelő, ha a próbatest felületén nincsenek szabad szemmel látható repedések.

A **peremezővizsgálat** során a cső vagy csőből levágott próbatest végén a cső hossz tengelyére merőleges síkban peremet alakítanak ki addig, amíg a perem külső átmérője eléri a termékre vonatkozó szabványban előírt értéket (2.41. ábra).

A peremezéshez a következő tuskéket alkalmazzák:

- megfelelő (általában  $90^\circ$ -os) kúpszögű előperemező tüske; (2.41/a. ábra)
- ha a vonatkozó termékszabvány előírja az  $r$  értékét, akkor peremező tüske (2.41/b. ábra).



2.41. ábra A peremezővizsgálat jelei

A próbatestbe az előperemező kúpos tuskét benyomják addig, amíg a tágitott próbatest átmérője eléri a peremátmérő kialakításához szükséges értéket. Az előperemező tüske eltávolítása után behelyezik a peremező tuskét és a próbatestre ható tengelyirányú nyomással az előtágított részből előírt átmérőjű peremet kell kialakítani.

A tuskék bevonhatók kenőanyaggal. A perem átmérőjét és a peremezőtüske  $r$  külső lekerekítési sugarát a termékre vonatkozó szabvány tartalmazza.

A vizsgálat eredménye akkor megfelelő, ha a próbatest felületén nincsenek szabad szemmel látható repedések.

A **gyűrűtágító** vizsgálat során a cső végéből levágott gyűrűt kúpos tuskével vagy a gyűrű töréséig, vagy a termékre vonatkozó szabványban előírt mértékig tágítják.

A tágító tüske kúposága annak működési hosszán 1:5 átmérorányú. A próbatest hosszúsága 10-16 mm között legyen. A vizsgálat előtt a próbatestet és a tágító tuskét célszerű kenőanyaggal bekenni.

A vizsgálat eredménye akkor megfelelő, ha az előírt mértékig tágított próbatesten nincsenek szabad szemmel látható felületi és belső hibák.

A **gyűrűszakító** vizsgálatot olyan csöveknél alkalmazzák, amelyek külső átmérője 150 mm-nél nagyobb, falvastagsága legfeljebb 40 mm.

A csőből kivágott általában 15 mm széles gyűrűt sugárirányban szakadásig terhelik (2.42. ábra).

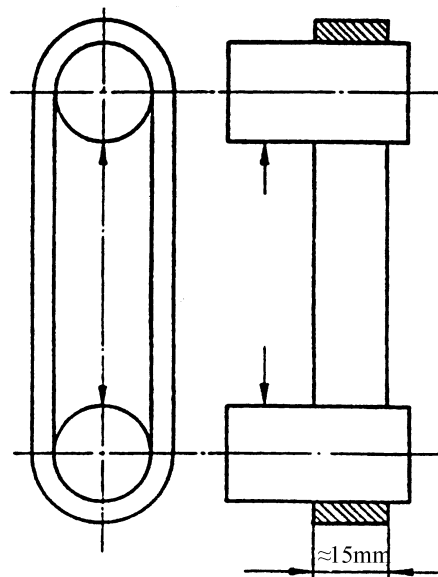
A vizsgálóberendezés két azonos átmérőjű körszelvényű csap, amelyek egymáshoz viszonyítva párhuzamos tengelyűek és egymáshoz képest elmozdíthatók úgy, hogy tengelyük párhuzamos marad, a két csap egymáshoz képest legfeljebb 5 mm/s sebességgel távolodhat.

A vizsgálatot a termékre vonatkozó szabvány előírásai szerint kell értékelni. Ilyen körülmények hiányában a vizsgálati eredmény akkor megfelelő, ha a próbatest felületén nincsenek szabad szemmel látható repedések.

### **Az acélok edzhetőségének vizsgálata**

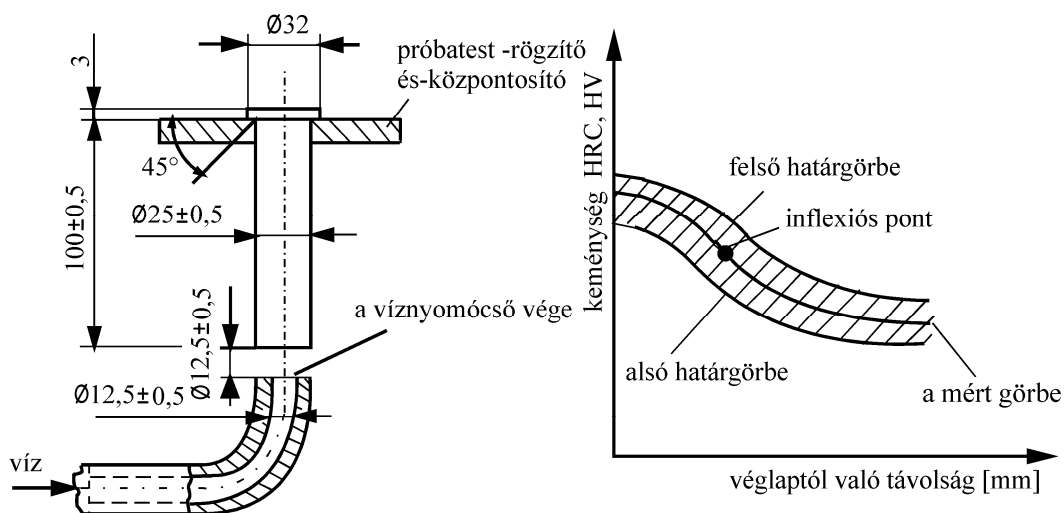
Az edzhetőséget véglapedző kísérlettel vagy más néven **Jominy-próbával** határozzuk meg. Az acélok edzhetőségi vizsgálatával az MSZ 9770 szabvány foglalkozik (2.43. ábra).

A minősítendő acéladagból a 3.43. ábrán látható próbatestet forgácsolunk ki. Ezt követően az anyagminőségre előírt edzési hőmérsékletre hevítjük, ügyelve arra, hogy felülete ne revésedjék, ne dekarbonizálódjék, illetve ne cementálódjék.



2.42. ábra A vizsgálat elrendezése

Adott idejű hűntartás után a próbatestet - hűtőkészülékben - a véglapjára irányított vízszugárral lehűtjük. Természetesen a véglaptól távolodva a hűtési sebesség egyre csökken.



2.43. ábra Jominy-véglapedző próba  
a) a próba elrendezési vázlat, b) Jominy-sáv és görbe

Ezután a próbatestet hosszában, két egymással szemben levő alkotója mentén 0,4-0,5 mm mélységben végig köszörüljük. Közben vigyázunk arra, hogy a felület ne melegedjen fel, nehogy a kialakult szövetszerkezet keménysége megváltozzék.

A két köszörült felületen a véglaptól távolodva 1,5; 3,0; 5,0; 7,0; 9,0; 11,0; 13,0; 15,0 stb. mm távolságban Rockwell C vagy Vickers- módszerrel keménységet mérünk. Eredményeit a véglaptól való távolság függvényében ábrázolva az ún. Jominy-görbét kapjuk. **A Jominy- vagy másként az edzhetőségi görbe kezdeti szakasza azt a legnagyobb keménységet mutatja, amelyre a vizsgált acél edzhető.**

Az acélok edzhetőségét *grafikusan* vagy *számszerűen* írják elő. Az anyagszabványok az egyes acélminőségekhez *alsó* és *felső* határgörbével határolt Jominy-sávot adnak meg. A vizsgálattal meghatározott Jominy-görbének ezen a sávon belül kell lennie. Az edzhetőségi számok a Jominy-görbe pontjainak koordinátái, amelyeket egy adott keménységnek a véglaptól való távolságával vagy az edzett véglaptól megadott távolságban mért keménységekkel adunk meg. Például a J45-6/18 azt jelenti, hogy az acél keménysége 45 HRC, az edzett véglaptól mért 6-18 mm közötti távolság valamely pontjában.

### 2.1.2 Kémiai vizsgálatok

A gépészmérnökök számára a kémiai vizsgálatok közül a legfontosabbak:

- a fémek és fémötvözetek vegyi összetételének vizsgálata és
- a korróziós vizsgálatok

A kémiai vizsgálatokat elsősorban vegyészek végzik, viszont a vizsgálatok előírása és eredményeinek felhasználása már gépészmérnöki feladat.

## A vegyi összetétel vizsgálata

A kémiai összetételt általában kétféle módszerrel határozzák meg:

- a kémiai reakciók alapján,
- a fizikai mérések alapján.

**A kémiai reakciókon** alapuló vegyi összetétel meghatározásához valamilyen forgácsolási eljárással apró forgácsot kell készítenünk. A különböző elemek százalékos meghatározását *tömeg és térfogatmérési* módszerekkel végzik.

**A fizikai mérésekkel** való összetétel-meghatározás általában gyorsabb eljárás. Közéjük tartozik, pl. a **színképelemzés**. Alapja a gerjesztett gázok vonalas színképe. A próbadarab felületéről szikrakisülésekkel gerjesztve párologtatják el a vizsgálandó anyagot. Az összetételre, az egyes elemekre jellemző színképvonalakból, illetve a vonalak intenzitásából lehet következtetni.

A spektroszkópos vizsgálatkor a színképvonalak eloszlását, intenzitását vizuálisan hasonlítják össze ismert összetételű ötvözetek színképével, ezért erősen szubjektív és nagy gyakorlatot igénylő eljárás. Amikor a színképet nem szabad szemmel figyeljük meg, hanem a teljes optikai tartományt lemezre fényképezzük, **spektrográfiáról** beszélünk. Ez pontosabb elemzést tesz lehetővé.

## Korróziós vizsgálatok

**Segítségükkel a fémek, illetve ötvözetek különböző közegekben meghatározott feltételek közötti korrózióállósága határozható meg.**

A korrózió megjelenési formái a következők:

- egyenletes felületi korrózió,
- egyenlőtlen felületi korrózió, mint például a bemaródásos korrózió; lyukkorrózió,
- szelektív korrózió és kristályközi korrózió,
- feszültségkorrózió.

Az **egyenletes felületi korrózió** az egész felületet megtámadja és azon többé-kevésbé egyenletes elvékonyodást okoz.

A **bemaródásos korrózió** esetén a korróziós roncsolódás mélysége és átmérője közelítőleg azonos méretű.

**Lyukkorrózióról** beszélünk akkor, amikor a korrózió nyomán kis átmérőjű és az átmérőnél lényegesen mélyebb lyuk keletkezik.

**Szelektív korrózió** során az ötvözetnek csak egyik alkotója megy oldatba, vagy pedig az egyik alkotórész a másiknál vagy a többinél nagyobb arányban oldódik.

A **kristályközi (interkristallin) korrózió** olyan túlnyomórészt homogén szerkezetű ötvözetekben fordul elő, amelyekben a szemcsehatárok mentén a kristallitok anyagánál elektropozitívabb szennyeződés vagy kivált fázis található. A korrózióknak ez a fajtája különösen azért veszélyes, mert az alkatrész vagy szerkezeti elem belsejében észrevétlenül terjed, a kristallitok között megszünteti a fémes kapcsolatot és ezáltal az alkatrész vagy szerkezeti elem szilárdságát, szívósságát nagymértékben csökkenti.



A **feszültségkorrózió** tulajdonképpen kristályhatármenti korrózió, aminek létrejöttét elősegíti, illetve a korróziós folyamatot meggyorsítja az alkatrészt vagy szerkezeti elemet terhelő mechanikai igénybevétel, illetve a keletkező feszültség.

A korróziós vizsgálatok két csoportba sorolhatók:

- az ún. természetes kitéti,
- a laboratóriumi gyorsított vizsgálatok.

**A természetes körülmények között végzett, úgynevezett kitéti korróziós vizsgálatokban** elsősorban a levegőben levő szilárd és gázszenyvezők, valamint a levegő nedvességtartalma határozza meg a korrózió sebességét. E vizsgálatok adják a szerkezeti anyagok korróziós viselkedésének legmegbízhatóbb eredményét. Hátrányuk, hogy hosszú időt igényelnek, mivel a természetben lejátszódó korróziós folyamat lassú. Évekig is eltarthat ugyanis, amíg a munkadarabon számottevő korrózió jelentkezik.

**A laboratóriumi gyorsított korróziós vizsgálatok** rövidebb idő alatt adnak eredményt. A reakciók meggyorsítására sokféle lehetőség van. Használhatunk agresszívabb, koncentráltabb vagy melegebb oldatot, és intenzívebbé tehetjük a fém, illetve fémötvözet érintkezését az oldattal. A gyorsított laboratóriumi vizsgálatokat a különböző helyeken végzett korróziós vizsgálati eredmények egyértelmű összehasonlíthatósága céljából szabványosították.

A fontosabb laboratóriumi vizsgálatok a következők:

- **Korróziós vizsgálat folyadék alatt.** Az edénybe helyezett próbatestre nyugalomban levő oldat hat.
- **Időszakos alámerítéssel végzett korróziós vizsgálat.** A próbatestet szabályosan váltakozva oldatba merítik és kiemelik.
- **Sósködállósági igénybevétel.** A marószert sópermet formájában hat a vizsgálandó próbatestre.
- **Főzőkísérlet.** A korróziós vizsgálatot forrásban levő oldatban végzik.
- **Gázok okozta korrózió vizsgálata.**
- **A korrózióálló acélok kristályközi korróziós hajlamának vizsgálati módszerei.**

Mind a természetes kitéti vizsgálatok, mind a laboratóriumi vizsgálatok eredményeit ki kell értékelnünk.

A fémek egyenletes felületi korróziójának kiszámítása a **felületegységre vonatkoztatott tömegveszteség ( $\Delta m_A$ )** alapján történik:

$$\Delta m_A = \frac{10^4 \cdot \Delta m}{A} \quad [g / m^2],$$

$\Delta m$  - a tömegveszteség [g],

A - a korrózióknak kitétt felület nagysága [cm<sup>2</sup>].

A felületegységre vonatkoztatott tömegveszteséget a különböző sűrűségű fémes szerkezeti anyagok korróziós viselkedésének közvetlen összehasonlításához nem szabad felhasználni.

A **vastagságcsökkenés ( $\Delta s$ )**:

$$\Delta s = \frac{10 \cdot \Delta m}{A \cdot \rho} \quad [\text{mm}],$$

- $\Delta m$  - a tömegveszteség [g],  
 $A$  - a korrózióknak kitett felület nagysága [cm<sup>2</sup>],  
 $\rho$  - a sűrűség [g/cm<sup>3</sup>].

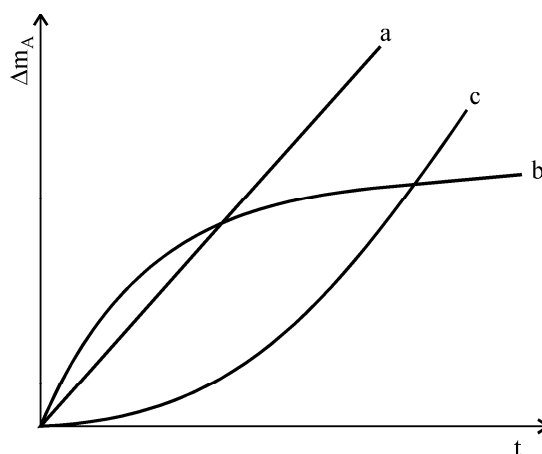
A vastagságcsökkenés kiszámítása lehetővé teszi, azonos korróziós igénybevételi idők mellett a különböző sűrűségű fémes szerkezeti anyagok korróziós viselkedésének összevetését.

**Tömegveszteséggel kifejezett korróziósebesség ( $V_m$ )**:

$$V_m = \frac{10^4 \cdot \Delta m}{A \cdot t} \quad [\text{g/m}^2\text{h}],$$

- $\Delta m$  - a tömegveszteség [g]  
 $A$  - a korrózióknak kitett felület nagysága [cm<sup>2</sup>]  
 $t$  - a tényleges korróziós hatás időtartalma [h]

A tömegveszteséggel kifejezett korróziósebesség diagramon is ábrázolható (2.44. ábra).



- a - egyenletes sebességű korrózió  
 b - lassuló korrózió  
 c - gyorsuló korrózió

2.44. ábra A tömegveszteséggel kifejezett korróziósebesség

A különböző fémes szerkezeti anyagok korróziós viselkedésének összehasonlítására a **vastagságcsökkenéssel kifejezett korróziósebesség** felel meg:

$$V_s = \frac{8760 \cdot \Delta m}{A \cdot \rho \cdot t} \quad [\text{mm}/\text{év}]$$

(Megjegyzés: 1 év (365 nap) = 8760 óra).

- $\Delta m$  - a tömegveszteség [g],  
 $A$  - a korrózióknak kitett felület nagysága [ $\text{cm}^2$ ],  
 $\rho$  - a sűrűség [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ],  
 $t$  - a tényleges korróziós hatás időtartalma [h].

A vastagságcsökkenéssel kifejezett korróziósebesség alapján a fémes szerkezeti anyagok korróziós csoportokba sorolhatók a 2.1. táblázat alapján.

2.1. táblázat Korróziós fokozatok (csoportok)

Korrózió s fokozat	Korróziósebesség ( $v_s$ ) [mm/év]
0	10 felett
1	3,0 felett 10-ig
2	1,0 felett 3,0-ig
3	0,3 felett 1,0-ig
4	0,1 felett 0,3-ig
5	0,03 felett 0,1-ig
6	0,01 felett 0,03-ig
7	0,003 felett 0,01-ig
8	0,003-ig

Az egyenlőtlen felületi korrózió értékeléséhez szükséges jellemzők jelölését, mértékegységét a korrózió fajtájának függvényében a 2.2. táblázat tartalmazza.

Az **átlagos vastagságcsökkenést** ( $\Delta \bar{S}$ ) a következő összefüggéssel kell kiszámítani:

$$\Delta \bar{S} = \frac{10 \cdot \Delta m}{A \cdot \rho} \quad [\text{mm}],$$

$\Delta m$ ,  $A$ ,  $\rho$  - értelmezését a 2.2. táblázat tartalmazza

2.2. táblázat A korrózió minősítéséhez szükséges jellemzők és mérésük

Jellemző	Jelölés	Mértékegység	A korrózió fajtája				
			bemaródásos	lyukkorrózió	szelektív	Kristályközi	
A korrózió- nak kitett felület	nagysága	A	cm <sup>2</sup>	+	+	*	-
	vastagsága	s	mm	+	*	*	+
Sűrűség	ρ	10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	+	*	-	-	
Tömegveszteség	Δm	g	+	*	-	-	
Az igénybevétel időtartama	t	h	+	+	+	+	
Behatolási mélység	l	mm	*	+	*	-	
A helyi korróziós „támadások”	száma	n	-	*	+	*	-
	felülete	A <sub>l</sub>	cm <sup>2</sup>	*	*	*	-

+ a mérési adatok meghatározása szükséges;

\* a mérési adatok meghatározása ajánlott;

- a mérési adatok meghatározása nem szükséges.

A korrózió legnagyobb behatolási sebessége:

$$V_{l_{\max}} = \frac{l_{\max}}{t} \quad [mm/h],$$

$l_{\max}$  - a korrózió behatolásának legnagyobb mért mélysége [mm],

t - a tényleges korróziós hatás (igénybevétel) időtartama [h].

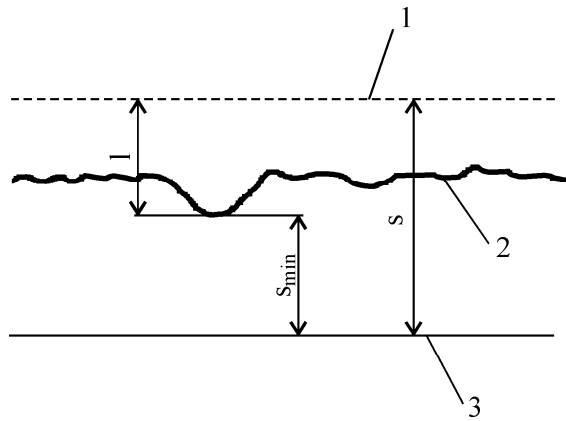
A **mélységi faktort (f)** a legnagyobb behatolási mélységből és az átlagos vastagságcsökkenésből lehet kiszámítani:

$$f = \frac{l_{\max}}{\Delta S}$$

Az  $f$  - mélységi faktor értéke legfeljebb 1. Ez az érték minél közelebb van az 1-hez, a korrózió annál inkább tekinthető egyenletesnek.

A behatolási mélység mérését a korróziós igénybevételnek megfelelően a próbatest egyik vagy mindkét oldalán lehet mérni.

Bemaródásos és lyukkorrózió esetén a mérés módját a 2.45. ábra szemlélteti. A bemaródás mélysége mérhető finommérőórával a korróziós termék eltávolítása után; mikroszkópos méréssel vagy a felület fokozatos gépi marásával a legmélyebb bemaródás eltűnéséig és az azt követő vastagságméréssel.



- 1 eredeti felület
- 2 felület a korróziós igénybevétel után
- 3 korróziótól védett felület
- s a próbatest eredeti vastagsága
- $s_{\min}$  a próbatest legkisebb vastagsága a korróziós igénybevétel után
- l a bebaródás mélysége

2.45. ábra Korrózió mérési módja

A korróziós behatolás mélysége (l) a következő egyenlettel számítható:

$$l = s - s_{\min}$$

Szelektív és kristályközi korrózió esetén a behatolási mélységet metallográfiai úton csiszolaton lehet mérni. Nagymértékű korrózió esetében a megtámadott felület nagyságát is meg kell határozni. A bebaródásos, a lyuk- és a szelektív korrózió helyi támadásainak számát (n) akkor lehet meghatározni, ha a jelenség helyileg elhatárolt. A támadási helyeket a teljes felületen vagy az igénybe vett felületrészen megszámlálják, majd a felületegységre vonatkoztatják. Ha a korrózió megjelenési formája lehetővé teszi, akkor a helyi támadási felületet ( $A_i$ ) is meg lehet határozni.

A korrózióálló acélok kristályközi korróziós hajlamának vizsgálata során a próbatesteket az adott oldatban történő adott idejű főzés után hajlító - lapító és metallográfiai vizsgálatnak vetik alá. (MSZ 2670/1)

Kristályközi korrózióval szemben ellenálló a vizsgált próbatest, ha a húzott felületén nincsenek repedések.

Ha a termékre vonatkozó előírás mást nem tartalmaz, a metallográfiai vizsgálat alapján akkor ellenálló kristályközi korrózióval szemben a vizsgált próbatest, ha a felületről kiinduló szemcsehatárok roncsolódásának átlagos mélysége 0,03 mm-nél nagyobb.

### 2.1.3 Fémtani vizsgálatok

A fémtan a metallográfiából fejlődött ki. Legfőbb módszere a vizsgálandó szerkezeti anyag szövetének mikroszkópos és makroszkópos szemrevételezése volt.

A fémtan tudományának és a műszaki gyakorlatnak rohamos fejlődése megkívánta, hogy a metallográfia mikroszkópos és makroszkópos vizsgálatai által szolgáltatott információknál részletesebb és pontosabb ismereteket kapjunk a fémes anyagok szerkezetéről. Ezért az előbbieken kívül a fémtani vizsgálatok közé tartozik az atomrácsszerkezet röntgensugaras vizsgálata, továbbá az elektronmikroszkópos vizsgálatok is.

### **A próbatest előkészítése a mikroszkópi vizsgálathoz**

Minden mikroszkópi vizsgálat *próbatétel*lel kezdődik. *Követelménye, hogy a vizsgálandó próbatest, a csiszolat, mind az összetétel, mind a szövetszerkezet szempontjából jellemző legyen az alkatrészre, illetve a termékre.* A csiszolatok tetszőleges forgácsoló megmunkálással metszhető ki. Gondosan ügyelnünk kell azonban arra, hogy a csiszolat ne melegedjen fel oly mértékben, hogy az anyag szerkezetében változás következzen be. A kimunkált csiszolat felülete ne haladja meg a 2-4 cm<sup>2</sup>-et, mert a nagyobb felület egyenletes előkészítése hosszadalmas.

A vizsgálandó felület *durva előkészítése köszörüléssel* hajtandó végre, majd a próbatestet a könnyebb csiszolás és polírozás végett műgyantába célszerű ágyazni. Ezután következik a **csiszolás** egyre finomabb szemcséjű csiszolópapírral vagy vászonnal. A használatos papírok számozása: P80; P100; P120; P150; P180; P500; P800; P1000. *A mind finomabb csiszolópapírokkal az előző karcokra merőleges irányban kell csiszolnunk mindaddig, amíg az előző csiszolás karcai el nem tűntek.*

A csiszolópapírt általában villamos motorral hajtott 200-1000 min<sup>-1</sup> (3,33-16,66 s<sup>-1</sup>) fordulatszámmal forgó tárcsákra feszítjük. A nedves gépi csiszolás kizárja a felület felmelegedését, továbbá a csiszolópapíron végigfolyó víz állandóan leöblíti a képződött fémport és a papírról levált szemcséket.

A kézi csiszolás hosszadalmasabb. A csiszolópapírt vagy vásznat üveglapra feszítjük és rajta a próbatestet ide-oda mozgatjuk.

A csiszolás befejeztével folyóvízzel kell megtisztítanunk a próbatestet a szennyeződésektől. Ezt követi a **fényesítés** (polírozás), ami elő- és készre fényesítésből áll. Célja egyrészt a legfinomabb minőségű csiszolópapír okozta karcok eltüntetése, másrészt az úgynevezett **Beilby-rétegnek**, a próbatest felületén a csiszoláskor keletkező elkent és összetöredezett szerkezetű rétegnek az eltávolítása.

*A mechanikus fényesítést posztóval bevont forgó korongon, általában vízben szuszpendált alumínium-oxiddal végezzük.* Fényesítés közben a próbatestet forgatjuk, és a műveletet azzal fejezzük be, hogy a csiszolatot vízcsap alatt, majd desztillált vízben öblítjük, végül 96%-os alkoholba mártjuk. Az alkoholban leöblített csiszolatot meleg levegőáramban szárítjuk.

*A fényesített felületű csiszolat már alkalmas néhány vizsgálat, pl. az acélok zárványosságának, az öntöttvasak és a temperöntvények grafit-, illetve temperszéneloszlásának elvégzésére. A szövetszerkezet, illetve a kristallitok szerkezetének láthatóvá tételére általában azonban vegyi maratás is szükséges.*

A **maratás** hatása azon alapul, hogy a szövetszerkezetet felépítő fázisok kémiai ellenállása eltérő, így azokat a marószert eltérő mértékben támadja meg. A rájuk eső fényt is különböző mértékben verik vissza, ezért a mikroszkóp látómezejében világosabbnak, illetve sötétebbnek látszódnak. A homogén egyfázisú szövet krisztallitszerkezete azért válik láthatóvá, mert az egyes krisztallitok kémiai ellenállása orientációjuktól függ. Ennek következtében az egyes szemcsék különböző mértékben maródnak, ami a fényvisszaverésük változásában jelentkezik.

A szemcsehatárok lényegesen könnyebben maródnak, mint a krisztallit belseje. Ezt a szemcsehatáron levő nagymérvű rácsrendezetlenség és a szennyező atomok jelenléte magyarázza.

A használandó marószert szerkezeti anyagonként is igen sokféle lehet attól függően, hogy a krisztallithatárokat, a szövetszerkezetet felépítő egyes fázisokat stb. akarjuk-e vizsgálni. A különféle fémekhez alkalmas marószerek fajtáit és megválasztásuk szempontjait a metallográfiai szakkönyvekben találhatjuk meg. A leginkább használatos marószerek alkalmazási területét, összetételét és hatását a következő példával mutatjuk be.

Az ötvözetlen, illetve kevésbé ötvözött, kovácsolt, lágyított, normalizált vagy hegesztett acélt, továbbá az öntöttvasat  $2 \text{ cm}^3$  koncentrált salétromsav és  $100 \text{ cm}^3$  96%-os etilalkohol oldatával marjuk. A kezelés nyomán az acélban a kristályhatárok maródnak; a ferrit és a cementit fehérre, a perlit pedig sötétre színeződik. Az öntöttvasban - marás után - a perlit és a ferrit kristályhatárok sötét, a ferritszemcsék, a cementit és a foszfid fehér színűvé válnak.

**A rozsdamentes, sav- és hőálló acélok** marására  $8 \text{ cm}^3$  koncentrált salétromsav,  $12 \text{ cm}^3$  koncentrált sósav és  $1000 \text{ cm}^3$  96%-os etilalkohol oldata alkalmas. A marószert hatására a ferrit, illetve az ausztenit kristályhatárok, a karbidok és a martenzit láthatóvá válik. **Ha a marószertől kiemelt fényesített felület elhomályosodik, a maratást abbahagyjuk.** A csiszolatot folyóvízzel, majd alkohollal lemoszuk, és meleg levegővel megszáritjuk. Gyakran előfordul, hogy - Beilby-réteg elnemtávolítása miatt - megfelelő mikroszkópi képet csak a fényesítés és a maratás többszöri ismétlésével tudjuk előállítani. A csiszolatokat elektrolitikus fényesítéssel és maratással is előkészíthetjük. Az elektrolitikus előkészítéssel az anódként kapcsolt csiszolatról elektrolízissel választjuk le a kiálló felületi egyenetlenségeket. Az elektrolízis folyamán az egyes fázisok leválasztódási sebessége különböző, ami ugyanazt eredményezi, mint a kémiai maratás.

### A fémmikroszkóp szerkezete

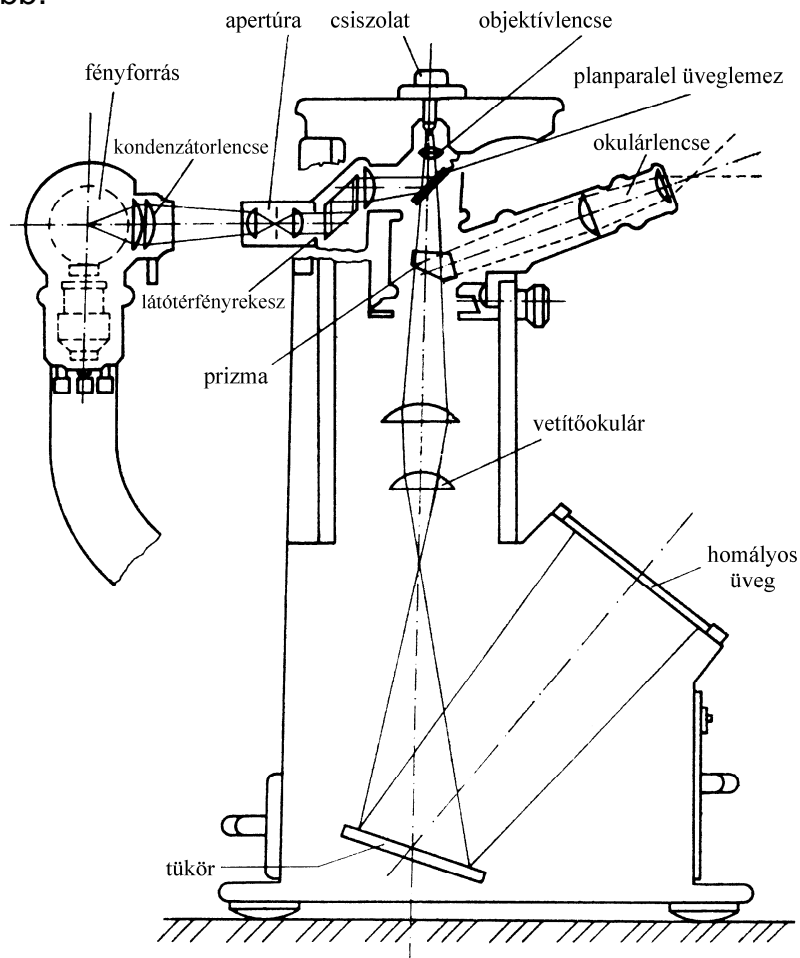
A metallográfiai vizsgálatokhoz a **Le Chatelier** rendszerű mikroszkópok használatosak. A csiszolatot nem áteső, hanem **réső fényben** vizsgáljuk. A nagyított képet tehát nem a tárgyon áthatolt, hanem a csiszolat felületéről **visszavert fénysugarak** alkotják.

A legtöbb korszerű fémmikroszkóp elvileg azonos felépítésű. Közülük a 2.46. ábra egy álló elrendezésűt szemléltet. Vizsgálatkor a pontszerű fényforrásból kiinduló fénysugár a kondenzorlencsén, az apertúra - és látótér - fényrekeszen át planparalel üveglemezre vetődik. Innen az objektív lencsén áthaladva

visszaverődik a csiszolatról, és vagy a prizmán át az okulárlencsébe, vagy ha a prizmát kihúzzuk a fénysugár útjából, a vetítőokuláron át a tükrön való visszaverődés után a homályos üvegre jut. A mikroszkóppal fényképfelvétel is készíthető.

A mikroszkóp nagyítása a tárgylencse és a szemlencse nagyításának szorzata.

A mikroszkóp hasznos nagyítása elsősorban a mikroszkóp felbontóképességétől függ. A mikroszkóp felbontóképességét a tárgylencse szabja meg, mert a szemlencse már csak a tárgylencse által adott képet nagyítja tovább.



2.46. ábra A Le Chatelier rendszerű fémmikroszkóp

A **felbontóképesség** két vonalnak az a legkisebb távolsága, amelynél az adott lencsével még a vonalak megkülönböztethetők. Legyen  $d$  a két vonal távolsága,  $\lambda$  a fény hullámhossza,  $a$  pedig a tárgylencse numerikus apertúra értéke:

$$d = \frac{\lambda}{a}$$

Tehát egy adott tárgylencsével egymáshoz annál közelebb lévő vonalakat lehet még észlelni, minél rövidebb a megvilágításhoz használt **fény**



**hullámhosszúsága**, illetve minél nagyobb a tárgylencse **numerikus apertúra** értéke.

Numerikus apertúra értéken a tárgylencsébe belépő szélső fénysugaraknak a lencse tengelyével bezárt  $\alpha$  szögének (fél kúpszög) szinusztát értjük (2.47. ábra). A numerikus apertúra érték:

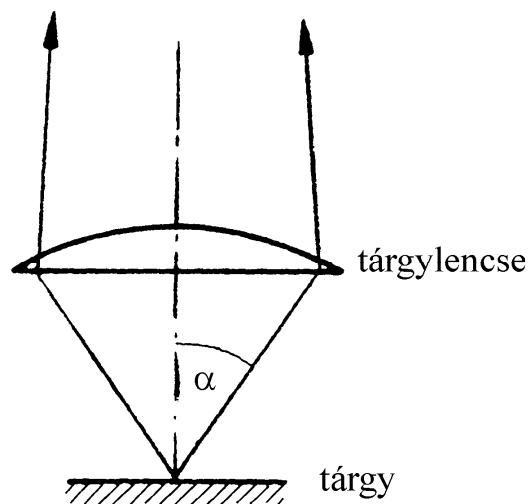
$$a = n \cdot \sin \alpha ,$$

- $n$  - a lencse és a tárgy közötti közeg törésmutatója (levegő esetén  $n_{\text{lev.}} = 1$ ),
- $\alpha$  - a fénykúp félcsúcs-szöge ( $\alpha$  szög természetesen nem lehet nagyobb  $90^\circ$ -nál).

Így az apertúra elméleti határértéke:

$$\sin 90^\circ = 1$$

A gyakorlatban 0,95-nél nagyobb apertúra értékű lencsét nem lehet előállítani, mivel a lencse a széle mentén többé-kevésbé szórja a fényt. A numerikus apertúra értéket tehát úgy lehet növelni, ha a tárgy és a lencse között nem levegő van (szárazlencse), hanem annál nagyobb törésmutatójú folyadék (nedves-, ún. immerziós lencse), pl. víz ( $n_{\text{víz}} = 1,33$ ), cédrusolaj ( $n_{\text{cédr.}} = 1,52$ ), monobromnaftol ( $n_{\text{mon.}} = 1,66$ ) található.



2.47. ábra A tárgylencse apertúrája

**Száraz objektívvel** általában 100-1000 szerez nagyítás érhető el. Ha a mikroszkóp felbontóképességének javítása végett **immerziós lencsét** használnak, 2000-szeres nagyítás az elvileg elérhető felső határ.

A fémtani vizsgálatokhoz sokszor ennél nagyobb nagyítás, illetve felbontóképesség szükséges. Ebben az esetben 10 000 – 200 000 szerez nagyítású **elektronmikroszkóppal** dolgoznak.

## **Elektronmikroszkópos vizsgálatok**

A fémmikroszkópok nagyítása, felbontóképessége, mélységélessége korlátozott, így nagy  $10^4$ - $10^5$  nagyságrendű nagyítások, és nagy mélységélességet igénylő töretfelület vizsgálatok csak elektronmikroszkóppal történő vizsgálatokkal valósíthatók meg. Ezek a berendezések a fénynél jóval kisebb hullámhosszúságú elektronsugarat használnak a vizsgálatra. Az elektronsugarak fókuszálására lencsék helyett elektromágneses tekercsek szolgálnak.

### **Transzmissziós (átvilágító) elektronmikroszkóp**

Az amorf testek esetében a lenyomat egyes pontjainak a vastagsága és sűrűsége határozza meg a tárgy elektron szóróképességét. A kristályos testek vizsgálatakor az elektronsugár diffrakciója következik be. A fémek és fémötvözetek vizsgálatánál mind a szóróképesség, mind az elektrondiffrakció jelenségét felhasználják.

#### **Lenyomatok vizsgálata**

A lenyomatok vizsgálatánál nem közvetlenül a próbatestet, hanem annak a felületéről készült lenyomatot vizsgálják, azaz átvilágítják elektronsugárral, és a szóróképesség változásából vonhatók le következtetések. A lenyomatot úgy készítik, hogy a metallográfiai csiszolatra vákumban szentet gőzölnek, ezt a vékony szénhártyát elektrolízissel leoldják a csiszolat felületéről, lemossák, majd rézhálóra felvíve vizsgálják. Az úgynevezett **extrakciós lenyomatba** bekerülnek a zárványok és a kiválások is. A kapott képen a kis szóróképességű részek világosak, a nagy szóróképességű részek, pedig sötétek lesznek. Lenyomat készíthető még alumínium tárgyak esetében a felületi oxidréteg megvastagításával (pl. anódos oxidálás). Az elektronsugár, mivel oxidáláskor közel azonos vastagságú réteg keletkezett, a haladási irányával szöget bezáró részeken hosszabb utat kénytelen megtenni, így a gyengülése és elektronszóródása is arányos lesz a megtett úttal, azaz a ferde részek sötétebbek lesznek.

#### **Fémfóliák átvilágítása**

Átvilágítós módszerrel a kiválások, diszlokációk, extrasíkok is megfigyelhetők. Átvilágítható fóliát úgy készítenek, hogy a próbatestet először mechanikusan - forgácsolással, polírozással - tizedmilliméter vastagságúra vékonyítják, majd két oldalról elektrolitikusan polírozzák mindaddig, amíg sok kis lyuk nem keletkezik rajta. Sikeres polírozás esetén a lyukak között található átvilágításra alkalmas fólia.

**Emissziós elektronmikroszkópban** a próbatest elektronsugárzásának megjelenítése maga a kép. A próbatestet ahhoz, hogy elektronsugarat bocsásson ki, ionokkal, elektronokkal, ultraviola fénnel vagy termikusan gerjesztik. Az emissziós elektronmikroszkópban a próbatest felületi domborzata, az egyes fázisok különböző elektronkibocsátó képessége és természetesen a gerjesztés nagysága határozzák meg a kontrasztot. Az emissziós elektronmikroszkóp főbb alkalmazási területe a magas hőmérsékleten, pl. ausztenites állapotban lejátszódó folyamatok, a képlékeny

alakváltozás mikrofolyamatainak, a martenzites átalakulás valamint a nagyhőmérsékletű diffúziós folyamatok kutatása, vizsgálata.

### **Letapogató (scanning) illetve pásztázó elektronmikroszkóp**

Az izzó katódból kilépő, a feszültség hatására felgyorsult elektronokat a kondenzor lencsék kb.  $100 \times 10^{-7}$  mm átmérőjű sugárrá koncentrálnak. Az eltérítők által mozgatott elektronsugár a felületet mintegy végigpásztázza, és a felületből másodlagos elektronsugárzást vált ki. Ennek megfelelően a képképzés egyes időpillanataiban mindig csak egy-egy tárgypontról kapnak információt. A kép ezekből az időben egymás után következő egyedi információkból áll össze. A mikroszkóp felbontóképességét elsősorban a letapogatóhoz használt elektronsugár átmérője, valamint a próbatest anyagának kölcsönhatása szabja meg. A próbatest és a kapott kép között nincs lencse, így a fémmikroszkópnál kb. ezerszer nagyobb a mélységélessége. A másik előnye, hogy a nagyítása folyamatosan változtatható, így ugyanaz a felület a legkülönbözőbb nagyítás mellett is megfigyelhető. Felbontóképessége  $10 \times 10^{-7}$ - $100 \times 10^{-7}$  mm. A scanning mikroszkóp **legfontosabb alkalmazási területe a töret felületek és a kopott felületek vizsgálata**. Az esetek döntő többségében a töretfelületek közvetlenül vizsgálhatók.

A pásztázó elektronsugárnyaláb hatására a minta röntgensugarakat is kibocsát. A röntgensugár elemzése alapján meghatározható a minta igen kis kb.  $1 \mu^3$  térfogatának kémiai összetétele is. Ezt a röntgensugár elemző készüléket **mikroszondának** hívjuk.

### **Mikroszkópi és makroszkópi vizsgálatok**

A mikroszkópi vizsgálatok közé a **mennyiségi** és **minőségi** vizsgálatok tartoznak. A következőkben néhány, a gyakorlatban leginkább használatos vizsgálatot ismertetünk.

Az acél szemcsenagyságát **általában 100-szoros nagyítású fényképen a következő módszerekkel határozzuk meg (MSZ 2657)**.

**Az összehasonlító módszer** abból áll, hogy a csiszolat képét ismert szemcsenagyságú szövetképpel hasonlítjuk össze. A szemcsenagyság jellemzésére szemcsenagyság fokozat számok szolgálnak. Kiindulási alap  $1 \text{ mm}^2$  csiszolat területén 16 szemcse. Fokozatszám 1. A következő fokozatokban a szemcseszám mindig kétszerese az előzőnek.

**Az átlagos szemcseterületet** úgy határozzuk meg, hogy a fényképre rajzolt  $\varnothing 79,8$  mm méretű körben levő és a kör által metszett szemcséket megszámláljuk. A  $79,8$  mm átmérőjű kör 100x-os nagyítás esetén, a csiszolaton  $0,5 \text{ mm}^2$ -nek felel meg.

A  $0,5 \text{ mm}^2$ -re jutó szemcsék száma:

$$n_{100} = n_1 + 0,5n_2,$$

- $n_{100}$  - a 0,5 mm<sup>2</sup>-re jutó szemcsék száma,
- $n_1$  - a körben levő szemcsék száma,
- $n_2$  - a kör által metszett szemcsék száma.

Az 1 mm<sup>2</sup>-re jutó szemcsék száma:

$$m = 2n_{100}.$$

Átlagos szemcseterület:

$$a = \frac{1}{m} \quad [mm^2].$$

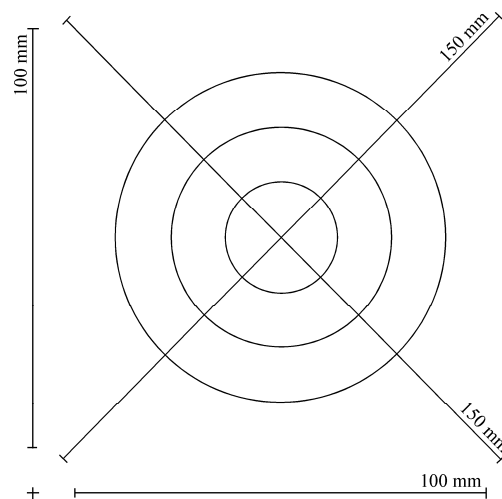
Az átlagos szemcseátmérőt a következő képlettel kell meghatározni:

$$d_m = \frac{1}{\sqrt{m}} \quad [mm].$$

A szemcsenagyság meghatározása a szemcse metszések számlálása alapján

A mérővonal lehet egyenes vagy kör. A 2.48. ábrán látható elrendezés mutatja az alkalmazható **mérővonal típusokat**. A mérővonalakkal egy területet csak egyszer lehet mérni.

A számolást a csiszolat legalább öt különböző helyén kell elvégezni. A mérővonal a 3.58. ábrán látható módon, **összesen 500 mm** hosszú egyenes szakaszból áll. Az egyenesek a szemcseméreték különböző irányú mérésére szolgálnak. Ha nagyobb mértékű a szemcseanisotropia akkor célszerű mind a négy egyenes mentén mérni.



2.48. ábra Szemcsenagyság vizsgálat

A nagyítást úgy kell megválasztani, hogy a négy mérővonalas módszernél legalább 50, a két mérővonalasnál legalább 25 szemcsét metszünk. A szemcséket a mérővonalak mentén meg kell számolni, ha a mérővonal egy szemcse belsejében végződik, akkor azt fél szemcsének kell számítani.

Szemcsék számlálása körök mentén: a mérővonal az ábrán látható három azonos középpontú kör. A három kör kerületének hossza 500 mm legyen. A nagyítást úgy kell megválasztani, hogy három kör használatkor legalább 50 szemcse, egy kör (250 mm-es kerületű) használatkor legalább 25 szemcse adódjék.

Az eredmények értékelése: a különböző módszerrel átmetszett szemcsék számából az átlagos szemcseszámot ( $\bar{N}$ ) határozza meg. Ha a mérővonal hossza L, akkor a hosszegységre vonatkoztatott átlagos szemcseszám ( $\bar{N}_L$ ):

$$\bar{N}_L = \frac{\bar{N}}{L}.$$

A szemcse metszetének átlagos hossza ( $\bar{L}$ ):

$$\bar{L} = \frac{1}{\bar{N}_L} \quad [mm].$$

**Acélban levő salakzárványok meghatározása (MSZ 2668).** A zárványok a gyártáskor keletkeznek. Mennyiségüket bizonyos határérték alatt kell tartani, mert a növekvő zárványosság károsan befolyásolja az acél minőségét.

A **maratlan** és hengerelt acél **hosszirányban kimunkált** csiszolatáról 100-szoros nagyítású fényképet készítünk, és összehasonlítjuk a szabványban közölt képsorozattal. Az összehasonlító képsorozatok négy zárványfajtát: oxidokat, szilikátokat, szulfidokat, nitrideket, és ezeken belül több alaptípust tartalmaznak. Minden típusból a képsorozatban öt fokozatot találunk. **Az eredményt a zárványtípus jelének és fokozatának feltüntetésével adjuk meg.** Ha egyidejűleg több, különféle típusú zárvány fordul elő, mindegyiket külön-külön értékeljük.

További mikroszkópi vizsgálat tárgya a szövetvizsgálat, a karbidok eloszlásának, az öntöttvasak grafiteloszlásának és a felületi diffúziós rétegek, pl. cementált felületek vizsgálata.

A **makroszkópi vizsgálatokat** az jellemzi, hogy a próbatest szövetét **1-10-szeres** nagyítással vizsgáljuk. Lehetnek felület- és metszetvizsgáló eljárások, mint például a mélymaratás, amellyel az alakítási üregek, a nagyobb méretű zárványok és a foszforeloszlás vizsgálható. A **Baumann-féle kényomatomvizsgálattal** a kéneloszlás mutatható ki. Az **Oberhoffer-féle maratással** az öntött és alakított acél dendrites, illetve poliéderez szövege vizsgálható. A **kéktöret-próbával** a durva lemezek és szalagok rétegessége értékelhető.

### **Az anyagszerkezet vizsgálata röntgensugárral**

A röntgensugarak felfedezése után 17 évvel, 1912 Laue rájött arra, hogy segítségükkel a szilárd testek belsejében elhelyezkedő atomok elrendezése felismerhető. A röntgensugarak hullámhossza ugyanis a fématomok méreteivel és a köztük levő távolsággal azonos nagyságrendű. A Laue-féle röntgenképek felhasználásával Bragg és Lawrence képleteket dolgozott ki, amelyek segítségével kiszámíthatóvá vált a kristályok atomszerkezete. Bragg szerint a háromdimenziós rácsszerkezeten a röntgensugarak diffrakciója reflexiós jelenségként fogható fel (2.49. ábra). A 2.49/a. ábra szerinti

szerkezeten a két párhuzamos rácssík egymástól  $d$  távolságra helyezkedik el. Egy kis keresztmetszetű párhuzamos röntgensugárnyaláb mindkét síkról visszaverődik. Eközben azonban a 2. Sugár PO+OQ távolsággal hosszabb utat tesz meg. A két hullám akkor erősíti egymást, ha útkülönbségük a hullámhosszúság egész számú többszöröse. A 2.49/b. ábrán  $I$  a hullám intenzitása,  $t$  az idő és  $\lambda$  a hullámhossz:

$$PO + OQ = n\lambda.$$

Az OPN és OQN derékszögű háromszög, a PO = OQ, tehát:

$$PO = d \sin \Theta [10^{-10} m]$$

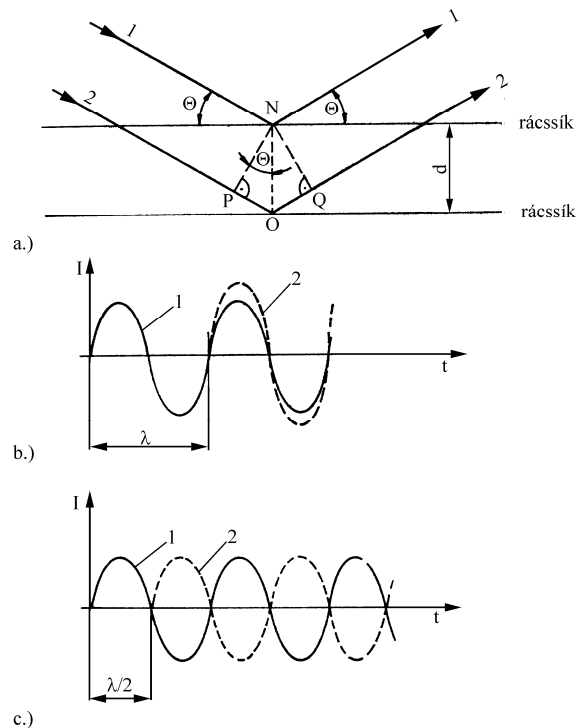
A Bragg-féle egyenlet:

$$n\lambda = 2d \sin \Theta.$$

Ha a beeső sugár iránya és hullámhossza ismert, a  $d$  rácssíktávolság kiszámítható. A fél hullámhossznak megfelelő útkülönbség esetét a 2.49/c. ábra szemlélteti. A 2.50. ábra a röntgen-szerkezetvizsgálatok elrendezési vázlatát szemlélteti. **A Laue-eljárással a vizsgálandó kristályt röntgensugárral világítjuk meg, s a kristály mögött keletkező reflexiós pontokat filmen rögzítjük.** Az eljárás nem teszi lehetővé, hogy a Bragg-egyenlet segítségével meghatározhassuk a reflektáló sík rácssíktávolságát. Alkalmas viszont a kristálytengelyek orientációjának meghatározására. Ennek a félvezetők gyártásában van nagy jelentősége.

**A forgókristályos eljárással** a Bragg-egyenlet kielégítéséről a kristály forgatása révén gondoskodunk. A forgatás következtében a kristálysíkok mindenféle helyzetet felvesznek, és így adódik egy olyan pillanat, amikor létrejön a reflexió. A reflexiókat a kristály mögött elhelyezett filmen rögzítjük. Ez a módszer arra alkalmas, hogy a kristály egyes rácssíktávolságait meghatározhassuk.

**A Debye-Scherrer-eljárás** vizsgálandó anyaga finom fémpor. A részecskéket valamilyen amorf kötőanyaggal összeragasztva egy körhenger alakú kamera középpontjába helyezzük. A beeső monokromatikus röntgensugár csak azokon a rácssíkokon reflektálódik, amelyeknek a primer sugárral alkotott hajlásszöge kielégíti a Bragg-egyenletet. A filmet kiterítve a számításokhoz szükséges reflexiószöget határozhatjuk meg.



2.49. ábra A röntgensugaras szerkezetvizsgálatok elve  
 a) röntgensugarak reflexiója, b) a hullámok interferenciája, ha az útkülönbség  $\lambda$ , c) a hullámok interferenciája, ha az útkülönbség  $\lambda/2$

Laue-eljárás	kristálytengelyek meghatározása egy kristályon	
Forgókristályos eljárás	rácsméret meghatározása egy kristályon	
Debye-Scherrer eljárás	rácsterület és rácsméret meghatározása polikristályon	

2.50. ábra A röntgen szerkezetvizsgálatok elvi vázlatja

## 2.2 Roncsolásmentes anyagvizsgáló módszerek

Valamennyi, eddig megismert anyagvizsgáló eljárás az alkatrész vagy próbatest kisebb-nagyobb mérvű roncsolódásával járt. A **roncsolásmentes** vagy más néven **hibakereső anyagvizsgáló módszerekkel** az alkatrész vagy szerkezet roncsolása nélkül is lehetővé válik a felületen, illetve az anyag belsejében levő hibák kimutatása. Az alkatrészekben, szerkezeti egységekben előforduló hibák kimutatása, a korróziós károsodások, a belső feszültségek, a rugalmas és képlékeny deformáció mértékének meghatározása, a kifáradás vagy kúszás okozta korai meghibásodások előrejelzése különösen a nagy biztonságigényű iparágakban (petrolkémia, nukleáris energiatermelés, légközlekedés stb.) ma már általános követelmény.

A roncsolásmentes vizsgálatok mindegyike valamely fizikai jelenségen alapul, a mágneses tér változásán, áthatoló sugárzáson, hangvisszaverődésen, diffúzió stb. A vizsgálatokat a kimutatható hibák szerint csoportosítják. **A felület vagy a felület közelében levő hibák kimutatására** a mágneses vagy festékdifúziós repedésvizsgálat alkalmas. **A belső folytonossági hiányok** radiológiai (röntgen durvaszerkezeti, radioaktív izotópos), ultrahangos, magnetoinduktív eljárásokkal mutathatók ki. Az eljárások kiválasztásakor figyelembe kell vennünk, hogy milyen módszerrel észlelhető legbiztosabban a hiba. További szempont a dokumentálhatóság, a gazdaságosság és a vizsgálat időtartama.

A hibakereső anyagvizsgáló feladata kettős:

- a hiba kimutatása,
- a hiba értékelése abból a szempontból, hogy hatása az alkatrész vagy szerkezet működése szempontjából még megengedhető-e.

Ez utóbbi megfogalmazásból az is kitűnik, hogy **nem minden kimutatott belső folytonossági hiba szorul okvetlen kijavításra**, vagy ad okot arra, hogy a vizsgált darabot kicseréljük. A hibakereső anyagvizsgáló ma már legtöbbször a gyártási folyamatba beépített és a gyártástechnológiába betervezett folyamatos ellenőrzési módszerek.

### 2.2.1. A vizuális vizsgálat

A szemrevételezés (VT) az egyik legalapvetőbb és az egyik legszélesebb körben alkalmazott roncsolásmentes anyagvizsgáló módszer. **Alkalmazási körét és célját tekintve beszélhetünk:**

- önálló vizuális,
- roncsolásmentes vizsgálatokat kiegészítő,
- állapotellenőrző vagy káresetelemző vizsgálatokat kiegészítő vizsgálati módszerről.

A szemrevételezés során alkalmazott munkaeszközök többek között az acél-mérőszalag, tolómérő, mikrométer, szögmérő, tükör és a kézi nagyító (lupe)



használatának nemcsak abban rejlik a jelentősége, hogy a vizsgált felület részleteinek jobb felismerését teszi lehetővé, hanem az is, hogy a vizsgáló személy figyelmét a felület egy kis részletére koncentrálja. A közvetlenül meg nem tekinthető helyek vizuális megfigyelésére alkalmazzák a különféle **endoszkópokat**.

A hajlékony üvegszál optikát tartalmazó endoszkópok a **fiberoszkópok** az utóbbi években eléggé elterjedtek.

Az 1970-ben megjelent CCD képalkotó az endoszkópok alkalmazását szinte forradalmasította. Lehetővé vált a kis átmérőjű, nagy (mintegy 800 ezer képpontot jelentő) felbontóképességű, fényszegény (3-7 lux) környezetben és helyeken való alkalmazásuk. A **videoendoszkópok** már színes képet állítanak elő és felbontóképességük is kiváló.

A vizsgálat menetét rögzíteni lehet, a kívánt képek kimerevíthetők, polaroid képen vagy mágneslemezen tárolhatók.

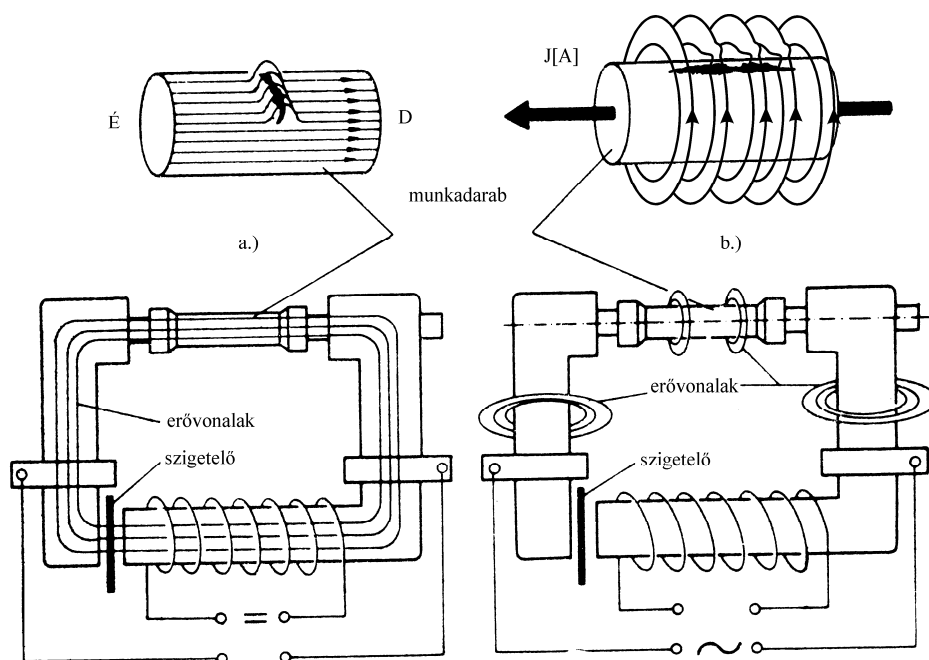
Az endoszkópok alkalmazásának főleg a nehezen hozzáférhető, kis méretű hibákra is érzékeny-berendezések (pl. repülőgép-gázturbina, atomreaktor stb.) vizsgálatánál van nagy jelentősége.

### **2.2.2. Mágneses repedésvizsgálat**

A ferromágneses fémek felületén vagy felületének közelében levő, szabad szemmel nem látható vagy csak alig észlelhető folytonossági hibák - pl. repedések, zárványok, lyukacsosság stb. - kimutatására alkalmas a mágneses repedésvizsgálat. A vizsgálatot általában megmunkált felületű alkatrészeken hajtják végre.

A mágneses repedésvizsgálat elve az a fizikából ismert jelenségen alapul, miszerint, ha mágneses térbe ferromágneses anyagot helyezünk, benne mágneses erőter jön létre. Ha az erővonalak útjában folytonossági hiány van, azt kikerülik. Az alkatrész felületén vagy annak közelében levő folytonossági hiány hatására az erővonalak a levegőbe lépnek ki, vagyis szóródnak. A szórt mágneses mező finom, petróleumban iszapolt vasporszerű részecskék segítségével láthatóvá tehető. **Az összesűrűsödött vasporszerű részecskék jelzik a hiba pontos helyét és alakját** (2.51. ábra).

A mágneses repedésvizsgáló gépek két üzemmódban létesítenek mágneses mezőt. **Pólusmágnesezés**kor (ferroszkóp eljárás) a gép pólusai egyenárammal elektromágnesként működnek (2.65/a. ábra). Segítségükkel mindazok a hibák kimutathatók, **amelyek az alkatrész hosszirányára merőlegesen helyezkednek el**. Az egyenárammal való mágnesezéshez a vizsgálandó alkatrész keresztmetszetétől függően állapítják meg a mágneses fluxus erősségét.



2.51. ábra A mágneses repedésvizsgálat elve  
 a) pólusmágnesezés a keresztirányú repedés kimutatására, b)  
 árammágnesezés a hosszirányú repedés megkeresésére

**Az árammágnesezéskor** (ferroflux eljárás) a mágneses mezőt maga az alkatrész létesíti olyképpen, hogy erős váltakozó áramot vezetünk át rajta. Így a mágneses tér erővonalai koncentrikus körök alakjában helyezkednek el az alkatrész körül. Ez az eljárás a hosszirányú hibák kimutatására alkalmas (2.51/b. ábra).

A gépek üzemmódjának megváltoztatása általában egy kapcsolóval megoldható, következésképpen a pólusok közé helyezett alkatrész hossz- és keresztirányú repedésvizsgálata egymás után elvégezhető. Vizsgálat után az alkatrészt demagnetizálnunk kell. Ebből a célból a munkadarabot váltakozó irányú, folytonosan csökkenő mágneses térbe helyezzük. A mágneses repedésvizsgálatot új, vagy már üzemelő alkatrészek hibáinak meghatározására használják. **Jól bevált az edzési repedések, kovácsolt, illetve öntött darabok felületi vagy felülethez közeli hibáinak kimutatására. Segítségével a már üzemelt és felújításra váró alkatrészek felületének közelében levő kifáradási repedései is kimutathatók.** A mágneses repedésvizsgálattal az MSZ 17733 szabvány foglalkozik.

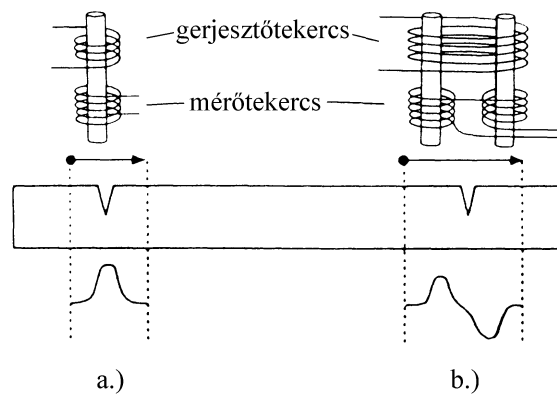
### 2.2.3. Örvényáramos repedésvizsgálat

A repedésvizsgálatok egy igen fontos területe az örvényáramos technika. **Alapelve a vizsgálandó darabban gerjesztett mágneses erőter**

**változásának mérése, amelyet az inhomogenitások, pl. repedések hoznak létre (2.52. ábra).**

Az eljárás nemcsak a mágnesezhető anyagok, hanem minden ötvözet vizsgálatához alkalmazható. A módszer olyan kiértékelési lehetőségekkel rendelkezik, amellyel a regisztrált jelek könnyen és általában automatikusan feldolgozhatók, számszerűsíthetők.

Lényeges eltérés a többi hibakereső vizsgálatától az, hogy a vizsgálati technológia kidolgozása elválik a közvetlen alkalmazástól, ugyanis a *széleskörűen alkalmazható alpműszer, csak egy-egy egyedileg kidolgozott technológiával, speciálisan tervezett szondával, válik képessé az adott konkrét feladat megoldására.*



2.52. ábra Repedés kimutatása örvényárammal  
a) abszolút és b) differenciál tapintó szondával

A módszer előnye, hogy a vizsgálati frekvencia változásával változtatható a behatolási mélység és ennek segítségével lehetővé válik a repedésmélység mérése. A mérés pontosságának, illetve az örvényáram behatolási mélységének anyagminőségtől függő korlátai vannak.

A módszer hátránya, hogy sok paraméter (pl. anyagszerkezet stb.) lehet hatással a regisztrált jelre, ez bonyolulttá teheti a vizsgálati eljárás megtervezését.

**A módszer bonyolultsága ellenére is nagyon fontos eljárás, ugyanis a repedés kimutatásának, beleértve a mélységmérést is, a legpontosabb módja, (0,1 mm mélységű; 0,1 mm hosszúságú repedés is kimutatható. A vizsgálat további előnye, hogy a különböző helyen jelentkező hibák, különböző frekvenciákon érzékelhetők és többcsatornás készüléken egy időben, külön-külön erősítve is feldolgozhatók és szétválaszthatók.**

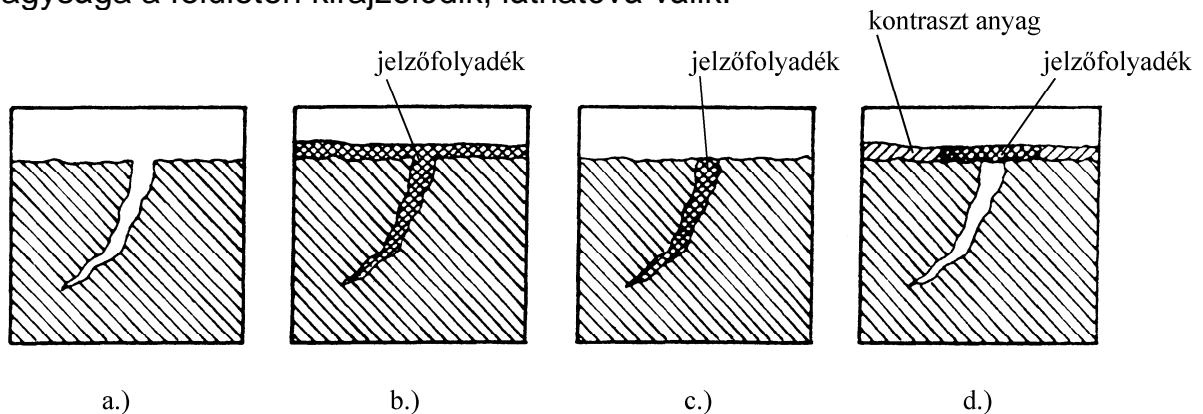
**Fontos jellemzője a vizsgálatnak, hogy nem igényel közvetlen csatolást a felülethez, a szondát a felület felett végigvezetve is megfelelő eredményt ad.**

Az alkalmazott frekvencia 10 KHz és néhány MHz közé esik, azonban a korszerű örvényáramú berendezések mérőfrekvenciája 100 Hz-ig csökkenthető, ezáltal a mélyen fekvő hibák is vizsgálhatók.

#### 2.2.4. Jelzőfolyadékos vizsgálat

**A vizsgálat - az anyag fajtájától függetlenül - felületi repedések, felszínre nyíló repedések, üregek kimutatására alkalmas (2.53. ábra).**

A vizsgálandó tárgy felületét a szennyeződésektől kémiai oldószerekkel megtisztítják (2.53/a. ábra). A tiszta felületre szórással, vagy ecsettel **kis viszkozitású, élénk színű, nem száradó** jelzőfolyadékot juttatunk, amely néhány perc alatt beszívárog a repedésekbe (2.53/b. ábra). Ezután a felületről letöröljük, a repedésben azonban benne marad (2.53/c. ábra). Végül nedvszívó kontrasztanyagot juttatunk a felületre, amely gyorsan megszárad és kiszívja a jelzőfolyadékot a repedésből (2.53/d. ábra). Így a repedés alakja és nagysága a felületen kirajzolódik, láthatóvá válik.



2.53. ábra A jelzőfolyadékos repedésvizsgálat elve

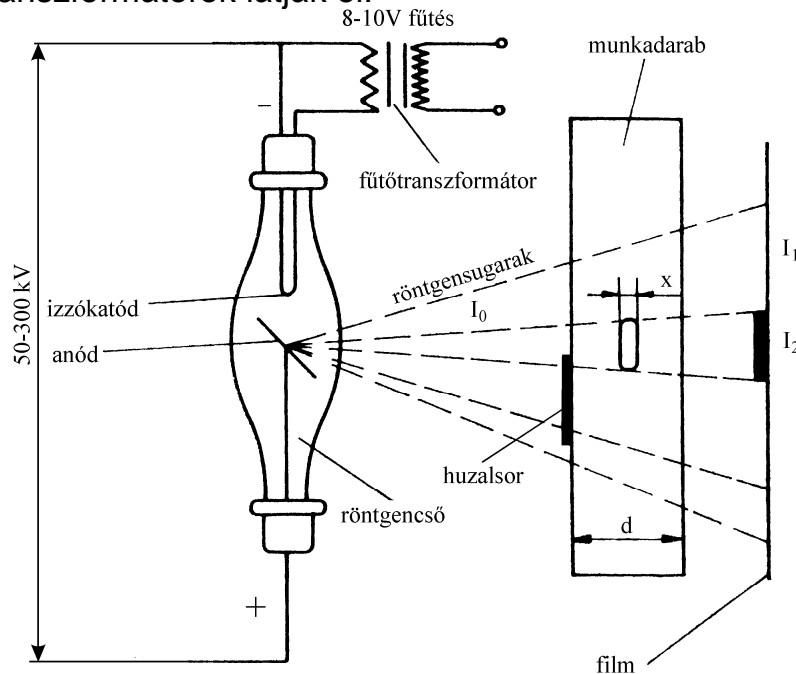
A jobb észlelhetőség érdekében szokás jelzőfolyadékként ún. floureszcensz folyadékot használni. Az alkatrész bemártása, majd a folyadéknak a felületről való eltávolítása, letörlése után, a repedésben maradt jelzőfolyadék, ultraibolya sugarakkal történő megvilágítása után kirajzolódik a repedés helye.

#### 2.2.5. Radiológiai eljárások

A legismertebb és legrégebb hibakereső eljárás az áthatoló sugárással történő vizsgálat. Használják erre a célra röntgensugarat, valamint radioaktív izotóp által kibocsátott  $\gamma$ -sugarat.

A röntgensugarak rendkívül rövid ( $0,1 \cdot 10^{-10} - 10 \cdot 10^{-10}$  m) hullámhosszúságú elektromágneses sugarak. A szilárd testekben egyenes vonalban haladnak, részben elnyelődnek, gyengülnek az átvilágított anyag vastagságától, az anyag sűrűségétől függő mértékben. A röntgensugaraknak a fénysugarakhoz hasonlóan vegyi hatásuk is van, pl. a fényképezési emulziót megfeketítik. Egyes anyagokat - pl. a cink-szulfidot elektron kibocsátására készítik, és így egy képernyőn láthatóvá tehetők. A belső anyaghiba kimutatása céljára szolgáló röntgensugarakat **izzókatódos röntgensugárcsővekben** állítják elő. Működési elvüket a 2.54. ábra szemlélteti. A röntgensüveget fűtőtranszformátor látja el a katód izzításához szükséges árammal. A kb.  $10^{-5}$  Pa-os légritkított

röntgensőben a hálózatról üzemeltetett transzformátorokkal nagyfeszültségű teret hoznak létre az anód és a katód között (általában 50-300 kV). Ezt a teret mindig azonos elektromos polaritással létesítik. Az azonos polaritást az egyenirányító csövek és kondenzátorok biztosítják. Az egyenirányítók fűtését ugyancsak transzformátorok látják el.



2.54. ábra A röntgenvizsgálat vázlata

A kis feszültséggel izzított katódból - a Richardson-féle hatás következtében - elektronok lépnek ki, amelyek az elektromos tér hatására felgyorsulnak. Nagy sebességgel ütköznek az anódba, és a gyors lefékezés következtében kinetikai energiájuk nagy része hővé alakul, de **energiájuk mintegy 1%-ából röntgensugárzás** jön létre. Az anódon keletkező jelentős hőmennyiség miatt a csövet hűtenünk kell. Az anódnak azt a részét, amelyre az elektronok becsapódnak, **fókusz**nak nevezik. A terjedő sugárnyaláb kúpos, nyílásszöge rendszerint  $40^\circ$ . A röntgensugarak a szilárd testeken is egyenes vonalban áthatolnak. Káros hatásúak az élőlények sejtstruktúráira, ezért a röntgenvizsgálattal foglalkozókat a sugárzás ellen védeni kell. **A röntgensugaraknak a fényérzékeny anyagokra a fénysugarakhoz hasonlóan vegyi hatásuk van.**

Az  $I_0$  intenzitású röntgensugár áthaladva a  $d$  vastagságú tárgyon  $I_1$  intenzitására gyengül:

$$I_1 = I_0 e^{-\mu d} \quad [\text{R}].$$

Ha az  $x$  méretű, kisebb sűrűségű hibán is áthalad, kevésbé gyengül:

$$I_2 = I_0 e^{-\mu(d-x)} \quad [\text{R}],$$

$$\text{ezért } I_2 > I_1,$$

$I_0$  - a röntgensőből kilépő sugárzás erőssége [R],

$\mu$  - a gyengülési együttható [ $1/mm$ ].

A gyengülési együttható egyrészt a sugárzás hullámhosszától, másrészt az anyag sűrűségétől és rendszámától függ.

A vékonyabb anyagrészen áthaladó röntgensugarak kevésbé gyengülnek, így az anyaghiba, folytonossági hiány a röntgenfelvételen (negatívon), képernyőn erősebben kirajzolódik, jobban elsötétedik. **A kontraszt végső soron a gyengülési együtthatótól és a hiba méretétől függ. Jó kontrasztot akkor érünk el, ha lágy - hosszabb hullámú - sugárzást használunk, azaz kis csőfeszültséggel röntgenezünk.** A lágy sugárzás azonban hosszabb expozíciós időt igényel és kisebb  $d$  vastagság átvilágítására alkalmas. Ezért röntgenvizsgálatok alkalmával e két, egymásnak ellentmondó követelmény között kell az optimális lehetőséget megkeresnünk.

**A gyakorlatban a röntgenfényképezés a legelterjedtebb hibakereső eljárás.** Amint az ábra is mutatja, a vizsgálandó tárgynak a röntgensővel ellentétes oldalán filmet helyeznek el. Rajta a hibán áthaladó, nagyobb intenzitású sugárzás miatt - az expozíciós idő alatt - erősebb feketedés jön létre, mint az ép anyagon áthaladó, kisebb intenzitású sugárzás nyomán. **Ennek megfelelően a hiba a röntgenfilmen sötétebb foltként mutatkozik.** A röntgenfelvételeken a még kimutatható legkisebb hiba méretének megállapítására gumitokba ágyazott **huzalsorok** használatosak. **A felvételen még látható legvékonyabb huzal átmérője, a még kimutatható hiba nagyságának tekinthető.** Az értékelés megkönnyítésére - a különböző felismerhetőségi igények alapján - osztályokba sorolják a felvétel minőségét és a meghatározott átsugárzott szelvényvastagság függvényében a kívánt képminőséget is előírják.

Rendszerint a következő vizsgálatokat hajtják végre röntgensugarakkal.

**A hegesztett varratok vizsgálata** (a hibafelmérhetőség és az átvilágítható anyagvastagság szempontjából) az egyik legszélesebb körű alkalmazási területe a röntgenvizsgálatnak. A 100-120 mm-nél vastagabb hegesztési varrat igen ritka. Ezért a röntgenvizsgálat majdnem minden hegesztési varratra alkalmazható. **A segítségével kimutatható hibák: gáz-, salak- és fémes zárványok, kötés- és gyökhibák, esetleg repedés és egyéb felületi hibák.**

A repedések csak akkor mutathatók ki, ha a repedés iránya egyezik, vagy kis szöveget zár be a sugarak irányával és ennek következtében a sugárnak a repedésben megtett útja elég nagy ahhoz, hogy a felismeréshez szükséges kontraszt keletkezzék. A hegesztett kötések radiológiai vizsgálatával az MSZ 4310/4, 5, 6 szabvány foglalkozik.

**Az öntvények vizsgálatára** a röntgensugarak nem mindig használhatók olyan eredményesen, mint a hegesztéseknél. Oka főleg az, hogy az öntvények egyenlőtlen - egyes esetekben a túl nagy - falvastagsága miatt a vizsgálat nehezkesebb.

**Az ólombronz csapágyak vizsgálatára** igen alkalmas a röntgenvizsgálat. Határozottan kimutatja a csapágyhibákat, mint pl. a zárványokat, a nagyobb ólomfoltokat, a zsugorodási repedéseket.

### **Radioaktív izotópos vizsgálatok**

**A gammasugarakat** egyre szélesebb körben használják radiológiai vizsgálatok céljára a röntgensugarakon kívül. Sugárforrásaik kezdetben a természetes radioaktív elemek (pl. rádium) voltak. Napjainkban kizárólagosan **mesterséges izotóppal** (pl. kobalt 60, irídium 192 stb.) **vizsgálunk**. A gammasugarak tulajdonképpen kis hullámhosszúságú elektromágneses hullámok, és a röntgensugarakkal azonos tulajdonságúak. Segítségükkel a hibakereső anyagvizsgálat a röntgenezéshez hasonló módon hajtható végre.

Az izotópos vizsgálat előnyei a következők. Nincs külső energiaforráshoz, bonyolult berendezéshez kötve, ezért a vizsgálat bárhol elvégezhető. A radioaktív preparátum kis mérete lehetővé teszi olyan szűk és nehezen hozzáférhető helyek vizsgálatát is, ahol a röntgenső nem fér el. Olyan vastag tárgyak vizsgálatára is alkalmas, amelyek csak különösen nagy feszültségű röntgensövekkel előállítható röntgensugarakkal lennének átvilágíthatók. Gammasugarakkal, pl. a 100-175 mm vastag acéltárgyak is minden nehézség nélkül vizsgálhatók.

Használatának hátránya, hogy a sugárzás nem kapcsolható ki, az állandó sugárzás miatt a preparátumot izotóptartókban gondosan el kell zárni. A sugárzás intenzitása, a röntgensugarakéhoz viszonyítva, gyenge, tehát hosszabb az exponálási idő. A felvételek kevésbé kontrasztosak, így a kisméretű hibák felismerése nehezebb.

**A röntgen és gammasugárzás káros az emberi szervezetre. Ezért rendkívül fontos a sugárvédelem előírásainak ismerete, és szigorú betartása.**

### **2.2.6. Ultrahangvizsgálat**

**Az ultrahang az emberi fül számára nem hallható, 16 kHz – 100 MHz rezgésszámú, nagyfrekvenciájú hanghullám.** Terjedési sebessége nagyobb, mint a hallható hangoké. A hangtan törvényei rá is érvényesek.

Anyagvizsgálatra a **0,25-15 MHz** frekvenciájú ultrahanghullámokat használjuk. Az ultrahang hullámok anyagvizsgálatra azért alkalmasak, mert **szilárd testekben egyenes vonalban terjednek** és ott, ahol **határfelülettel találkoznak, visszaverődnek**.

A legtöbb anyagvizsgálathoz használt ultrahangkészülék **a piezoelektromos jelenségen** alapul (2.55. ábra). Lényege az, hogy a kondenzátorlemezek közé helyezett, megfelelően csiszolt **kvarckristály** a kondenzátor feltöltése után - a töltés jellegének megfelelően - összenyomódik vagy kitágul (2.55/a. ábra). Ez a jelenség fordítva is fennáll. Ha ugyanis a kristályt összenyomjuk vagy széthúzzuk, változik a kondenzátor töltése is. Ebből következik, **ha a**

**kondenzátorra váltakozó áramot kapcsolunk, a kristály mechanikai rezgésbe jön, összehúzódik és kitágul.** Az ultrahanghullámok gerjesztésére és felfogására szolgáló kvarckristályt a vizsgálófejbe építik. Alakjuk, illetve a kibocsátott hanghullámok iránya szerint vannak merőleges sugárzó és szögsugárzó fejek.

### **Elektromágneses gerjesztéssel keltett ultrahangok (EMAT-módszer)**

Fémekben-sztatikus mágneses tér jelenlétében - nagyfrekvenciás gerjesztésű tekercs segítségével is létrehozható mechanikai vibráció. A tekercs árama által keltett elektromágneses tér a közelében lévő tárgyban örvényáramokat kelt és a sztatikus mágneses térrel együtt mechanikai erőhatás keletkezik.

A kibocsátott ultrahang számára a levegő nagyon nagy akadály. Biztosítani kell tehát, hogy a vizsgálófej és a vizsgálandó darab felülete között ne legyen levegő. Ez a követelmény a "csatlakoztató anyagokkal", pl. olajjal, vízzel, zsírral teljesíthető.

Az ultrahangvizsgálatoknak két alapvető eljárása fejlődött ki: az **átsugárzásos** és az **impulzus-visszhang** módszer.

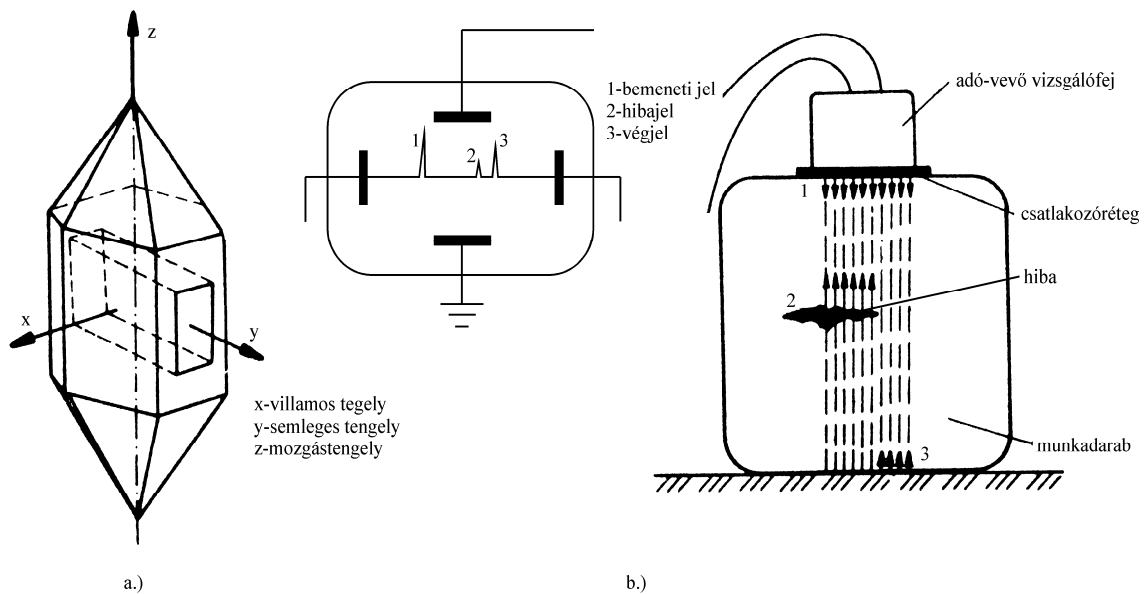
Az ultrahang vizsgáló készülék észlelő része a katódsugár oszcilloszkóp ernyője. Az ernyő függőleges tengelyén a visszhang erőssége, vízszintes tengelyén, pedig a visszhangot adó felület távolsága olvasható le.

Az **impulzus-visszhang** módszer elvi vázlatát szemlélteti a 2.55/b. ábra. **A vizsgálófej  $10^{-4}$  s ideig kb. 4-5 hullámot bocsát ki, ezután vevőfejként dolgozik, így a határfelületekről visszavert hullámokat villamos jellé alakítja.**

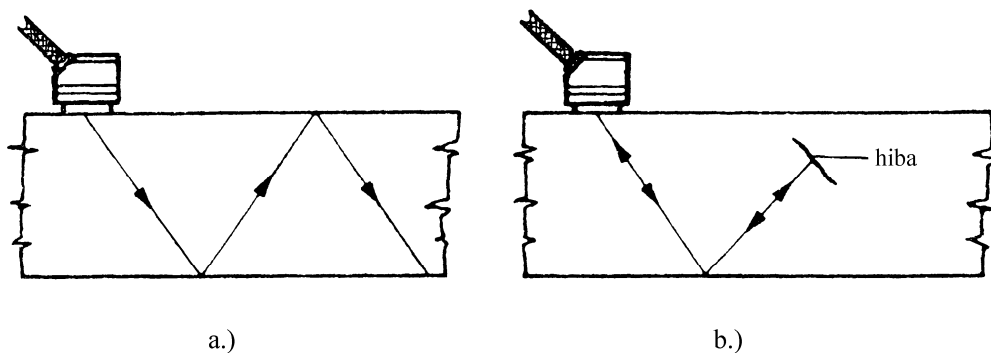
A hanghullámoknak a munkadarabra hatolása pillanatában az erősítőn át egy függőleges kitérő jelet, a bemeneti jelet (1) lehet érzékelni. Ha a hang határfelületre jut, visszaverődik, visszafelé újból áthalad a munkadarabon, és megrezegteti a kristályt. Ez a rezgés villamos jellé alakul, az erősítőbe kerül, és a katódsugárcsővön függőlegesen kitéríti a vízszintesen haladó elektronsugarat.

**Ha hibáról érkezik a visszhang, előbb jut a katódsugárcsőbe, mintha a darab végfelületéről verődne vissza.** Ez az időkülönbség, hibajel formájában a katódsugárcsővön lehetővé teszi a hiba helyének megállapítását (2). A végjel megjelenése zárja a hangimpulzusok képét (3). Olyan esetben, ha a hiba merőleges besugárzással nem érhető el (pl. tompavarratokban lévő hibák) vagy pedig nem ad megfelelő visszhangot (pl. a besugárzási felületre merőleges irányú repedések), a vizsgálatot ferde besugárzással kell elvégezni. Erre a célra különböző szögű ferde besugárzó fejeket készítenek. Két, párhuzamos lappal határolt test ferde besugárzása esetén (2.56. ábra) az ultrahang általában csak akkor verődik vissza a vizsgálófejbe, ha útjában a visszaverődés feltételének megfelelő hibát talál. A 3.56/a. ábrán a vissza nem verődő, a 3.56/b. ábrán viszont a visszaverődő hang útja látható.





2.55. ábra Ultrahangvizsgálat a) piezoelektromos kvarckristály, b) az impulzus-visszhang módszer elvi vázlata



2.66. ábra Ferdén besugárzott ultrahang útja párhuzamos oldalakkal határolt tárgyban

**A visszhang-impulzus katódsugárcsővön megjelenő magasságából következtethetünk a hiba méretére.** Nehéz feladat azonban a hiba jellegének eldöntése. Ezért rendszerint csak egyéb roncsolásmentes, pl. radiológiai vizsgálattal állapíthatjuk meg pontosan, hogy milyen hibát észlelt az ultrahangkészülék. Az ultrahangos anyagvizsgálat széles körben használatos kovácsolt darabok, lemezek, hegesztett kötések roncsolásmentes vizsgálatára.

### 2.2.7. Mágneses hiszterézisen alapuló eljárás

A sorozatgyártás, főleg kisebb darabok ellenőrzésének egyik korszerű eszköze az **elektromágneses osztályozókészülék**. Az eljárás azon a jelenségen alapul, hogy **mágnesezhető anyagok mágneses**

**hiszterézisgörbéjének alakja az összetétel, a hőkezelés és a mechanikai megmunkálás szerint változik.** Például a szénttartalom növekedése széthúzza a hurkot, a hidegalakítás pedig szögletessé változtatja. A berendezés működése egy ismert, tökéletes mintadarab és az ismeretlen munkadarab hiszterézisgörbéinek automatikus összehasonlításán alapszik. A készülék lényegében két váltakozó áramú tekercsből és egy katódsugár-oscillográfból áll. Az egyik tekercsbe az ismert mintát, a másikba az ismeretlen anyagút helyezik. A készülék mindkét tekercse felveszi a váltakozó áramú hiszterézisgörbét. Ha a két anyag között különbség mutatkozik, a katódsugárcső ernyőjén a görbék különbségének megfelelő ábra jelenik meg. A tapasztalatok szerint a készülékkel igen jól érzékelhetjük a 0,1% szénttartalom-eltérést, illetve a 10 Brinell-keménység egységet. Főképpen elcsereált anyagú munkadarabok kiválogatására a hőkezelési hibák felderítésére, az azonos összetételű acélok különféle feszültségi állapotának, edzési és megeresztési módjának eltérése kimutatására alkalmas.

### **2.2.8. Akusztikus emisszió**

Már évszázadok óta ismeretes a különböző anyagokon belüli meghibásodási folyamatok hangjainak jelensége. A fák különféle - ember által is hallható - hangokat bocsátanak ki, amikor nő bennük a feszültség, még mielőtt repedni vagy törni kezdenek. Annak ellenére, hogy felismerték az összefüggéseket a hangkibocsátás és az anyagon belüli meghibásodási folyamatok között, a hallhatóság tartományán kívüli hangokat csak néhány évtizede tudják detektálni. Mérföldkönek tekinthető az **akusztikus emisszió** fejlődésében az 1970-es évek eleje, amikor megalkották az első, gyakorlatban is hasznosítható készüléket.

A módszer alkalmazásának előnye, hogy a meghibásodásra utaló jeleket maga a vizsgált alkatrész vagy szerkezet állítja elő, továbbá az akusztikus emisszió jelenséget, mint minőségi és gyártásellenőrzési módszert egyszerre lehet alkalmazni. **A leggyakoribb felhasználási területek:** atomreaktorok blokkjainak, valamint nyomástartó edények és csővezetékek megfigyelése, repülőgépgyártás, hegesztési varratok ellenőrzése és **minden olyan hely, ahol a szerkezetek biztonsága szempontjából nagy szerepe van a repedések feltárásának és terjedésük érzékelésének.**

**Az eljárás fizikai alapelve a következő: a szilárdtest atomrács-szerkezetében az igénybevétel gerjesztette atomi mozgások hatására kialakuló feszültség-hullámokat piezó-érzékelőkkel villamosjellé alakítják át.**

**Hangimpulzusok jönnek létre,** amikor hirtelen rugalmas energia szabadul fel, ha egy fémes szerkezeti anyag alakváltozáson megy keresztül, vagy amikor repedések keletkeznek, illetve tovaterjednek benne.

Az akusztikus emissziós folyamatok forrása a fémek terhelésénél:

- a diszlokációs atommozgás (transzláció, ikerképződés),
- a repedésképződés és terjedés,
- a zárványok mozgása, alakváltozása, törése, súrlódása.

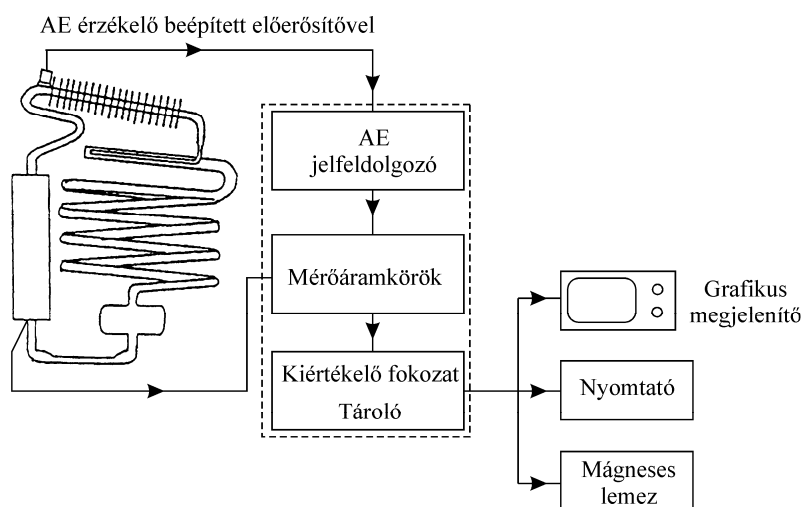
A fémekben bekövetkező akusztikus hullámjelenségre legjellemzőbb a 100 KHz – 1 MHz átlagos frekvencia. Az átalakított villamos jel jellemzői a maximális jelamplitúdó, a jel felfutási ideje, a csillapodási idő, a csillapodó oszcillációk száma, a jel-idő függvény területe és a jel négyzetes középértéke. Az akusztikus események összege, gyakorisága, a jelek maximális amplitúdójának eloszlása, amplitúdó összessége és ezek függvénykapcsolatai jellemzik az egyes fémtani változásokat. Ezek a változások összefüggésbe hozhatók a szerkezet, a szerkezeti elem teherbírásával, illetve az anyaghibák, mint akusztikus források megtalálásával.

Nagyságrendi tájékoztatásul figyelembe vehető az acélok esetében a különböző fizikai hatások keltette amplitúdók 1  $\mu$ V-ra vonatkoztatva:

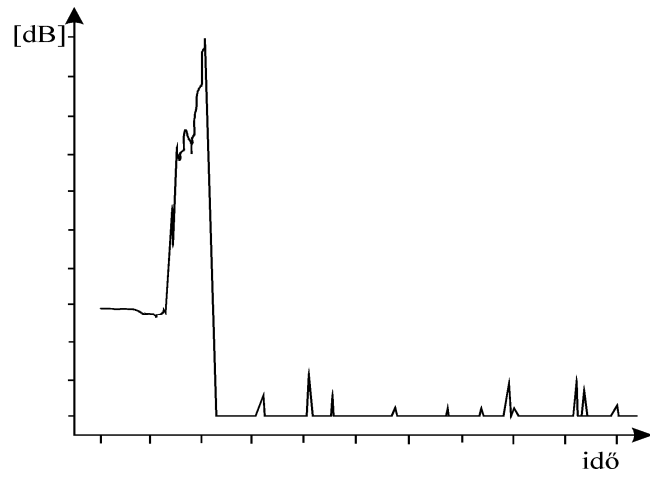
- diszlokációs változások: 10-20 dB
- zárvány-leválás: 30-50 dB
- zárvány törése: 50-70 dB
- szemcsehatári repedések: 60-80 dB
- repedésterjedés: 80-100 dB
- törés: 100-120 dB

A mérésekhez több érzékelőt kell telepíteni a vizsgálandó tárgy felületére, hogy a megengedhető hangcsillapodás mellett kaphassunk hangemissziót a teljes szerkezetről. A kapott emissziós adatok függvényeiből megállapítható, milyen a szerkezet állapota, milyen terhelésnél keletkezett káros aktivitás, ennek mértéke veszélyes-e a szerkezet biztonságára.

Akusztikus emissziós eseményeket mérő elrendezés látható a 2.57. ábrán. Példaként egy szerszámtörésből származó aktivitásváltozást mutat a 2.58. ábra a mérő elrendezés grafikus megjelenítőjén.



2.57. ábra Akusztikus emissziós eseményeket mérő elrendezés



2.58. ábra Szerszámtörésből származó aktivitásváltozás forgácsoló megmunkálásnál

### 3. Fémek, ötvözetek előállítása

Még ma is a legszélesebb körben felhasznált szerkezeti anyagaink a különféle fémek, illetve ötvözeik. Alakíthatóságuk, mechanikai-szilárdsági és egyéb kedvező tulajdonságaik teszik erre rendkívül alkalmassá. Közülük egyesek elterjedten fordulnak elő, míg mások ritkák. A természetben csak néhány fémet lehet elemi állapotban megtalálni, ami kémiai tulajdonságaikkal függ össze. Elemi állapotban is megtalálható az arany (Au), az ezüst (Ag), a platina (Pt), a réz (Cu). Ezeket telérek tartalmazhatják. A felaprózódott részecskéket a víz is magával ragadhatja (arany szemcséket folyók homokjából is ki lehet vonni), de ipari szempontból az elemi állapotban való fellelésnek nincs különösebb jelentősége. A fémek kémiai tulajdonságaiktól függően, általában különféle vegyületeket képeznek a környezetükben lévő elemekkel, főleg a levegő oxigénjével (O<sub>2</sub>), széndioxidjával (CO<sub>2</sub>), de a kénnel (S), klórral (Cl) is, így képezve oxidokat, karbonátokat, szulfidokat, kloridokat stb. A fémeknek a földkéreg alkotó vegyületeit, **ásványoknak** nevezzük. Az ásványok egy része a fémek előállításra felhasználható, más része nem (meddő). Ezek együtt alkotják az **érceket**, amelyek a fémek előállításának alapanyagai.

Ahhoz, hogy egy ércből a fémet gazdaságosan elő lehessen állítani, bizonyos feltételeknek meg kell felelnie (3.1. táblázat):

- a fémtartalomnak egy minimális szintet el kell érnie (műrevalóság),
- egy adott helyen gazdaságosan kitermelhető mennyiségben kell előfordulnia,
- gazdaságosan kitermelhetőnek kell lennie.

3.1 táblázat Fémek gyakorisága a földkéregben, ércek fémtartalma

A fém fajtája	Átlagos koncentráció a földkéregben [tömeg %]	A felhasználhatóság alsó határa (műrevalóság [tömeg %])	Az ércék átlagos fémtartalma [tömeg %]
Vas (Fe)	5,60	35	40-70
Mangán (Mn)	0,10	25	25-50
Titán (Ti)	0,74	20	30-50
Alumínium (Al)	8,13	15	20-30
Magnézium (Mg)	2,09	10	12-15
Króm (Cr)	0,04	5	10-25
Cink (Zn)	0,007	2	6-20
Réz (Cu)	0,006	0,5	1,5-5
Nikkel (Ni)	0,008	0,2	1-5

Az ásványok a földkéregben nem az átlagos értéknek megfelelő, hanem annál helyenként jóval nagyobb arányban, dúsulásokban, érctelepekben fordulnak elő. Ezek létrejöttében különböző folyamatok játszottak közre:

- a hordalékképződés (folyókanyarulatokban, torkolatokban, tengerparton, a sűrűségkülönbség alapján kiülepedés útján jöttek létre érctelepek),
- a mállási folyamatok (hőmérséklet-különbség hatására aprózódás, majd a keményebb hordozókőzetből kiválással jöttek létre nikkel- és bauxittelepek, amelyek sokszor külszíni fejtéssel kitermelhetők),
- hidrotermális folyamatok (vízben oldódó, oxidos, szulfidos fémvegyületek, vulkanikus körülmények között nagy nyomáson, akár tengerfenéken is, 300-500 °C-os oldatból a tútelítődés során hidrotermális telérekben jöttek létre).

### 3.1 Ércék előkészítése, dúsítása

Az érctelepek gyakran egyszerre többféle fém ásványát is tartalmazzák, ami a kitermelés és a fémkinyerés gazdaságosságát fokozza (komplex ércek). A kitermelés során az ásványokhoz kísérő kőzetek is keverednek, amelyek növelik az érc meddőtartalmát.

A meddőtartalom csökkentése érdekében különböző ércelőkészítő eljárások alkalmazására van szükség. A fémek kinyerésének folyamatában a következő műveleteket különböztetik meg:

1. **Ércelőkészítés**, amelynek során a meddőtartalom csökkentését, dúsítást, pörkölést, aprítást, darabosítást hajtják végre.
2. A fémkinyerés **kémiai metallurgiai** folyamattal (extraktív metallurgiával).
3. A **fém finomítása** olvadt állapotban, amelynek során a kohósított fémekben lévő szennyezők mennyiségét csökkentik, tulajdonságait ötvözők hozzáadásával javítják.
4. **Kristályosítás**, amelynek során a finomított fém megszilárdul.

Az ércelőkészítés célja, hogy minél kevesebb meddő anyag kerüljön be a kohászati folyamatba, valamint a fémkinyeréshez minél kedvezőbb állapotú és méretű legyen az érc. Ezt el lehet érni:

- dúsítással, pörköléssel,
- aprítással,
- darabosítással.

Az ércdúsításnak különféle módszerei alakultak ki. A **fizikai** módszerek a **sűrűség különbségen**, a **mágneses tulajdonságokon** és a nedvesíthetőségen, a **felületi feszültség-különbségen** alapulnak.

Vízáramban a különböző sűrűségű részecskék mozgási energiája különböző. Ülepedéskor a nehezebb részek alul, a kisebb sűrűségű részek felül helyezkednek el, így szétválaszthatók.

A mágnesezhető fémvegyületek mágneses térben jól elkülöníthetők a nem mágnesezhető meddő anyagoktól.

A **flotálás** az egyik leghatékonyabb eljárás, főleg ha több fokozatban végzik a meddő részek leválasztására. Elsősorban a szulfidos ércekhez lehet jól használni, mint a réz-, cink-, ón-, ólom-, nikkel ércekhez. Lényege az, hogy a különféle anyagok felületét a folyadékok különböző módon nedvesítik. A felületükön a folyadékot jól megkötő anyagot **hidrofilnek**, a nem nedvesedőt **hidrofóbnak** nevezik. Az utóbbihoz a gázok folyadék jelenlétében nagy felületen tudnak tapadni, így a folyadék felszínére emelkednek. A flotáció során az elegyben buborékokat képeznek, és a hidrofób részecskéket ezáltal, a folyadék felszínére úsztatják. Ahhoz, hogy ott is maradjanak, a folyadékhoz habosító anyagot adagolnak. A fémvegyületeket tartalmazó habot a felszínről leválasztják, majd víztelenítik. A meddő rész a folyadék alján gyűlik össze, majd innen leeresztik.

Az érdúsításnak **kémiai** módszerei is vannak.

A kémiai ércdúsítás fajtái:

- pirometallurgia (kiégetés, másként kalcinálás; pörkölés),
- hidrometallurgia (lúgozás).

Az **kiégetés** során az ércet önmagában, adalékok nélkül, de levegő jelenlétében olyan hőmérsékletre hevítik, ahol a fémvegyületek részben vagy teljesen elbomlanak, illetve elvesztik nedvességtartalmukat. A reakciótermékek gáz alakban távoznak. A művelet önállóan, elsősorban kis kötésienergiájú vegyületek (karbonátok, magasabb rendű oxidok, hidroxidok) dúsítására alkalmas.

**Pörköléskor** az ércet nem önmagában, hanem egyéb anyagokkal (reagensekkel) hevítik. A kémiai reakciók révén az ércben lévő nemfémes anyagok mennyisége csökken. Alkalmazzák más eljárásokkal kombinálva is, mint például flotálással dúsított koncentrátum továbbdúsítására.

A **hidrometallurgiai** eljárás során vizes oldatokkal az ércet vízben oldható vegyületekké alakítják át. Ezt általában **lúgozással**, a lúgok híg oldatával érik el. Ilyenkor a meddő rész nem oldódik, ezért ezt ülepítéssel, szűréssel el lehet választani a fémet tartalmazó oldattól. Az oldat túltelítésével, kristályosodást segítő csíráképző anyagok adagolásával a fémvegyületek kikristályosíthatók. Az úgynevezett **kikeverés** során az oldat egyenletes töménységét fenn lehet tartani a kristályosodás során. Ilyen a timföldgyártásnál alkalmazott *Bayer*-eljárás.

A fémkinyerés során fontos tényező az ércdarabok mérete, mivel a túlságosan nagy darabok felület-tömeg aránya nem megfelelő, így az egyes metallurgiai folyamatok nem megfelelő módon és sebességgel mennek végbe. A nagyméretű részek aprítására szolgáló művelet az **aprítás, őrlés**.

Ezt a műveletet általában már a dúsítás előtt elvégzik. Máskor, a dúsított ércek esetében pedig, éppen az okozhat nehézséget, hogy a kapott termék szemcsemérete túl kicsi, milliméteres nagyságrendű. Az olvadékból történő

fémelőállítás során a szemcseméretnek nincs különösebb jelentősége. Ha azonban a redukció például kohóban, szilárd ércből történik, a kisméretű szemcséket a befűvott levegő, a füstgázok magukkal ragadják, ami jelentős fémvesztést okozhat, és még egyéb nehézségekkel is járhat (porleválasztás szükséges). Másik gond, hogy az anyagoszlop súlya alatt annyira tömörödhetnek az apró szemcsék, hogy akadályt jelentenek a gázok áramlásának útjában, esetleg boltozódhatnak. Mindezen káros hatások elkerülése érdekében a kicsi szemcseméretű koncentrátumokat, érceket **darabosítják** (aglomerálják).

A darabosítás nemcsak az érc koncentrátum részecskéinek méretnövesztésére szolgál, hanem salakképző és redukáló anyagokat is adagolnak az érchez. A darabosító eljárásoknak két fő csoportja a zsugorító pörkölés és a pelletezés.

Például a nyersvasgyártás során a **zsugorító pörköléshez** az érc koncentrátumot előbb szén- és mészkőporral keverik és nedvesítik, majd a keveréket egy mozgó rostélyon átvezetik egy forró kemencén. Amikor a rostélyon át levegőt fúvatnak, a keverékben lévő szénpor (koks) meggyullad, de az oxigénhiányos környezetben csak részben ég ki. Így szénmonoxid (CO) is keletkezik, ami már részlegesen redukálja a vasoxidot.

Az érc koncentrátumban visszamaradt kvarc ( $\text{SiO}_2$ ) a mésszel vegyül és a vasoxiddal eutektikumot képez, amely  $1260\text{ }^\circ\text{C}$ -on olvad. Az  $1300\text{ }^\circ\text{C}$  hőmérsékletű kemencében a keletkezett eutektikum olvadt állapotban van. Hűlése során összeköti a vasoxid részecskéket, kialakítva így egy porózus szerkezetű anyagot. A folyamatot **szinterelésnek** nevezik. Az anyagot levegővel gyorsan lehűtik, majd darabolják és rostálják.

A **pelletezés** során az érc koncentrátumhoz csak *ragasztóanyagot* adagolnak, ami általában vízüveg vagy bentonit. A keverék részecskéi forgódobban vagy forgó tányéron görögve  $20 - 30\text{ mm}$ -es szemcsékké állnak össze. A nyers pelletet  $1300\text{ }^\circ\text{C}$ -on kiégetik, így növelve szilárdságát.

### 3.2 Ércből, fémek kinyerésének technológiái

Az érc koncentrátumok vegyületeiből a fémeket úgynevezett extraktív (kivonásos) metallurgiai eljárásokkal állítják elő. A leggazdaságosabb eljárást a következő tulajdonságok alapján lehet kiválasztani:

- az ásványt alkotó vegyület fajtája,
- az érc fémtartalma,
- a fém fizikai és kémiai tulajdonságai,
- a meddő rész tulajdonságai alapján.

A különböző eljárásoknak két fő csoportja van: az **elektrometallurgiai** és a **pirometallurgiai** eljárások csoportja.

Az **elektrometallurgiai** eljárások során a fémet vegyületeiből az elektromos energia felhasználásával különítjük el a többi alkotótól. A szilárd anyagokban az ionokat csak viszonylag nagy energia árán lehet elmozdítani, a



vegyületeket elbontani. Ha oldással vagy az anyag megolvasztása révén a foyadékbán a disszociált ionokat összetartó elektrosztatikus erő lecsökken, lehetővé válik az ionvándorlás az elektromos áram hatására. Ezt, az ionokat tartalmazó foyadékokat nevezik **elektrolitnak**. Az elektrokémiai folyamat során az elektrolitba elektródok merülnek. Az elektrolit töltéssel rendelkező részecskéi az ellentétes töltésű pólusok irányába mozognak, az elektródokon kiválnak. A negatív (-) töltésű anionok a pozitív (+) töltésű **anódon**, míg a pozitív töltésű kationok a negatív töltésű **katódon** válnak ki.

Az oldatból vagy olvadékból a pozitív töltésű fémionok a katódon (-) válnak ki. Az elektrolízissel nemcsak kinyerni lehet a fémet az elektrolitból. Ha szennyezett fémet használunk anódként, az elektrolízis során a fémionok kiválnak a katódra, míg a szennyező anyagok visszamaradnak az elektrolitban, illetve kiülednek az aljára. Az elektrometallurgiai eljárás fontos szerepet játszik például az alumínium előállításában, a réz tisztításában.

A **pirometallurgiai eljárások** során az érckoncentrátum fémoxidjait magas hőfokon redukálják, megolvasztják más, a folyamatot elősegítő anyagok jelenlétében. Ilyen kohászati eljárással állítják elő, például a nyersvasat. Jelentőségének megfelelően a legfontosabb gyakorlati fémek, mint az alumínium, réz, nyersvas előállítását részletesebben tárgyaljuk.

### 3.3 Alumíniumötvözetek előállítása

#### 3.3.1 Alumíniumgyártás

Az alumínium a könnyűfémek csoportjába tartozik. Ércé a bauxit, mely oxid formában tartalmazza az alumíniumot ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Az alumínium fontosabb fizikai tulajdonságai:

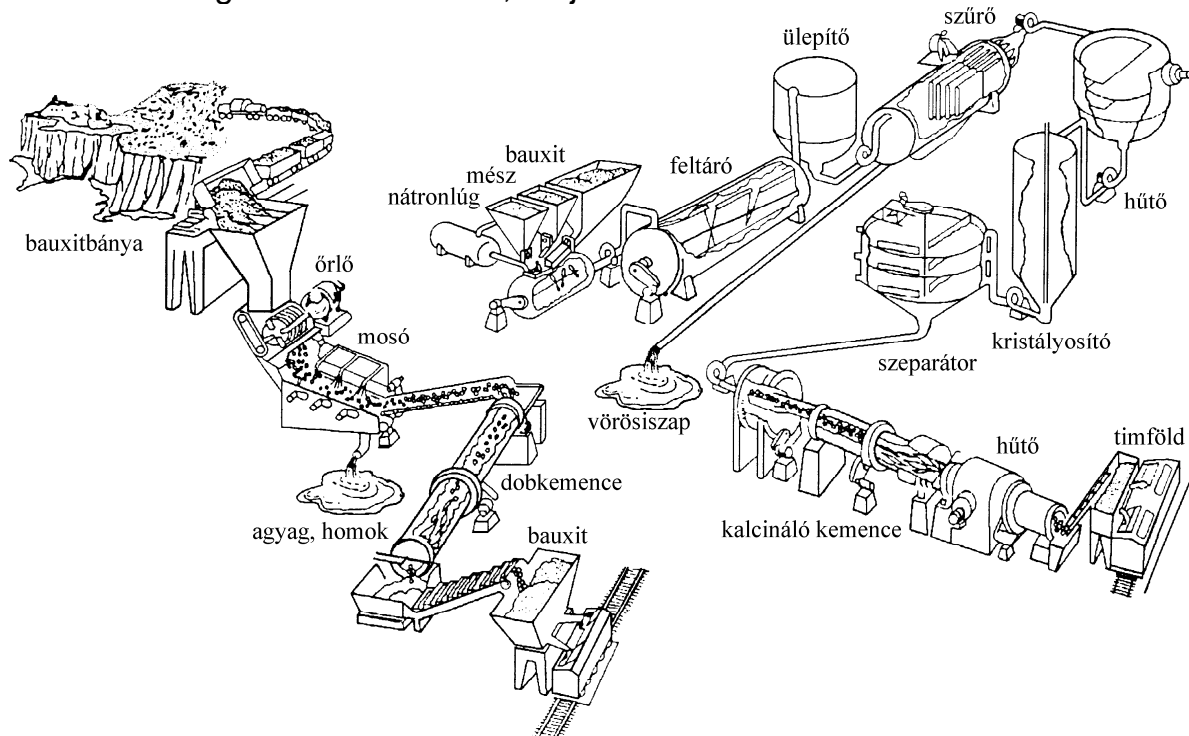
- |                        |   |
|------------------------|---|
| - kis sűrűség          | $\rho = 2,7 \left[10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ , |
| - alacsony olvadáspont | $T_o = 660 \text{ [}^\circ\text{C]}$ ,                        |
| - kis folyáshatár      | $R_{eH} = 20 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ ,                       |
| - kis keménység        | 12 HBS,   |
| - rácsszerkezete       | lapközepes köbös (lkk).                                       |

A bauxit vörös színű ásvány, színét a benne ugyancsak jelenlévő vasoxidtól kapja.

Az alumíniumgyártás első fő fázisa a tiszta alumíniumoxid, a **timföld** előállítása.

A timföldgyártás folyamata lényegében megfelel a hidrometallurgiai eljárásnál ismertetett ércdúsítási folyamatnak (3.1. ábra). Az előkészített, őrölt, mosott, dobkemencében hevítéssel kiszáritott bauxitot nátronlúg vizes oldatához adagolják, ahol az alumínium oldódik és **nátriumaluminátot** képez, és oldatban marad. Az oldáshoz legmegfelelőbb hőmérséklet a 180-230 °C. Ilyen magas hőmérsékletet vizes oldatban csak atmoszférikusnál magasabb

nyomáson lehet elérni. A feltárás után leválasztják a meddő részt, a *vörösiszapot*. Az alumínát lúgot hűtik 100 °C-ra, majd szűrik.



3.1. ábra A timföldgyártás folyamata

A kristályosítóban az 50 °C -os túltelített oldatból a csiraképző oltóanyag és a keverés hatására kikristályosodik az alumínium-hidroxid  $[\text{Al}(\text{OH})_3]$ . A szilárd fázist szűréssel leválasztják, az oldatot pedig, amely még sok alumínium-hidroxidot tartalmaz, bepárolják, és visszavezetik a rendszerbe.

Az alumínium-hidroxidból kalcinálás útján lesz alumíniumoxid, más néven timföld, ami egy fehér, finom, porszerű anyag. Ebből állítják elő elektrometallurgiai úton az úgynevezett **kohóalumíniumot**.

A timföld kohósítása **elektrometallurgiai** eljárással történik. Az elektrolízishez az alumíniumoxidot **oldják**, nem olvasztják, mivel olvadáspontja nagyon magas, 2045 °C, így megolvasztása nem gazdaságos (az alumínium fémé csak 660 °C). A timföldet 6-8 % olvadt **kriolitban** ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ , olvadáspontja 1010 °C) oldják fel, és ezt használják elektrolitnak. Ennél az összetételnél az elektrolit hőmérséklete csak 950-980 °C.

Az elektrolízis során, a katódon válik ki az alumínium, míg az anódon az oxigén. Az elektrolit magas hőmérsékletén az anód környezete igen agresszív, ezért az anód anyagaként grafitot használnak.

A kohósító berendezés lényegében egy kád, melynek alapterülete mintegy 15-60 m<sup>2</sup>, körülbelül 1-1,5 m mély. **Kokszköpeny** béleli, ami egyúttal a **katód** szerepét is betölti. Az elektrolitba **grafitból készült anód** merül. Az elektrolízis során a felszabaduló oxigén és a szén reakciójaként hő termelődik, így az elektromosenergia-igény csökken, de gondoskodni kell a grafit pótlásáról (1 kg

alumínium elektrolíziséhez mintegy 6 kg grafit kell), valamint a keletkező széndioxid (CO<sub>2</sub>) elvezetéséről.

Mivel az alumínium elektrolízise folyamatos üzem, 2-4 óránként pótolni kell a timföldet.

Az olvadt alumínium a kád alján gyűlik össze, amit vákuum segítségével egy-két naponta gyűjtenek csapoló üstbe. Időszakosan alumínium-fluoridot (AlF<sub>3</sub>) adagolnak az elektrolitba.

A gyártási folyamatnak nagy az elektromosenergia-igénye. Az elektrolízishez 50-250 kA erősségű áramot használnak.

A gazdaságosabb üzemeltetés érdekében több kádat sorba kapcsolnak. A kádra kapcsolt feszültség nagysága 4-5 V. A feszültségesés mintegy 34%-a az Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bontása következtében áll elő, míg 28%-a a hőtermelés, 38%-a pedig az áramkör átmeneti ellenállása miatt lép fel.

Az elektrolízis során 1 kg alumínium előállításához mintegy 18 kWh energia szükséges.

Az anyagfelhasználás szempontjából irányadó lehet, hogy 4 kg bauxitból mintegy 2 kg timföld állítható elő és ebből körülbelül 1 kg kohóalumínium lesz.

*A kohóalumínium nem szinalumínium.* Tisztasága csupán 99-99,5%. Vegyi összetételét a 3.2. táblázat tartalmazza.

3.2. táblázat A kohóalumínium összetétele

sor-sz.	A kohóalumíniumban található elemek	Az elemek mennyisége (tömeg %)
1.	alumínium (Al)	98,6-99,3
2.	vas (Fe)	0,2-0,6
3.	szilícium (Si)	0,2-0,4
4.	réz (Cu)	0,03-0,1
5.	cink (Zn)	0,03-0,1
6.	titán (Ti)	0,05-0,15

### 3.3.2 Az alumínium finomítása (rafinálása)

A kohóalumíniumot az ipari felhasználáshoz finomítani, illetve ötvözni kell. A gyakorlatban akkor beszélünk szinalumíniumról, ha 99,99%-os tisztaságot elér (négykilences alumínium). Az elektronikában használnak ötkilences tisztaságút is, mivel a vezetőképesség a tisztaság fokozásával nő.

A kohóalumínium finomításának egyik módszere a **háromréteges olvadék elektrolízis**. Ennek eszköze egy, a timföld elektrolízisénel használatos kádroz hasonló berendezés, de itt a kád alját képező grafitömb a pozitív anód, míg a bemerülő grafitrúd a katód.

A kádrozban három olvadékréteg helyezkedik el egymás felett elkülönülten.

Legalul képez réteget, mint anódfém a kohóalumínium olvadéka, a melyet rézzel ötvöznek azért, hogy nagyobb legyen a sűrűsége. Felette egy

báriumkloridban oldott kriolit és nátriumklorid elektrolit réteg található. Legfelül helyezkedik el az olvadt, finomított alumínium, mint katód.

Az alumíniumnak azok a szennyezői, melyeknek az úgynevezett **standard elektródpotenciáljuk** nagyobb, mint az alumíniumé (Cu, Fe, Sn, Si, Cr, Zn, Mn), az olvadt anódfémekben maradnak, mert nem oldódnak az elektrolitban. Amelyeknek kisebb az elektródpotenciáljuk (Na, Ca, Mg, Ti), azok oldódnak, de a katódon nem tudnak kiválni, így az elektrolitban maradnak, majd túltelítődés után részben kicsapódnak és üledéket képeznek. A szennyezők tehát az anód olvadékában gyűlnek össze. Eltávolítani az elektrolit frissítésével és az anód részleges cseréjével lehet.

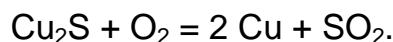
A finomított alumíniumot vákuumszivattyúval egy-két naponként eltávolítják.

A még nagyobb tisztaságú **öttilences** fémek előállításának egyik leghatékonyabb módszere a **zónás átolvasztás**, amelyet itt részletesen nem ismertetünk. Elve azon alapul, hogy a már szilárd fém kevesebbet tud oldani a szennyezőkből, mint az olvadék. A zónás átolvasztás során a szennyezők egy jó része a szilárd és a folyékony fázis határán átdiffundál a nagyobb oldóképességű folyékony részbe, és ott halmozódik fel. A folyamat végén ez az erősen szennyezett rész eltávolítható.

### 3.4 Rézötvözetek előállítása

#### 3.4.1 Nyersréz előállítása

A rezet főleg szulfidos érceiből állítják elő. Ez főleg **kalkopirit**, ami a réznek és a vasnak közös szulfidja (CuFeS<sub>2</sub>) réztartalma 35%. Pörköléssel úgynevezett **kéneskövet** állítanak elő belőle, aminek a réztartalma meghaladja az 50%-ot. A kéneskő előállításának egyik legelterjedtebb módszere a nagysebességű, előmelegített levegővel lebegtetett ércpor pörkölése, illetve lángkemence használata. A kéneskő a rezet rézszulfid formájában tartalmazza. Mivel a kénnek az affinitása nagyobb az oxigénhez, mint a réznek, ezért vegyületéből a ként oxidálva kinyerhető:

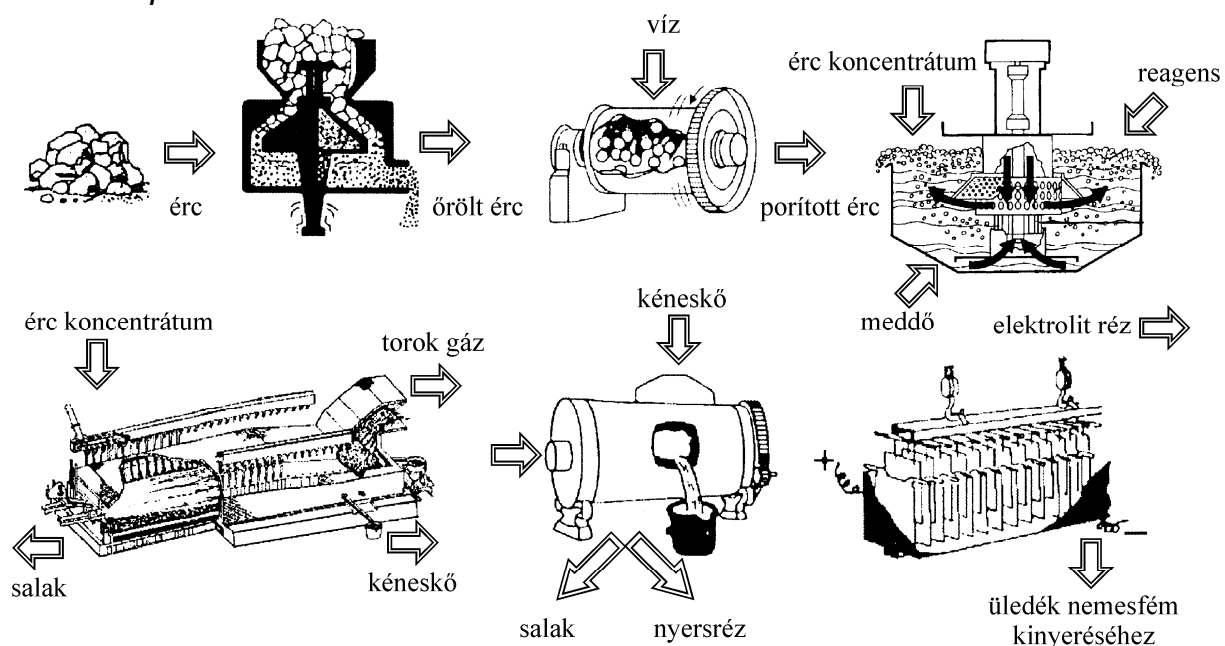


A folyamat egy konverterben megy végbe. Az olvadt rézszulfid felületére levegőt fúvatnak. A keletkező kéndioxid gázt elvezetik, leválasztják. A kivált réz is oldja a ként, mintegy 1,2%-ban, de oldódik benne az oxigén is. Csapolás után, ahogy hűl a nyersréz, úgy csökken az oldóképessége is. A kristályosodó fémből már az oldott anyagok nem képesek eltávozni, ezért zárványok formájában visszamaradnak.

A nyersréz (ún. kohóréz) réztartalma 98,5 - 99,5 %, a fennmaradó 0,5-1,5 %-ot a kén és oxigén teszi ki, sőt ércből függően még aranyat, ezüstöt, nikkelt, szelént, tellúrt is tartalmazhat. Ezért a nyersrezt még tovább kell finomítani.

## 2.4.2 A réz finomítása

A réz tisztítása **oldható anódos eljárással**, elektrolizáló kádakban történik. Meglehetősen időigényes folyamat. Ennek során a tisztítandó rézből öntött, vastag lemez lesz az anód, a katód pedig, már tiszta rézből készült vékony, 0,3 - 0,8 mm vastag, úgynevezett induló lemez. Az elektrolit kénsavas rézszulfát vizes oldata. A kád több cellára oszlik (3.2. ábra). Az elektrolízis során a kísérő fémek vagy szennyezők, mint az arany, platina, ezüst, szelén, tellúr nem oldódnak az elektrolitban, hanem összegyűlnek a kád alján az anódiszapban. Ez tovább feldolgozható, belőle a fémek kivonhatók. Az ólom, antimon az elektrolittal reakcióba lépve szulfátot képeznek és végül az **anódiszapba** kerülnek.



3.2. ábra A réz kohósításának folyamata

Az elektrolízis során körülbelül ugyanannyi réz válik le az anódról, amennyi kiválik a katódon, ezért a gyakorlatilag nem változik az elektrolit rézion koncentrációja, de a szennyezők feldúsulása miatt időnként cserélni kell. Műveleti ciklusnak az anódcserék közötti időt tekintjük, ami 20-30 nap. Ennyi idő alatt az anód tömege 15 - 20 %-ára csökken. Az anód maradékát újraolvasztják. Az anódiszapot összegyűjtik és feldolgozzák, az elektrolitot lecserélik.

A **színrész a vörösrész**, tisztasága 99,99 %. Ennek tisztasága is fokozható 99,999 %-ra, ha például **zónás átolvasztást** alkalmaznak.

## 3.5 Vasötvözetek előállítása

### 3.5.1 Nyersvasgyártás

Mivel a vas a földön természetes állapotban csak vegyületeiben fordul elő (kivéve egy kevés meteorvasat), ezért érceiből kell előállítani több lépésben. A gazdaságosabb fémelőállítás érdekében ma már jól előkészített, dúsított, darabosított (pellet, szinter) érc koncentrátumot használnak. A vasércből, koncentrátumból közvetlenül **nyersvasat** állítanak elő kohászati eljárással.

Mivel az érc, illetve érc koncentrátum a vas különböző oxidjait tartalmazza ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x \cdot \text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{FeO}$ ), ezért a vas előállításának alapvető vegyi folyamata a **redukció**. **Redukálószerként** olyan elemet használnak, amelynek nagyobb az affinitása az oxigénhez, mint a vasnak. Ez az **izzó szén** (koks). Mivel a vas jól oldja a szenet, a kohászati eljárás eredménye nem szén vas, hanem a vasnak és a benne oldott szénnek ötvözete, amely tartalmaz még a gyártás során belekerült egyéb elemeket is, például foszfort (P), ként (S) és oxidokat. A kohónak ezt a termékét **nyersvasnak** nevezzük. Széntartalma magas, 2,06-6,67 % közé esik.

#### 3.5.1.1 A nyersvasgyártás anyagai

A nyersvasgyártáshoz az ércen kívül még egyéb anyagokra is szükség van. Ezeket két nagy csoportba osztjuk: az alapanyagok és a segédanyagok csoportjára.

**Alapanyagok** azok, amelyek közvetlenül részt vesznek a kohósítás folyamatában. Ezek a következők:

- **vasérc,**
- kohókoks,
- salakképző anyagok.

**Segédanyagok** csoportjába azok tartoznak, amelyek közvetve vesznek részt a kohászati folyamatban, de segítik azt. Ezek a következők:

- levegő (oxigént biztosít az égéshez),
- hűtővíz.

#### A nyersvasgyártás alapanyagai

Az alapanyagok közül legalapvetőbb a vasérc (3.3. táblázat) Ennek különböző fajtáit bányászat útján nyerik.

### 3.3. táblázat A vasércék fajtái

Sor-sz.	Az érc fajtája	A vastartalmú vegyület	Vastartalom (tömeg %)	Megjegyzés
1.	Mánesvasérc (magnetit)	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	50-70	oxidos érc
2.	Vörösvasérc (hematit)	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	40-65	oxidos érc
3.	Barnavasérc (limonit)	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x \text{H}_2\text{O}$	25-50	oxidos érc
4.	Vaspát (sziderit)	$\text{FeCO}_3$	25-40	karbonátos érc

Az érc vastartalma függ fajtájától, fellelésének helyétől. Feldolgozásra a 30%-nál több vasat tartalmazó ércek dolgozhatók fel („műrefoghatók”) gazdaságosan, de ma már van technológia a 20 % körüli vastartalmú ércek, melléktermékek gazdaságos feldolgozására és a fém kinyerésére is. Az érc előkészítése, dúsítása, darabosítása a korábbi fejezetben ismertetett módon történik (3.4. táblázat).

### 3.4. táblázat Érckoncentrátumok alkotói és azok mennyisége

Koncentrátum	Alkotók mennyisége (tömeg %)								
	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	FeO	MnO	$\text{SiO}_2$	CaO	MgO	$\text{Al}_2\text{O}_3$	FeS	P
Pellet	84-97	0,5-2,0	0,1-0,2	1,5-6,5	0,5-1,0	0,5-2,0	0,3-1,5	0,02-0,04	0,005-0,01
Érc-zsugorítvány	60-68	10-15	0,1-0,4	6,0-12	8,0-12	1,5-4,0	1,5-2,0	0,04-0,08	0,02-0,04

**Az vasérc redukálószerre az izzó szén.** A szénnek a feladata a nyersvasgyártás során komplex, többféle követelményt kell kielégítenie. Gázáteresztőnek, porózus szerkezetűnek kell lennie, hogy a folyamatban keletkező gázokat, égéstermékeket átengedje, nagyszilárdságúnak, hogy az anyagszlop súlya alatt ne tömörödjön, nagy égéshővel kell rendelkeznie, hogy a redukcióhoz és az olvasztáshoz megfelelő hőmérsékletet biztosítsa. Fontos követelmény, hogy szennyezőtartalma minimális legyen. Erre a célra a jó minőségű feketeszénből, levegőtől elzárt hevítés útján nyert **koks** felel meg leginkább. Használtak faszenet is kohászati célokra, de kis szilárdsága miatt nagyméretű kohóban nem megfelelő.

A koks szerepe a kohászati eljárás során:

1. redukálja a vasoxidot,
2. biztosítja a fémkinyeréshez szükséges hőmérsékletet,
3. viseli az anyagoszlop súlyát,
4. gázáteresztő, fellazítja az anyagoszlopot,
5. oldódik a vasban, annak ötvözője.

A koks jellemzőit a 3.5. táblázat foglalja össze.

3.5. táblázat Koks jellemzői

A koks tulajdonságai	
A feketeszen lepárlásának hőmérséklete [°C]	1 000 - 1 100
Fűtőérték [MJ/kg]	28 - 30
Széntartalom [%]	78 - 83

Az alapanyagok harmadik csoportját alkotják a **salakképző anyagok**. Ezekből keletkezik az ércek kohósításánál nélkülözhetetlen, szilikátokból, fémes és nemfémes oxidokból álló, egymással oldatokat képező anyag, amit **salaknak** nevezünk. A salak a nyersvasgyártás mellékterméke, a gyártás hőmérsékletén folyékony állapotban van. A salak a fémfüldőnél kisebb sűrűségű, ezért annak felületén úszik, elzárva a nyersvasat a levegő oxidáló hatásától. A salak szerepe a teljes kohászati eljárás során nagy. A „salakvezetés” jelentősen befolyásolja a nyersvas összetételét, szennyezőanyag tartalmát.

A **salak szerepe** az alábbiakban foglalható össze:

- részt vesz a kohászati folyamatokban, elősegíti bizonyos elemek fémfüldőbe jutását, illetve onnan eltávolításukat,
- a meddő leválasztását elősegíti,
- megakadályozza a nyersvas újraoxidációját,
- védi a fémfüldőt a kihűléstől.

A vasércek általában savas kémhatásúak, ezért a nyersvasgyártáshoz jórészt bázikus salakképzőket használnak. Ilyenek a **mészke** ( $\text{CaCO}_3$ ), **dolomit** [ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ] (3.6. táblázat).

A **segédanyagok** jelenléte feltétlenül szükséges a gyártáshoz. Fontos segédanyag a **levegő**, mivel a koks égéséhez nagymennyiségű **oxigénre** van szükség.



### 3.6. táblázat Bázikus salakképzők összetétele

Összetevők	Mészkeő [%]	Dolomit [%]
CaO	53,5-54,5	30-31,5
MgO	0,8-1,0	20-22
CO <sub>2</sub>	43-44	45-46
Egyéb	0,5-2,7	0,5-5

A kohászati folyamatokhoz nagynyomású, 900-1 000 °C-ra előmelegített levegőre van szükség. Az előmelegítés a kohó mellé épített hőcserélő tornyokban (cowper-tornyokban) történik, a kohóból távozó torokgáz hőjét felhasználva. Ma már előmelegítés helyett inkább a levegő **oxigéntartalmát dúsítják 30-40 %-ra**.

Fontos segédanyag a hűtővíz. Feladata a kohó falazatának védelme a túlhevüléstől, megolvadástól. A kohó vízigénye nagy, az óránként felhasznált vízmennyiség megegyezik a kohó térfogatával. Minden tonna nyersvasra, mintegy 27-30 m<sup>3</sup> hűtővizet kell biztosítani. A biztonságos vízellátás a kohó üzembiztonságának alapvető kérdése. A hűtővizet természetesen zárt rendszerben alkalmazzák, és újra felhasználják.

#### 3.5.1.2 A nyersvasgyártás berendezései

A nyersvasgyártás alapvető berendezése a **nagyolvasztó** (kohó), ami lényegében egy nagyméretű aknás kemence. Fő méreteit a 3.7. táblázat tartalmazza.

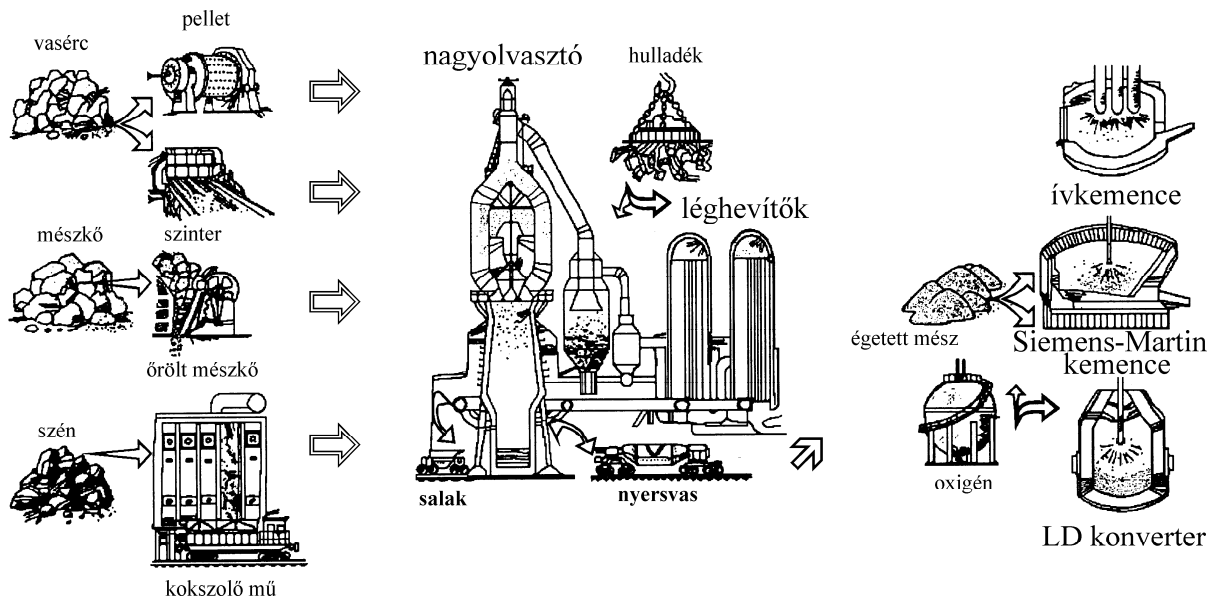
### 3.7. táblázat Egy korszerű nagyolvasztó főbb méretei és jellemzői

A nagyolvasztó jellemzői	Méretei
magassága [m]	> 40
átmérője [m]	> 10
térfogata [m <sup>3</sup> ]	1 000 (legnagyobb hazai)
köpeny a falazaton	acél
falazata	≈ 1 m vastag <i>samott</i> , a medence táján <i>grafit</i>
a falazat hűtése	a köpenyt csőkiógyóban folyóvíz hűti

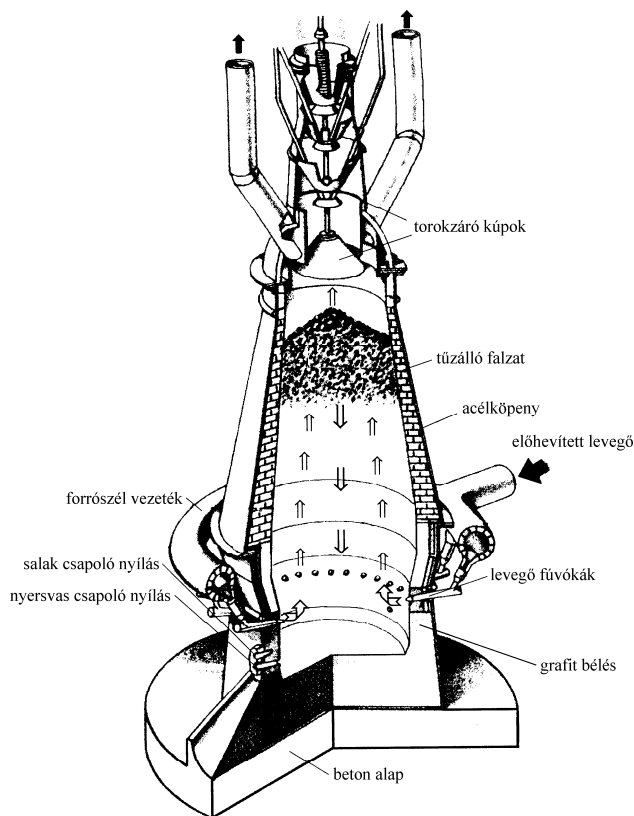
A nagyolvasztó vázlatát a kiegészítő folyamatok berendezéseivel, az érc előkészítéssel, a nyersvas szállítókosccal a 3.3. ábra mutatja be. Magának a nagyolvasztónak a felépítését a 3.4. ábra, metszetének egyszerűsített vázlatát a hőmérsékleti zónákkal a 3.5. ábra mutatja be.

A nagyolvasztó fő részei fentről lefelé haladva:

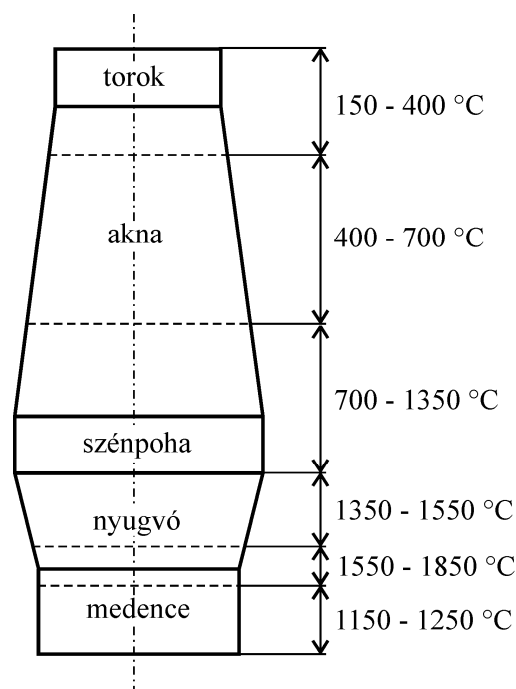
1. torok a torokzárral,
2. akna,
3. szénpocha,
4. nyugvó a légbefúvó rendszerrel,
5. medence a salak és nyersvas csapolónyílással.



3.3. ábra A vasérc kohósításának folyamata



3.4. ábra A nagyolvasztó felépítése



3.5. ábra A nagyolvasztó metszetének vázlat képe és a hőmérsékletzónák

A **torok**, mint a neve is mutatja a nagyolvasztó befogadó nyílása. Itt található a torokzáró és az adagoló, amelynek feladata a kohó belső terét elválasztani az atmoszférikus környezettől, illetve ezen keresztül lehet a nagyolvasztóba adagolni az alapanyagokat. Ugyancsak itt távoznak ellenkező irányba a keletkezett égéstermékek, gázok, az úgynevezett *torokgáz*. A nagyolvasztóba az ércet, kokszot, salakképző anyagokat felváltva, rétegesen viszik be egy puttonyos ferde felhordón. A beborított anyag egy terelőkúpra hullik, ami addig nem engedi a bevitt anyagmennyiséget tovább a kohó belsejébe hullani, míg elő nem melegszik 150-400 °C-ra és el nem veszíti nedvességtartalmát. Egyúttal védi a falazatot a behulló anyag okozta mechanikai hatásoktól.

Továbbhaladva lefelé a nagyolvasztó szélesedő csonka kúp alakú része az **akna**. Ennek magassága általában a medenceátmérő három-négyszerese. Ennek kétharmadáig terjedő szakaszában a hőmérséklet 400-tól 700 °C-ig emelkedik, eltávozik a hidrátvíz, elbomlanak a karbonátok, és már megkezdődik az indirekt redukció.

A nagyolvasztó legnagyobb átmérőjű része az úgynevezett **szénpoha**, magassága 1-2 m. . A kohónak a szénpoha alsó részéig terjedő szakaszában a hőmérséklet 700 °C-ról 1350 °C-ra emelkedik. E szakaszon befejeződik a karbonátok bomlása, megkezdődik a vas- és mangánvegyületek direkt redukciója, valamint az úgynevezett primer salak képződése, valamint a szén oldódása a vasban. A vas, jobban mondva a vas-szén ötvözet olvadása 1200 °C felett szintén megkezdődik.

A szénpoha után egy lefelé szűkülő, csonka kúp alakú része következik a nagyolvasztónak, amit **nyugvónak** neveznek. Ennek az alsó részéig terjedő szakasznak a hőmérséklete 1350-1550 °C. Itt már minden itt található anyag, a koksz kivételével, folyékony állapotban van. Befejeződik a mangán, szilícium

redukciója, így ezek az elemek a vassal ötvöződnek. Bekövetkezik a foszforpentoxid ( $P_2O_5$ ) redukciója és a foszfor a vas szennyezője lesz.

Befejeződik a mangán, szilícium redukciója, így ezek az elemek a vassal ötvöződnek. Bekövetkezik a foszforpentoxid ( $P_2O_5$ ) redukciója és a foszfor a vas szennyezője lesz.

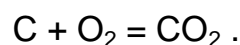
A nyugvó alsó részén történik az előmelegített vagy oxigénnel dúsított levegő befúvása. Ez az **égési** vagy **fúvatási öv**, ami a medence felső részéig tart. A nagyolvasztónak ez a legmelegebb része, itt a hőmérséklet eléri az 1550-1850 °C-ot. Itt ég el a koks. Ezen a zónán átcsepegő vas már kezd újra oxidálódni.

A nagyolvasztó alsó hengeres része a **medence**. Itt gyűlik össze alul az olvadt nyersvas, felette a kisebb sűrűségű salak. A medence felső részén a **forrószél-körvezeték** alatt helyezkedik el a **salakcsapoló nyílás**, míg a medence legmélyebb pontján van a **nyersvascsapoló nyílás**. A medencében a hőmérséklet 1500-1600 °C. Itt a medencében egy bizonyos fokú kéntelenedés is végbemegy a salak jóvoltából. A salak CaO tartalma a vasszulfid (FeS) kéntartalmának egy részével kalciumszulfidot (CaS) képez, amely már nem oldódik a vasban, így a salakban marad. Itt a medencében alakul ki a nyersvas végleges összetétele és attól függően, hogy mennyi szén került oldatba, aszerint alakul az olvadáspontja, ami általában 1150-1250 °C közé esik.

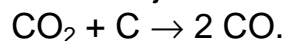
## A nyersvasgyártás metallurgiája

Metallurgiai folyamat alatt a nagyolvasztóban lejátszódó fizikai és kémiai folyamatok összességét értjük.

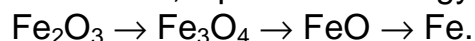
Elsődleges folyamat a vasoxid redukciója. Mint már szó volt róla, redukáló anyag az izzó szén, a redukációs folyamat a **direkt redukció**. A redukációs folyamatban azonban részt vesz a folyamatban keletkező szénmonoxid (CO) is, ami a következő képen keletkezik:



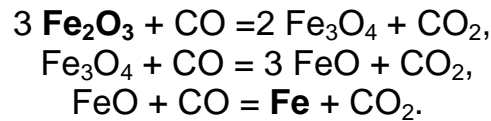
Vagyis a szén széndioxiddá ég el. A fúvatási öv magas hőmérsékletén a széndioxid instabil, az izzó szén redukálja:



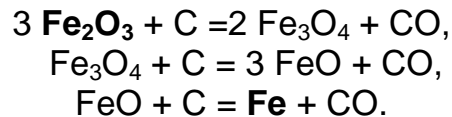
Már a nagyolvasztóban felfelé áramló CO megkezd a vasoxid redukálását, miáltal a felvett oxigénnel alacsonyabb hőmérsékleten stabil  $CO_2$ -dá alakul. Ezt a folyamatot **indirekt redukciónak** nevezik. Mivel a vas vegyületeiben különböző (2, 3, 6) vegyértékekkel szerepel, így különböző oxidokat képez. Ezek redukálása csak fokozatosan, lépésenként megy végbe:



Az aknában felfelé áramló CO már 1000 °C alatt megkezdzi a vasoxid redukálását. Ez az indirekt redukció folyamata:

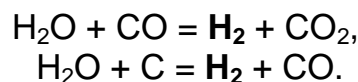


1000 °C felett direkt módon az izzó szén redukál:

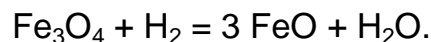


Az így keletkezett CO szintén részt vesz az indirekt redukcióban.

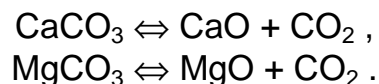
Az aknában más kémiai folyamatok is végbemennek. Például a nagyolvasztóba a koksszal, levegővel bekerült víz is redukálódik indirekt és direkt módon:



A keletkezett H<sub>2</sub> szintén részt vesz az indirekt redukcióban:



Az akna 400-800 °C-os zónájában a salakképző anyagként adagolt mészkő és dolomit disszociál:



A befúvot levegő mintegy háromnegyed része nitrogén (N), amely semleges gáz. Nem vesz részt a vegyi folyamatokban. Szerepe csak annyi, hogy fizikai hőtartalmát átadja a kohó különböző anyagainak.

A salakképző anyagok szintén részt vesznek a vegyi folyamatokban.

A salakképző anyagok alkalmazásával lehet:

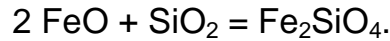
- olvadáspontot,
- vasveszteséget,
- szennyezőtartalmat csökkenteni.

A mészkőből és dolomitból disszociációja után, kalcium- és magnéziumoxid keletkezik, amelyek bázikus kémhatásúak és olvadáspontjuk igen magas (CaO → 2600 °C, MgO → 2900 °C), ezért szilárd állapotban maradnak.

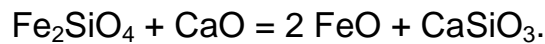
Bár az ércből koncentrátumot állítanak elő, ennek ellenére jelentős egyéb ásvány kerül a nagyolvasztóba. Ezek közül legjelentősebb az ércel és a

koksszal 3-10%-ban bekerülő szilíciumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ), ami savas kémhatású és magas olvadáspontú ( $1750\text{ }^\circ\text{C}$ ).

A savas szilíciumdioxid és a bázikus vasoxid komplex szilikát vegyületet alkotnak:



A keletkezett primer salak olvadáspontja csupán  $1230\text{ }^\circ\text{C}$ . Ebbe a komplex anyagba ágyazódott, erősen bázikus (és meg nem olvadt) salakképzők helyettesítik a folyamatban a gyengén bázikus  $\text{FeO}$ -t:



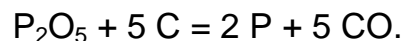
Ahhoz, hogy a nyersvasgyártás során alacsony olvadáspontú salak képződjön, amely csak jelentéktelen mennyiségű vasoxidot köt meg, a szilíciumoxid mennyiségétől függően kell adagolni a kalcium- és magnéziumoxidot:

$$\frac{\text{SiO}_2}{\text{CaO, MgO}} = 1,5 - 2.$$

Mivel a szükséges  $\text{CaO}$  és  $\text{MgO}$  mennyiséget mézskő és dolomit adagolásával biztosítják, ezekből a  $\text{SiO}_2$  mennyiségnek három-négyszeresére van szükség. Az egy tonna nyersvasra számítható salakmennyiség  $300\text{-}600\text{ kg}$ .

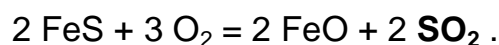
Az égési övezetben a redukálódott szilícium, mangán és a jelenlévő szén oldódik a vasban. Az így létrejött ötvözet olvadáspontja (főleg a szén oldódása következtében), jelentősen csökken. A kezdetben szilárd vasban meginduló diffúziós folyamat, a megolvadt ötvözetben lényegesen felgyorsul. Így a vas a benne oldott anyagokkal átcsorog az olvasztó e részén lévő szilárd állapotú anyagon, valamint a salaktakarón és összegyűlik a medencében.

A bemutatott kémiai folyamatok során a kokszból, ércből bekerült foszfor (P) mennyisége nem csökken, teljes egészében a nyersvasba redukálódik:

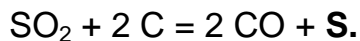


A foszfor az ötvözetben káros, annak **szennyezője**.

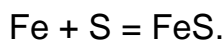
A vas-szén ötvözetek másik szennyezője a kén (S). A foszforhoz hasonló módon, de főleg a koksz  $\text{FeS}$  tartalmával kerül a nagyolvasztóba. Ennek egy jelentős része oxidálódik:



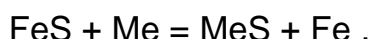
*A keletkezett kéndioxid a kohóban az izzó szénen keresztül felfelé áramlik. Ennek során redukálódik és gőz állapotú kén válik ki:*



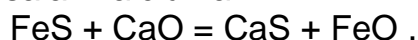
A kén a vassal ismét vegyül:



A fenti egyenletek magyarázzák azt, hogy a nyersvas kéntartalma kiégetéssel (oxidációval) miért nem csökkenthető érdemlegesen. A kéntartalom csökkentése csak olyan, a vasnál a kénhez nagyobb affinitású elemmel lehetséges (Me), amely el tudja vonni a ként a vasszulfidból, és a kénnel a vasban nem oldódó vegyületet képez. A folyamatot leíró általános egyenlet:



Az **Me** jel csupán egy szimbólum, a kénhez a vasnál nagyobb affinitást mutató valamely elemet jelöl, amelynek oxidja nem gáz halmazállapotú a gyártás hőfokán. Ilyen elem, pl. a salak kalciuma:



A kalciumszulfidot a vas már nem tudja oldani, így az a salakba kerül.

### 3.5.1.3 A nyersvasgyártási folyamat termékei

A nagyolvasztóba bevitt alapanyagokból a segédanyagok felhasználásával a metallurgiai folyamatok során előállított fő termék a **nyersvas**. További termék a nagyolvasztót a torkon keresztül elhagyó úgynevezett **torokgáz**, valamint a nyersvas felületéről lecsapolt **kohósalak**.

A **nyersvas** nem tiszta vas, hanem a vasnak és szénnek ötvözete. Széntartalma viszonylag magas, elvileg 2,06 - 6,67 %, de ma a gyakorlatban általában 3,5-4,5 % közé esik. A szénen kívül mindig tartalmaz több-kevesebb mangánt, szilíciumot, esetleg más fémeket (Cu, Ti), oxidokat tized, század százalék mennyiségben. A kén és a foszfor, mint szennyező elem van jelen. Ezek mennyiségét a nyersvas jó minősége érdekében minél alacsonyabb szinten kell tartani.

A medencéből az 1300-1400 °C hőmérsékletű folyékony nyersvasat csapolnak **4-8 óránként**.

A nyersvas felhasználásának két módja van:

- általában az acélgyártás alapanyaga,
- felhasználható öntészeti célra.

A világon termelt nyersvas mennyiségének mintegy 80-90 %-át acéllá dolgozzák fel (fehér nyersvas).

A fennmaradó 10-20 %-ot öntés útján használják fel (szürke nyersvas). A két nyersvas típus lényegében azonos, inkább csak szilícium és foszfortartalmában tér el egymástól (3.8. táblázat).

3.8. táblázat A nyersvas összetétele

A nyersvas fajtája	Felhasználása	Összetétel (%)					
		C	Si	Mn	S	P	Oxidok
Fehér nyersvas (cementites)	az acélgyártás alapanyaga	3,8-4,5	0,6-1,3	0,5-1,5	0,02-0,07	0,1-0,25	0,1-0,5
Szürke nyersvas (grafitos)	öntészeti célra	3,5-4,5	0,8-3,6	0,5-1,5	0,02-0,06	0,1-1,2	0,1-0,5

A **fehér nyersvas** levegőn hűlve a metastabilis rendszer szerint kristályosodik, így a szénvegyület formában tartalmazza, tehát cementites. A cementit rideggé, keménnyé teszi, törete a cementit fémes fénye miatt fehér. Csak acéllá *finomítva* használható fel.

A **szürke nyersvas** a benne, nagyobb arányban lévő grafitképző elem, a szilícium hatására a stabilis rendszer szerint kristályosodik. Az ötvözet a szén lemezes grafit zárványok formájában tartalmazza. Ezért törete grafit-szürke lesz. Anyaga elég szívós, bár szilárdsága a grafitzárványok miatt nem nagy. Öntvények anyagaként felhasználható.

Egy tonna nyersvas előállításához szükséges anyagféleségek mennyiségét a 23.9. táblázat tartalmazza.

3.9. táblázat A nyersvasgyártás anyagai

A nyersvasgyártás anyagai (1tonna nyersvasra számítva [t])	
Érckoncentrátum	1,8-2,0
Koksz	0,4-0,5
Salakképző anyagok	0,1-0,2
Levegő	2,0-2,5
Víz	40-60

A nagyolvasztó fő terméke a nyersvas mellett, melléktermékek is keletkeznek. Ilyen a **torokgáz**. Nevét onnan kapta, hogy a nagyolvasztóban keletkező gázok felfelé áramlásuk során a torok zárószervezetén keresztül távoznak a kohóból. Hőmérséklete 200-300 °C, esetenként még magasabb. Összetevői a befűvott levegő nitrogéntartalma (55-65 %), a koksz égéséből származó szénmonoxid (CO – 20-25 %) és széndioxid (10-14 %), hidrogén (3-4 %) és vízgőz. A gáz hőtartalma, például a léghevítők fűtésére jól felhasználható, de helyben el is égethető. Bár fűtőértéke nem túl nagy, 2,7-3,6 MJ/m<sup>3</sup>, de nagy mennyiségben áll rendelkezésre (1300-2000 m<sup>3</sup>/t nyersvas). A nagyolvasztóból távozó gáz még szilárd részeket is ragad magával, amitől meg kell tisztítani. Erre különféle porleválasztókat használnak. A leválasztott



pornak nagy a fémtartalma, ezért visszaviszik az érckoncentrátum gyártási folyamatába.

A nyersvasgyártásnak szintén értékes mellékterméke a **salak**. Felhasználható építőipari célokra salaktégla gyártásához, betonkészítésre, öntött állapotban útépitésre, talpfák ágyazására, salakgyapotként hő- és hangszigetelésre stb.

### 3.5.2 Acélgyártás

Az ércek kohósítása, fémek előállítása során nem lehet tiszta fém, *színfém* előállítani, mivel a kapott termék, függetlenül az alkalmazott eljárástól, tartalmaz még egyéb, úgynevezett kísérő fémeket. Ezek hatással vannak a fém tulajdonságaira. Ha a hatás negatív, káros tulajdonságokat kölcsönöz a fémnek, a kísérő fém **szennyező** elemnek hívjuk. Más fémek nem eleve károsak, csupán mennyiségük nem megfelelő, például túl sok van belőlük a fémekben, míg máskor a szükséges elemek hiányoznak vagy mennyiségük kicsi. Ezért a kohósítási folyamat termékét mindig finomítani kell. Mint az előzőekben látható volt, a nagyolvasztóból kikerült nyersvas a vason kívül viszonylag sok szenet, szilíciumot, mangánt, különféle oxidokat, valamint a szennyezőket, ként és foszfort tartalmaz. **Azt a finomító eljárást, amelynek során a nyersvasból 2,06 %-nál kisebb széntartalmú vas-szén ötvözetet állítanak elő, és egyúttal csökkentik az egyéb kísérő elemek, oxidok mennyiségét is, esetleg a tulajdonságok javítása céljából ötvözőkkel látják el a megfelelő arányban, acélgyártásnak nevezik.**

Ebben az eljárásban lehet újrahasznosítani a használatból már kikerült vashulladékot is. Az acélgyártás alapvető vegyi folyamata a nyersvasban lévő **szén mennyiségének csökkentése annak oxidációjával, kiégetésével**. A folyamatot nevezik **frissítésnek** is. Az eljárás szokásos módja, hogy iparilag előállított oxigén vagy a levegő oxigénje segítségével a nyersvas széntartalmának egy részét kiégetik. A keletkezett széndioxid gáznemű anyag révén, buborékok formájában távozik a rendszerből, más nem oldható oxidok a fémfürdő felszínét borító folyékony salakba kerülnek, majd azzal eltávolíthatók.

\*

A vasat és ötvözeit az ember viszonylag későn kezdte felhasználni. Ennek oka elsősorban az volt, hogy az olvasztáshoz, ércredukcióhoz nagyon magas, 1500 °C körüli hevítésre van szükség, ami fa elégetésével nem érhető el. Csak a szén megismerése, illetve a faszén előállítása és felhasználása útján tudott az ókor, és még a középkor embere is úgynevezett **forrasztott-acélt** előállítani. Az előállítás során a vascseppek a szénrétegen átcsurogva oldották a kARBONT. A kemence alján a salakban összegyűlt acél a porózus szerkezetű, úgynevezett **vasszivacs** volt. Ebből jó minőségű szerszámot, fegyvert előállítani csak hosszadalmas, kitartó munkával és hozzáértéssel lehetett. Többszöri átkovácsolás során a pórusokból a salak kipergett, a vasrészecskék összehegedtek, finomabb szemcsézetű lett. Így igen nagy munka árán, akár „damaszkuszi” pengék is készülhettek. A hosszadalmas és

nagy tapasztalatot igénylő munka miatt, az acéleszközök vagyont érők voltak. Technikai fejlesztések sora kellett ahhoz, hogy a vas ötvözeteinek használata elterjedjen, széleskörűvé váljon. Megváltozott a kemencék konstrukciója, nagyobb térfogatú kohókat építettek. Nem bízták a szélre a légbefúvást, hanem vízkerékkel hajtott fújtatókat kezdtek használni. Az intenzívebb égéssel jelentősen megnőtt a kohóban a hőmérséklet. Felhasználták a vízkereket érc aprítására, sőt az acél kovácsolásához is. Már a középkorban rájöttek arra, hogy a kohó falzatának anyaga befolyásolja a nyersvas minőségét. A mészke és a szilikátos meddő kémiai reakciója hígabb és alacsonyabb olvadáspontú salakot eredményez. A salakképzők adagolásával jutottak el a korszerűnek mondható technológiákhoz. Ezzel önthető ötvözetet lehetett már előállítani, ami olcsóbbá, így elérhetőbbé tette az öntöttvas tárgyakat. Azok széles körben elterjedhettek. Használatukat azonban korlátozta, hogy ez az anyag rideg. Az acélból készült eszközök viszont továbbra is drágák maradtak. Ahhoz, hogy a jó szilárdsági tulajdonságú, szívós acél használata széles körben elterjedhessen, meg kellett oldani a nyersvas szénttartalmának hatásos csökkentését, a frissítést. A 16-18. századtól többféle eljárás, próbálkozás vezetett el a mai korszerű acélgyártási eljárásokhoz.

Előbb azt a módszert alkalmazták, hogy a faszén összekeverték a nyersvassal és így töltötték a kemencébe. A faszén újraolvasztotta a nyersvasat és egyúttal a levegő oxigéntartalma a nyersvas szénttartalmának jó részét kiégette. Ez a **frisztűzi** eljárás azonban nem tudta kielégíteni a növekvő igényeket.

Faszén helyett a kőszén alkalmazása nehézségeket vetett fel. Ha ugyanis a szennyezőket tartalmazó kőszénnel a nyersvas közvetlenül érintkezik, az, az acél minőségét nagyon lerontja. Ezt elkerülendő *Henry Cort* 1784-ben egy új eljárást alkalmazott. Módszerénél a kőszén nem közvetlenül érintkezik a nyersvassal. A kőszén egy rostélyon légfeszítéssel elégetik és az így keletkezett forró, oxigéndús füstgázt áramoltatják a folyékony nyersvas felszínén. A nyersvas egy tűzálló béléssel ellátott sekély medencében, az úgynevezett **lángkemencében** található. A felszínén áramló füstgázok hője megolvasztja a betétet, oxigéntartalma pedig kiégeti a szénttartalmának jó részét. A folyamat intenzitásának fokozása érdekében az ömledéket egy vasrúddal kavarták (felszínét mozgásban tartották). Így intenzívebben érintkezett a levegő oxigénjével. A szénttartalom csökkenésével az ötvözet olvadáspontja emelkedik (mint ezt a vas-szén állapotábránál bemutattuk), részben az acél kristályosodni kezd. Az egyre sűrűbb ömledéket egyre nehezebb kavarni. Az így gyártott acélt *kavartacélnak*, az eljárást **kavaró eljárásnak** nevezték.

Ezek az eljárások és az általuk nyert tapasztalatok vezettek el az 1800-as évek közepére az igazán termelékeny, gazdaságos és egyre jobb minőségű acél gyártására alkalmas új nagyipari acélgyártási eljárások kialakulásához és elterjedéséhez. Ilyen a *Bessemer*, *Thomas*, *Siemens-Martin*, *LD* eljárások, az *elektroacélgyártási eljárások* és még egyéb újabban kifejlesztett módszerek.

\*

Attól függően, hogy milyen berendezésben, milyen módon oxidálják a szenet, a különböző korok technikai színvonalán különféle módszerei alakultak ki az ipari körülmények között folyó acélgyártásnak. Az acélgyártás fejlődése során készítettek szilárd nyersvasból szilárd halmazállapotú acélt, folyékony nyersvasból folyékony acélt (itt az ősi, technikai forradalom előtti eljárásokkal nem, csak a nagyipari eljárásokkal foglalkozunk). Jelenleg folyékony nyersvasból folyékony halmazállapotú acélt gyártanak, ezért az eljárást **folytácél gyártó eljárásnak** is nevezik. A folyékony állapot fenntartásához szükséges hőmennyiséget vagy az oxidáció hője vagy külső hőenergia bevitele fedezi.

Ha a szén kiegészéséhez szükséges oxigénmennyiséget a befúvott levegőből biztosítják, az eljárást **szélfrissítéses acélgyártásnak** nevezik.

### 3.5.2.1 Az acélgyártás anyagai

Az acélgyártáshoz szükséges anyagok két csoportba sorolhatók: a *betétanyagok* és a *tüzelőanyagok* csoportjára. A **betétanyagokhoz** soroljuk:

- a fémbetétet (nyersvas, hulladék vas),
- az ötvöző anyagokat,
- a frissítő anyagokat.

A **fémbetétet** a folyékony nyersvas és a szilárd vashulladék képezi. Ennek összetétele alapvetően befolyásolja az acélgyártás folyamatát. Fontos, hogy kén és foszfortartalma minél kisebb legyen. A hulladék vas kisebb széntartalma hígítja a nyersvasfürdő széntartalmát, a felületén lévő vasoxidok (rozsdá) oxigénje részt vesz a szén oxidációjában.

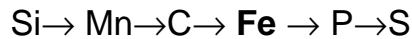
**Ötvöző anyagként** olyan elemeket használnak, amelyek kedvező módon megváltoztatják az acél tulajdonságait. Ezeket általában nem közvetlenül adagolják a fémfürdőbe, hanem ívkemencében, magas hőmérsékleten előbb előötvözeteket, úgynevezett ferroötvözeteket állítanak elő, amelyek könnyebben oldódnak az acélban. Az ötvözők sokfélék lehetnek, amelyeket később részletesebben ismertetünk. Az ötvözés módját az egyes ötvöző anyagok tulajdonsága szabja meg.

**Frissítő** anyagnak azokat nevezzük, amelyek az acélgyártási folyamat során a szén oxidációját segítik elő azáltal, hogy a fémfürdőbe plusz oxigént visznek be. Ilyen anyag lehet a *vasérc*, a *reve* (a *reve* magas hőmérsékleten, például meleghengergépnél keletkezett, szürke színű vasoxid). Bár a *reve* olcsóbb frissítő anyag, mint az *érc*, magas kén tartalma miatt önmagában nem alkalmazzák.

A **salakképző anyagok** szerepe összetett, részben hasonló a nyersvasgyártásnál már megismertekhez. Használnak mészkövet, égetett meszet, de kvarchomokot ( $\text{SiO}_2$ ), folyópátot ( $\text{CaF}_2$ ), bauxitot, samottot is. Az utóbbi három, mint *folyósítószer* a salak megfelelő viszkozitását biztosítja a benne lezajló diffúziós folyamatok gyorsítása érdekében.

### 3.5.2.2 Az acélgártás alapvető metallurgiai folyamata

A nyersvasban előforduló elemek affinitása az oxigénhez eltérő. Mértéke néhány elem esetén a következők szerint alakul a csökkenés sorrendjében:



Mindebből a következő megállapításokat lehet tenni:

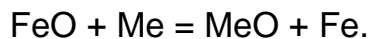
1. Az oxidációs folyamat a szilícium, mangán kiégésével kezdődik.
2. A szén oxidációja csak ezek után következik be.
3. Affinitását tekintve a vas a szén után következik, de nem esik tőle messze, ezért az oxidációs folyamat vége felé már a vas újraoxidációja is bekövetkezik és valamennyi mennyiségű FeO is keletkezik. A szennyezők (P, S) viszont nem égethetők ki, mivel a sorban a vas után állnak, így a vas előbb oxidálódik. Ezek mennyiségét csak más módon lehet csökkenteni, például bázikus salakban való megkötéssel.

A metallurgiai folyamat **első szakasza a frissítés** (oxidáció), amelynek során a szén egy része kiég:



A CO<sub>2</sub> és CO gázok eltávoznak a fémfürdőből.

A folyamat **második szakasza a dezoxidálás**, ami a keletkezett FeO elbontását jelenti olyan dezoxidáló szerrel, melynek nagyobb az affinitása az oxigénhez, mint a vasnak és oxidja nem légnemű. A dezoxidálás általános egyenlete, ha a dezoxidáló elemet Me-vel jelöljük:



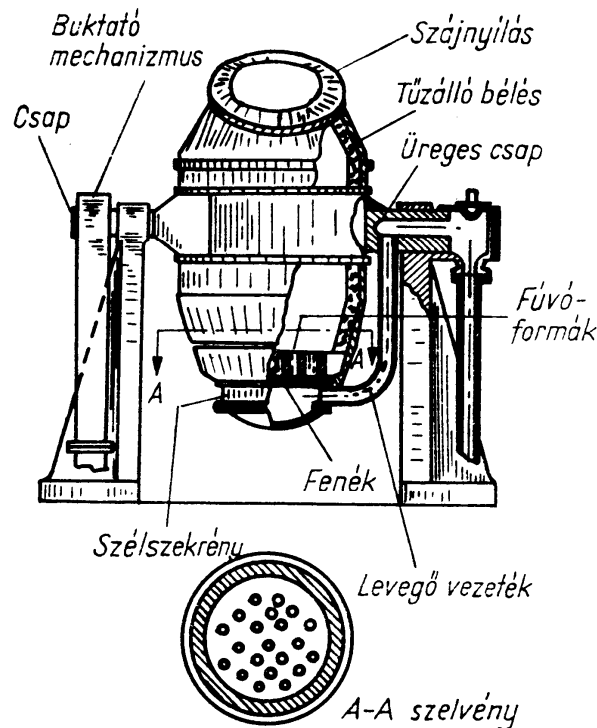
**Me** lehet a Mn, Si, Al, V, Ti, Zr ferroötvözetei.

**Harmadik szakasznak** az ötvözés tekinthető. Azt hogy az acélgártás melyik fázisában kerül rá sor az ötvöző tulajdonságaitól függ.

### 3.5.2.3 A hagyományos konverteres acélgártási eljárások

A konverterben történő szélfrissítéses eljárást 1856-ban alkalmazta **Henry Bessemer**, amelynek során egy körte alakú, billenthető, savas kémhatású hőszigetelő anyaggal bélelt, acélköpennyel ellátott kemencét, úgynevezett **konvertert** fejlesztett ki (3.6. ábra). A konverterbe öntötték a folyékony nyersvasat. A konverter alján lévő fúvókákon át befúvott levegő buborékjai átáramlanak a fémfürdőn, és a levegő oxigéntartalma oxidálta a nyersvas széntartalmát az előre meghatározott mértékben. A folyamat során oxidálódik a nyersvas mangán és szilíciumtartalma is. A berendezésben egy adag kikészítési ideje a korábbi eljárásokhoz képest közel század részére csökkent,

ezzel mintegy forradalmasítva az acélgyártást. Átala az acélgyártás tömegszerűvé és olcsóvá vált.



3.6. ábra A Bessemer-konverter vázlata

Az eljárás további előnye, hogy nincs szükség fűtőanyagra. A fémfürdő folyékony állapotban tartásához az oxidáció hője elegendő. 1% szilícium kiegészése a fémfürdő hőmérsékletét 200 °C-kal emeli. A túlhevülés elkerülése érdekében vashulladékot adagoltak a konverterbe mintegy 12-15%-ban. A Bessemer-eljárás során az acélgyártás fázisai a következők voltak:

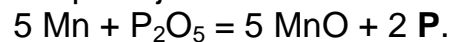
- a szilícium oxidációja,
- dekarbonizáció (a frissítés 8-20 min),
- dezoxidálás (A viszonylag sok FeO miatt szükséges. Ferroötvezetekkel kicsapatásos dezoxidációt alkalmaztak.)

Az eljárásnak előnye a nagy teljesítmény, 24 óra alatt 900-1000 tonna. Előnyös volt az is, hogy az eljárás nem igényelt külön fűtőanyagot.

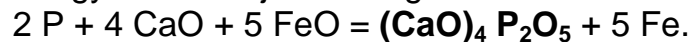
Az eljárás hátrányos sajátosságai:

- a savas kémhatású bélés miatt a foszfor és a kén mennyisége nem csökkenthető, ezért csak kis foszfor és kén tartalmú nyersvas használható a konverterben,
- mivel az adag kikészítési ideje kicsi, kevés idő áll rendelkezésre a beavatkozáshoz a megfelelő összetétel beállításához,
- szélfrissítés miatt a levegő nitrogénjének oldódása miatt az acél, öregedésre hajlamos lesz.

A konverteres acélgyártás továbbfejlesztését jelentette a **Thomas**-féle eljárás bevezetése. A Thomas eljárás, bár több változata is kialakult, lényegében megfelelt a Bessemer-eljárásnak. A berendezés annyiban változott, hogy a savas bélést **bázikus** kémhatású bélésanyagra (ez lehetett mészkő) cserélték és égetett meszet adagoltak a konverterbe, ami lehetővé tette az acél ridegedését okozó foszfortartalom csökkentését. A konverterben tehát ezzel az eljárással a nagyobb foszfortartalmú nyersvas is feldolgozható volt. A berendezésben a foszfor elégethető foszfor-pentoxiddá ( $P_2O_5$ ), de közben a vas oxidációja is megkezdődik. Gondot az okoz, hogy a salakból a szabad foszfor-pentoxidot számos, a nyersvasban lévő stabilabb oxidképző elem, mint a mangán, szilícium, szén képes újra redukálni:



A foszfor eltávolítása csak úgy oldható meg, ha a foszfor-pentoxidot a salakban komplex vegyület formájában megkötik:



A reakcióegyenletről látható, hogy a foszfortalanításra a frissítés utolsó fázisában kerülhet sor, amikor rendelkezésre áll a megfelelő mennyiségű szabad FeO és CaO.

Ennél az eljárásnál egy adag kikészítési ideje 3-5 perccel volt több, mint a Bessemer eljárásnál, de kis foszfortartalmú acél előállítására volt alkalmas.

Ezzel együtt, valamennyi légfrissítést alkalmazó eljárás hátránya a magas oldott nitrogéntartalom. A befúvott levegőnek mintegy háromnegyed része  $N_2$ . Ennek egy része oldódik az acélban. A nitrogén oldott állapotában még nem okoz különösebb gondot, de egy idő után (már a kész alkatrészben) kiválásos folyamat során a nitrogén **vasnitrid** vegyületet képez az acélban ( $Fe_2N$ ,  $Fe_4N$ ). A vasnitrid igen kemény rideg anyag, így idővel az acél ridegedéséhez vezet. A folyamatot az **acél öregedésének** nevezzük. Az ilyen acél hajlamos a *ridegtörésre*. Olyan acélszerkezetekhez, amelyeknél követelmény az öregedés-állóság, pl. hegesztett szerkezetekhez nem használhatók.

Ezeknél az eljárásoknál a hulladék vas felhasználása is korlátozott, 20 % alatt van. Ez a növekvő felhasználás és hulladékképződés miatt szintén gondot okozott.

A konverteres eljárás termelékenységére ellenére, korábbi formájában nem felelt meg a fejlődő ipari elvárásoknak. Bár a nitrogén oldódásának csökkentésére a frissítés utolsó fázisában széndioxid-oxigén, illetve vízgőz-oxigén keverékkel helyettesítették a levegőt, a kérdést nem tudták megoldani.

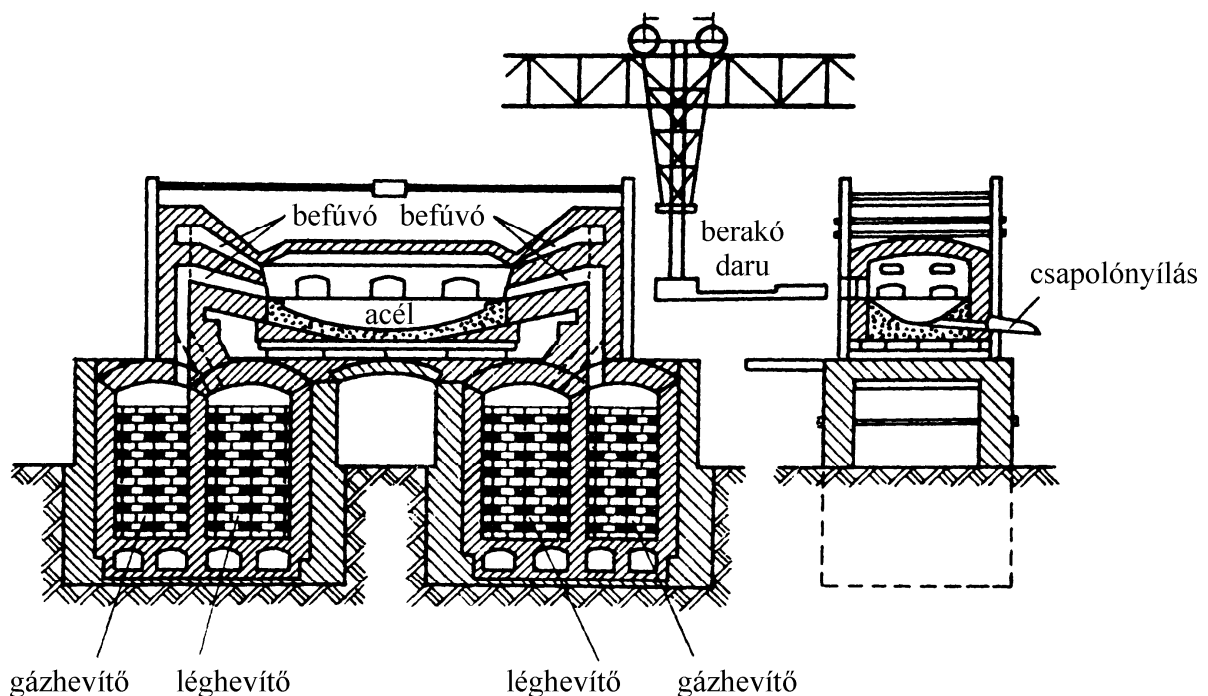
Követelmény lett az öregedés-állóság, a ridegtöréssel szembeni ellenállása az acéloknak, mivel teret hódítottak a hegesztett szerkezetek. Olyan eljárásra volt szükség, amely képes volt nagy tömegben, gazdaságosan jó minőségű acélt előállítani.

#### 3.5.2.4 Siemens – Martin eljárás

Az első, légfrissítést alkalmazó eljárásokkal gyártott, öregedésre hajlamos acélokat a **Siemens-Martin** acélok szorították ki a piacról. Az eljárás lényege,

hogy nagyméretű, sekély lángkemencében a folyékony nyersvas, illetve vashulladék felett áramoltatott égő gáz és forró levegő keveréke biztosította a megfelelő hőmérsékletet, valamint a szén kiegészéséhez szükséges oxigén mennyiséget (3.7. ábra). Mivel azonban a gázok csak a fémfürdő felszínével érintkeztek, nem oldódhattak benne. A gazdaságos acélgyártás, a termelt hő jó kihasználása érdekében a Siemens-Martin kemence alatt nagy, hőálló téglából épített két-két hőcserélő kamrát alakítottak ki, a kemencét pedig, váltakozó lángjárására készítették. Ez azt jelentette, hogy az eltávozó forró füstgázokat az egyik oldalon fekvő kamrákon át vezették el, amelyek rácsozata így 900-1100 °C-ra felforrósodtak. Az így előmelegített kamrákon átvezetett levegő, illetve fűtőgáz került a kemence égésterébe. Az égéstermékeket azután a másik két kamrán keresztül elvezetve, azok váltak alkalmassá a gázok előmelegítésére. A kemencetér hőmérséklete 1650-1700 °C volt.

Az eljárás minőségi acél gyártására és nagy arányú ócskavas feldolgozására alkalmas. Az adagidő hosszú, mintegy 4-10 óra, tehát a konverteres acélgyártáshoz képest lényegesen



3.7. ábra A Siemens-Martin kemence vázlata

nagyobb, de így van idő mintavételre, a pontos összetétel beállításra. Egy adag nagysága nagy, 30-500 tonna. Az eljárás hátránya, hogy a keletkező füstgázok miatt környezetszennyező.

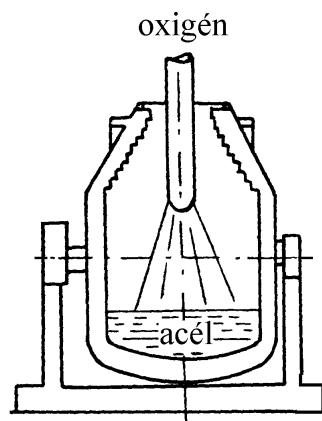
### 3.5.2.5 Oxigénbefúvásos konverteres eljárások

A konverteres acélgyártási eljárást a műszaki fejlődésnek megfelelően, az 1950-es évek elejére sikerült a kor kívánalmainak megfelelően átalakítani, és

alkalmassá tenni öregedésálló acél gyártására. Ezt azzal érték el, hogy nem levegővel, hanem tiszta oxigénnel végzik a frissítést, ezzel kizárva a nitrogén oldódásának lehetőségét az acélban (3.8. ábra).

1950 óta hódított teret az oxigénbefúvással működő konverteres eljárás, amelyet a kifejlesztő ausztriai Linz-Donawitz acélműről **LD eljárásnak** neveztek el. A módszer az *alap- és minőségi acél* gyártásának alapvető formájává vált.

Az zárt fenékrészű LD konvertert folyékony nyersvassal, szilárd acélhulladékkal (3:1 arányban), adalék anyagokkal (például égetett mésszel) töltik fel. Az oxigént a függőleges helyzetbe állított konverterbe egy vízzel hűtött acélcsövön, az úgynevezett oxigénlándzsán keresztül fúvatják a nyersvas felületére mintegy 1,0-1,2 MPa nyomással. A befúvás környezetében a hőmérséklet 2500-3000 °C-ra emelkedik, a gáz fúvatási sebessége meghaladja a hangsebességet. Az oxidációs folyamat megindulásával gázok képződnek. A fémfurdóban a hőmérséklet-, sűrűség-, koncentrációkülönbség, a gázképződés és a befúvott oxigén kinetikai energiájának hatására a nyersvas körbe áramlik a konverterben, ezzel is elősegítve a vegyi reakciók intenzív lefolyását. Az égetett mész a már korábban ismertetett módon, salakba viszi a szennyezőket. A furdó túlhevülése további hulladék vas adagolásával oldható meg. Az acél minőségének javítására a frissítés végén vagy csapoláskor az olvadt acélba ötvözőket adagolnak. A ma használatos konverterek befogadó képessége széles határok között változik (5-300 tonna). Ennek megfelelően az adag kikészítési ideje is változó 15 és 60 perc között van. A kis adagidő miatt kevés idő áll rendelkezésre az összetétel szabályozására. Az adagidőn belül a fúvatási idő kevesebb, mint 30 perc. A folyamat során fellépő habzás következtében a fémkihozatal 88-90%. Az acél széntartalma 0,02-1,0% közötti, az összes ötvözők mennyisége 6 % alatt van.



3.8. ábra Az LD konverter vázlata

Az LD eljárással előállított acélok gázszegények, különösen tiszták, szívósak. Kiválóan felhasználhatók hengerelt és húzott termékek, hidegen alakított alkatrészek gyártására.



A konverteres acélgyártásnak is számos változata alakult ki az idők folyamán a még gazdaságosabb és jobb minőségű acél előállítása érdekében. Az úgynevezett OBM változatnál alsó befúvással a konverter alján lévő lyukakon keresztül, mészporral kevert oxigént fúvatnak át a fémfürdőn.

Különösen alacsony szén- és kéntartalmú acél előállítására alkalmas az **AOD** (Argon-Oxigén-Decarburisations-Process) eljárás, amelynél a konverter aljának közelében fúvatják be a gázkeveréket a folyékony nyersvasba.

További változat az **injektáló eljárás**. Ennek során az ömledékbe argon öblítőgázzal por alakú reakcióanyagot fújnak be a folyékony nyersvasba. A módszer egyik változata TN eljárás (*Thyssen-Niederrheim*).

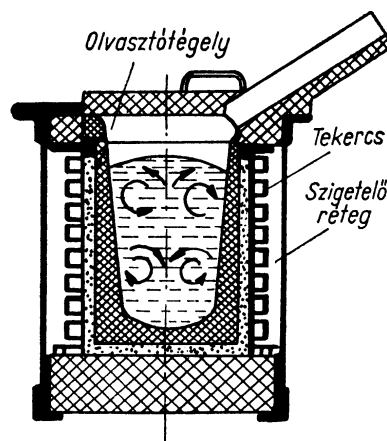
### 3.5.2.6 Elektroacélgyártás

Az elektromos áram energiáját is felhasználják acélgyártáshoz. A külső energia felhasználása lehetővé teszi szilárd betétanyag felhasználását. Ezért akár 100 % hulladék vas feldolgozására is alkalmas. Üzeme nagyon tiszta. Az elektromos áram hővé alakítása a kemencében különböző módon történhet:

- ellenállás-fűtéssel,
- elektromos ívvel,
- indukció útján.

Az acélgyártás szempontjából a két utóbbinak van nagyobb jelentősége.

A váltóáram indukciós hatását fel lehet használni acél előállítására. Az **indukciós kemencében** gondosan válogatott, különlegesen tiszta betétanyag átolvasztását lehet elvégezni oly módon, hogy a kemencét körülvevő indukciós tekercsben folyó nagyfrekvenciás váltóáram a fémbetétben feszültséget indukál (3.9. ábra). Ennek hatására a fémbetétben örvényáramok keletkeznek, amelyek az anyagban felemésztődnek, hővé alakulnak. A betétanyag átolvasztása nagyon gyorsan végbemegy. Mivel a salak nem vezető, így benne nem indukálódik feszültség, azt csak a fémfürdő melegíti. Elnyúl minden más eljárástól, itt a salaknak nincs metallurgiai szerepe, csupán a fémfürdő felületét védi az oxidációtól és megköti a dezoxidációs termékeket.



3.9. ábra Indukciós kemence vázlata

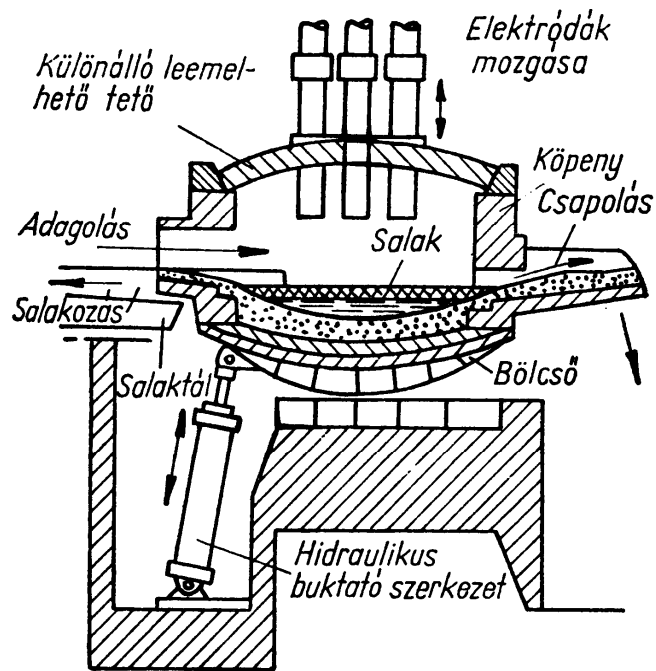
A változó elektromágneses térben a fémfürdő állandó mozgásban van, ami elősegíti a koncentráció és hőmérsékleti különbségek kiegyenlítését. Az indukciós kemence igen alkalmas kis szénttartalmú, sok ötvözőt tartalmazó, különleges acélok gyártására, amelyenek a korrózióálló, saválló, hőálló acélok. Az ötvözés során nincs kiégés, az ötvöző elemek oldódása 100 %-os lehet. Egy adag kikészítésének ideje 2,0 - 2,5 óra, a kemence befogadó képessége legfeljebb 30 tonna.

Az elektroacélok gyártásának fő eszköze az **ívkemence**, ami egy henger alakú, belül tűzálló falazattal ellátott, kívül acél köpennyel borított kemence. Fenékrésze egy homorú medence, a boltozata szintén tűzálló téglából készült szerkezet, amely leemelhető vagy elfordítható az acélhulladék könnyebb berakása érdekében (3.10. ábra). Az ívkemence fontosabb adatait a 3.10. táblázat foglalja össze.

3.10. táblázat Az ívkemencék fontosabb adatai

<b>Az ívkemence jellemzői</b>	
Befogadóképesség [t]	50-250
Feszültség (három fázisú) [V]	220-750
Áramerősség [kA]	20-200
A kemence villamos teljesítmény [MW]	10-200
Az előállítás energiaigénye [GJ/t]	0,7-0,9
Elektródok elhelyezése egymáshoz képest	120 °
Elektródok átmérője [mm]	200-600
Elektródok anyaga	grafit
Betétanyag (általában)	szilárd
Adagidő [óra]	1,0-2,0

Az ívkemencék betétanyaga leginkább szilárd. Az acélgyártási folyamat indításakor az áram a három különböző fázisra kötött, függőleges tengelyének irányában mozgatható grafitelektróda között a betétanyagon keresztül folyik. A nagy átmeneti ellenállások miatt keletkező nagy hő megolvasztja a fémbetétet és salakot, sőt egy részét el is gőzölteti.



3.10 ábra Ívkemence vázlata

A betét megolvadása után az elektródok nem merülnek a fémfürdőbe, hanem az elgőzölgött anyag ionjai lehetővé teszik ív képződését. Az áramkör a továbbiakban, a kemence normál üzemének kialakulása után, az elektródok és a fémfürdő, valamint az elektródok között fellépő íven át zárul. Az elektromos energia nagy része az ívben alakul át hővé (az ív hőmérséklete a 15 000 °C-ot is eléri). A magas hőmérsékleten a levegő alkotói és más gázok is a termikus disszociáció miatt atomos állapotba kerülnek.

Az ívkemencében használt betétanyag főleg acélhulladék, szilárd, esetleg folyékony nyersvas. A gyártott acél minősége érdekében csak gondosan válogatott hulladékot célszerű felhasználni.

Berakás során a kemencébe a szilárd betétanyag alá kénmentes égetett meszet raknak, mint legfontosabb salakképző anyagot. Mennyisége általában 10-20 kg egy tonna acélra számítva. A salak folyósítására folypátot, esetleg timföldet használnak. Az elektroacél gyártásánál jellemző, hogy általában az oxidációs szakasz végén a salakot eltávolítják a benne oldott anyagokkal, és újat képeznek (egy tonna acélra számítva 25-35 kg égetett mészből, 6-8 kg folypátból).

Az acél frissítéséhez szükséges oxigént több forrásból biztosítják:

- ipari oxigén fúvatásával ( $p = 1,2 \text{ Mpa}$ ;  $10\text{-}25 \text{ m}^3/\text{t}$  acél; szennyezőtartalom max. 0,5%),
- az acélhulladékból származó rozsdából,
- vasérc adagolásával ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;  $\text{SiO}_2$  tartalom  $< 3\%$ ),
- kohászati revéből.

A frissítés vegyi reakciói hasonlóképpen zajlanak, mint az LD eljárásnál. Az ívkemencében azonban az oxidációs szakasz végére a hőmérséklet

lényegesen magasabb, eléri az 1650 °C-ot. Az oxidációból, valamint a betétanyaggal bevitt szerves szennyezők kiégéséből keletkező gázok buborékok formájában hagyják el a fémfürdőt, miközben homogenizálják a fürdő összetételét, hőmérsékletét, magukkal ragadva a lebegő, oldhatatlan oxidokat, az oldott gáztartalom egy részét.

A magas hőmérséklet kedvez a foszfor salakbevitelének. A visszaredukálódás elkerülése érdekében el kell távolítani a salakot.

Ezt követően a kikészítés első szakaszaként az acél szénttartalmát állítják be úgy, hogy pótolják a kiégett szén egy részét kokszipor, grafitelektróda törmelék adagolásával. A bevitt szén egy kisebb része a fémfürdő vasoxid tartalmát redukálja. A buborékképződés megszűnte után képezik az új salakot, amely véd a további oxidációtól.

Ezt követi a kéntartalom csökkentése, a dezoxidálás, valamint a gyártási célnak megfelelő ötvözés. Meg kell azonban említeni, hogy az ötvözést ma már gyakran kemencén kívül végzik el.

Mivel az ívkemence magas hőmérsékletű terében az egyes gázok atomos állapotban vannak, pl. a különböző anyagok nedvességtartalmából és a szerves szennyezőkből hidrogén (H), a kemence levegőjéből nitrogén (N), így azok könnyen oldódnak az acélban. Az elektroacélok összetételét a 3.11. táblázat mutatja be.

3.11. táblázat Elektroacélok összetétele

<b>Az elektroacélban található elemek</b> [tömeg %]	
szén (C)	0,-1,5
szilícium (Si)	0,05-0,4
mangán (Mn)	0,3-0,5
foszfor (P)	0,01-0,02
kén (S)	0,005-0,02
oxigén (O)	0,01-0,05
nitrogén (N)	0,02-0,06
hidrogén (H)	0,0003-0,0005

Az elektroacélt a buktatható kemencéből öntőüstbe csapolják a salakkal együtt. Gyártásához viszonylag sok elektromos energiára van szükség, de hulladékacélból huszadannyi energia befektetésével lehet előállítani, mint nyersvasból.

Napjainkban a nagy adagidővel és meglehetősen környezetszennyező módon működő, bár jó minőségű acélt előállító Siemens-Martin eljárást kiszorította az *oxigén-frissítéses konverteres* és az *elektroacélgyártási eljárás*. Az így gyártott acél kielégíti az alapacélokkal szemben támasztott általános igényt. A felhasznált acélmennyiségnek mintegy felét teszik ki az alapacélok. Minőségi- és nemesacélokat további tisztítással, valamint ötvözéssel lehet előállítani.

Az acélgyártás gazdaságosságának fokozására alapvetően két lehetőség adódik:

- az adag kikészítési idejének csökkentése,
- az adag nagyságának növelése.

Az acélgyártó berendezésben a további finomítást, ötvözést nem gazdaságos elvégezni, mert általában csak kisebb nemesacél adagokra van szükség, és a finomítás jelentősen növeli az adagidőt. Ezért ma már elválasztják az alapacél gyártását, a nemesacél gyártását jelentő finomító eljárásoktól, kemencén kívüli, úgynevezett **üstmetallurgiai eljárást** alkalmaznak.

#### 3.5.2.7 A kemencén kívüli finomító eljárások (üstmetallurgia)

Az üstmetallurgia nem egy konkrét eljárás, hanem gyűjtőfogalom. *Bele tartoznak mindazok az eljárások, melyeket csapoláskor vagy öntéskor az üstben alkalmaznak a folyékony acél tisztítása, ötvözése érdekében.* Az egyes elemek minimális mennyiségére, tisztaságnak a fokára nincs abszolút mérőszám, azt, az acél felhasználási területe határozza meg. Például a foszfor mennyisége nagyon lényeges hegesztett szerkezetek esetén, de kisebb a jelentősége acélöntvényeknél, ha igénybevételük statikus. Ugyanezek az öntvények nagyobb foszfortartalom hatására dinamikus igénybevétel hatására ridegen törnek. Az üstmetallurgiai eljárások nem csak olcsóbbak, de hatékonyabbak és biztonságosabbak is, mint kemencében végrehajtott eljárások. Az üstmetallurgiai műveletek köre széles, közülük a leggyakoribbak:

- ötvözés, a gáztartalom csökkentése kicsapással,
- kezelés szintetikus salakkal,
- gázátfúvatás,
- vákuumozás.

A folyékony **acélban lévő gázoknak**, mint az oxigén, nitrogén eltávolításának jó módszere, ha az egyes elemeket oldhatatlan vegyületté alakítják és kicsapatják. Ez olyan reagensekkel lehetséges, amelyek nem oldódnak az acélban, így a vegyületképződés a fémfázisban történik. Az oldhatatlan reakciótermékek diszperz eloszlásban lesznek az acélban. Ezek egy része felúszik a salakba, a többi lebeg a fémfürdőben. A lebegő részeket úgy lehet csak eltávolítani, ha koagulálódnak, összetapadnak, képesek lesznek a salakba felúszni.

Az acél **ötvözői** közül számos elem a fémfürdő hőmérsékletén szilárd (Ti, Zr, Cr, V, Sb, Mo, Ta, W). Így ezek oldása igen lassú. Ezért az ötvözőket ferroötvözetek formájában használják. Ezáltal olvadáspontjuk akár 40 %-kal is csökkenhet. A ferroötvözetek előállítása olcsóbb is, mint a színelemeké. Dezoxidáláshoz leggyakrabban használt ferroötvözetek a FeMn, FeSi, FeTi, FeMnSi, CaSi, CaSiAl, CaSiMnZr, MnTiAl.

Ötvözéskor az egyes elemeket a dezoxidálást követően adagolják az acélba, a kiegészi veszteség csökkentése érdekében.

Az **acél kezelése szintetikus salakkal**, hatékonyan csökkenti FeO, FeS, MnS tartalmát és a visszamaradó zárványok kisebb méretűek, finomabb eloszlásúak lesznek. Az eljárás onnan kapta a nevét, hogy külön eljárással, szintetikus úton előállított salakot visznek az olvadt acélba. A szintetikus salak csak igen minimális mennyiségben tartalmaz acélban oldódó szennyezőt. Összetétele  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Az így kezelt acélok szívóssága lényegesen javul.

A hagyományos anyagokkal (Mn, Si, Al) végzett kicsapatásos dezoxidáció után kis méretű, felúszásra képtelen, kedvezőtlen alakú zárványok maradnak vissza aránylag nagy mennyiségben és marad oldott oxigén is az acélban. Ezek eltávolításának legegyszerűbb módszere a **szilárd anyag injektálása** a fémfürdőbe. Ezzel a módszerrel:

- az ötvöző anyagok kiegészése csökken,
- az ötvözés hatékonysága javul,
- olyan anyagokat is be lehet vinni a fémfürdőbe, amelyek más módszerrel nem vagy csak jelentős veszteséggel ötvöződnek.

Az injektálás a fürdőbe merülő ún. „lándzsán” keresztül nagy, 0,6-1,6 MPa nyomással történik. A nagy mozgási energiával rendelkező vívőgáz magával ragadja a szilárd anyag szemcséit és egyúttal erős keverő hatást is kifejt, amitől a folyamat még reakcióképesebb lesz.

Injektálásra használt anyagok:

- a fémfürdőnél lényegesen kisebb sűrűségű anyagok (Ca, Mg, Al, Ba),
- a fémfürdőnél lényegesen alacsonyabb forráspontú anyagok (Mg, Ca),
- a fémfürdőnél lényegesen nagyobb olvadáspontú anyagok (W, Mo),
- az oxigénhez nagy affinitású anyagok (Ca, Mg, Ce, La, Nb).

Az **acélfürdőn át fúvatott gázáram** ugyancsak elősegíti az acél tisztulását. A befúvatott gáz, valamint a feltörő buborékok intenzív *keverő hatása* jelentősen csökkenti az összetételi, hőmérsékleti inhomogenitásokat. A buborékok felületén a hidrofób lebegő szennyeződések, apró salakszemcsék megtapadnak, a *buborékkal a felszínre emelkednek*. Szintén kedvező hatású az acél minőségére, hogy *csökken az oldott gáztartalma*. A buborékban az

oldott gáz, nitrogén, hidrogén parciális nyomása kisebb, mint az acélfüzdőben, így ezek egy része a buborékba diffundál, és vele együtt távozik.

Fúvatásra az argon gáz (Ar) alkalmas, mert nem oldódik az acélban. Olyan esetben, ha az acél ridegtörési hajlamával szemben támasztott követelmények nem túl szigorúak, a drága argon helyett a fúvatás történhet a lényegesen olcsóbb nitrogénnel is. A 0,03 %-nál kisebb széntartalmú acélok esetén a fúvatógáz általában argon, esetleg lehet vízgőz, amihez aktív komponensként oxigént is kevernek. A fúvatáshoz különféle üstöket alakítottak ki, amelyekbe a gázt a falazat porózus szerkezetén át vagy lándzsán keresztül fúvatják be.

Az **acél vákuumozása** korszerű, hatékony módszere a nagy tisztaságú acél előállításának. Lényegében háromféle gázhalmazállapotú elemmel kell számolni, amelyek az atmoszférából kerülnek az acélba: ezek az oxigén, nitrogén és hidrogén.

Az *oxigén* jórészt vegyületet képez a vassal vasoxid formájában, csak kis része képes elemi formában oldódni. A *nitrogénnek* jelentős része oldott formában van jelen, csupán kisebb része képez vasnitrid vegyületet a fémfüzdőben. A hidrogénnek sajátossága, hogy nem képez vegyületet az acél alkotóival, viszont az előbbi elemeket meghaladó módon képes oldódni a folyékony acélban.

Azt, hogy a folyékony acélban mennyi lesz az oldott gázok mennyisége, több tényező határozza meg:

- a hőmérséklet,
- a gáznak az olvadt fémekben kifejtett aktivitása,
- a berendezésben, a fémfüzdő feletti térben uralkodó parciális nyomás.

Ez utóbbi tényező változtatásán alapul a vákuum-eljárás, ugyanis ha a berendezés zárt terében a fémfüzdő felett csökkentik a nyomást, az egyes gázkomponensek parciális nyomása is csökken. Így a fémfüzdőben oldott gázok a kisebb nyomású térbe kiválhatnak.

A vákuumozás a vegyi összetételt is megváltoztathatja azáltal, hogy az alacsonyabb forráspontú alkotók egyszerűen elpárolognak. Ilyen elemek az ólom (Pb), ón (Sn), mangán (Mn). Az acél vákuumozásának számos technológiai változata alakult ki.

### 3.5.2.8 *Kristályosító eljárások*

Az alkalmazott fém-előállítási, fémfinomítási eljárás után a kész adag folyékony állapotban található a gyártó berendezésben, illetve az öntőüstben. A további felhasználás, feldolgozás előtt végbemegy a fém kristályosodása. Ennek során a kész adagból általában olyan, már kristályosodott darabokat kell előállítani, amelyek elég nagyok ahhoz, hogy belőlük megfelelő méretű termékek, csövek, rudak, lemezek stb. gyártása gazdaságosan megoldható

legyen, ugyanakkor nem nagyobbak annál, mint amit a feldolgozás során kezelni, mozgatni, újrahevíteni lehet.

A kristályosítás legelterjedtebb módszerei:

1. kristályosítás tuskóöntéssel,
2. folyamatos öntéssel,
3. öntvehengerléssel,
4. speciális eljárásokkal (egykristály növesztés, üvegfém előállítás, fémporgyártás).

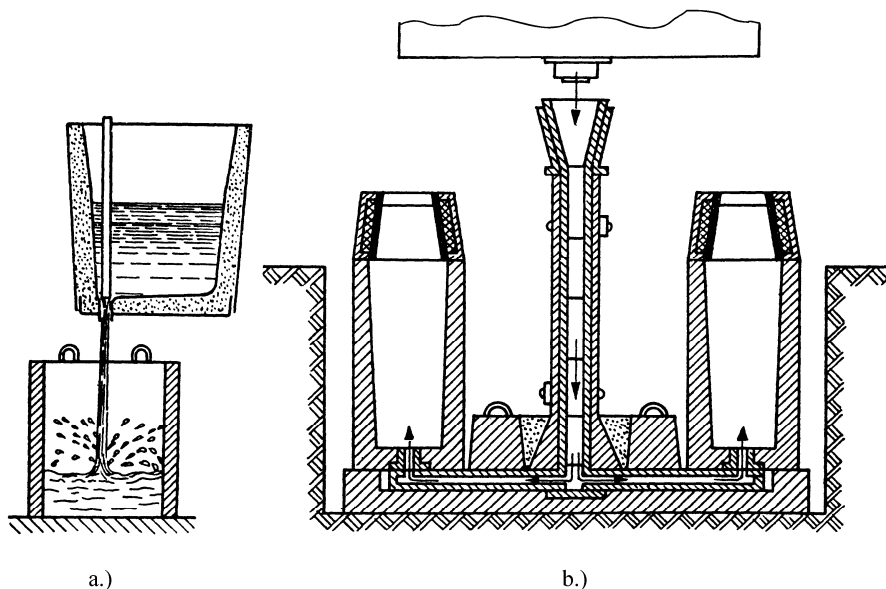
Tömegszerűségét tekintve az előbbi három eljárásnak van nagy jelentősége. A különböző fémek esetében más és más eljárás kerül előtérbe. A vasötvözeteknek mintegy kétharmadát ma is kokillába öntik, egyharmadát folyamatos öntéssel dolgozzák fel.

Az alumínium feldolgozásánál szintén mintegy kétharmad részét kokillába öntik, de a folyamatos öntés mellett az öntvehengerlésnek is jelentős szerepe van.

A réz feldolgozásánál a tuskóöntésnek nincs túl nagy szerepe. A katódrezt újraolvasztás után főleg öntvehengerléssel, kisebb részt pedig, folyamatos öntéssel dolgozzák fel.

### 3.5.2.8.1. A tuskóöntés típusai

A tuskóöntés eszköze a kokilla. Ez egy öntöttvasból készült vastag falú, alul és felül nyitott „edény”, amelynek keresztmetszete lekerekített sarkú, felfelé csökkenő méretű négyzet (esetleg hatszög, kör). Falai nem párhuzamosak, hanem a kokilla tere felfelé szűkül azért, hogy a benne megszilárdult tuskóról leemelhető legyen. A tuskót vagy inkább tuskókat az alaptáblára állítják és felülről, vagy alulról töltik fel fémolvadékkal (3.11. ábra).



3.11. ábra Tuskóöntés  
a.) felső öntésű; b.) alsó öntésű



A **felső öntésű tuskó** esetén a felülről beöntött fémömladék szétfröccsen, és cseppjei a kokilla falához tapadnak. Ez a tuskó felületi hibáit okozza. Az öntés sebessége viszonylag gyors. A fémfürdő felszínének emelkedési sebessége mintegy 40 mm/s, ami termikus feszültségeket okoz a felületi zónában. Ennek következtében a felületen repedések keletkezhetnek. A felül beöntött folyékony fém a fémfürdő felületén kialakuló oxidokat a fürdőbe verheti. Ezzel a módszerrel általában egyszerre egy tuskót öntenek. Előnye, hogy az olvadt fém beöntése nem igényli hőálló anyaggal bélelt tölcsér alkalmazását, ami által elkerülhető, hogy belőle erózió útján salakzárványok kerüljenek a tuskóba.

**Alsó öntésű tuskó** esetén az alaptáblára állított kokillákat (4-12 db) a hőálló anyaggal bélelt tölcséren keresztül az alaptábla csatornáin át alulról felfelé, lassan tölti fel a folyékony fém, a közlekedőedény elve alapján. A fémfürdő felszínének emelkedési sebessége mintegy 4-5 mm/s. Az így öntött tuskó felülete simább lesz.

A kokillába öntött fémömladék általában több alkotóból áll. A kokilla tartalma nem egyszerre dermed meg, így a kristályosodás során a visszamaradó ömladék oldott anyagban egyre dúsulni fog. A **mikroszkopikus dúsulások** legfeljebb néhány  $\mu\text{m}$ -tól a mm-es nagyságrendig terjednek. Ezek kiegyenlítődése viszonylag könnyen végbemegy magasabb hőmérsékleten (homogenizáló izzítás során), mivel a diffúziós utak rövidek. A kész anyag tulajdonságaira érdemleges hatásuk nincs.

A tuskó széle és közepe között fellépő **makroszkopikus dúsulás** jelentős. A dúsulás mértéke egyenesen arányos:

- a tuskó minimális keresztmetszetével,
- az adott ötvözet esetén, a szolidusz és a likvidusz közötti hőfokkülönbséggel,
- a tuskó kiinduló átlagos koncentrációjával.

Acélban a dúsulásra leginkább hajlamos alkotók:

- oldott gázok,
- kén,
- foszfor,
- szén.

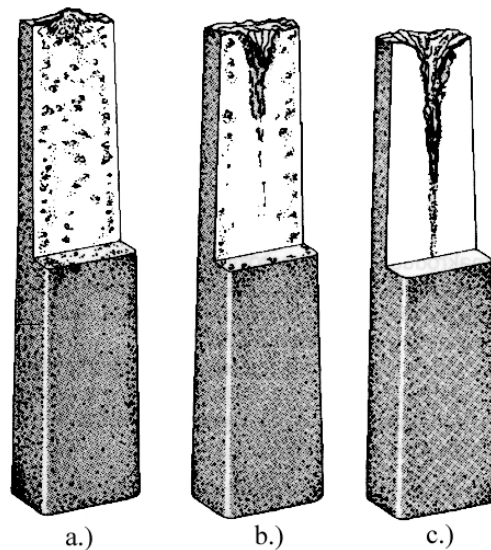
A tuskóöntés során a legnagyobb gondot éppen a makroszkopikus dúsulások okozzák. Ezek mennyisége a kristályosodást követően már alig csökkenthető. Az acélban anizotrópiát okoznak.

Az acél kristályosodásakor a kokillában egy sajátos folyamat játszódik le, amikor a visszamaradó ömladék dúsul oldott oxigénben, illetve vasoxidban, valamint szénben. Ha dezoxidálásra nem került sor, akkor a szén az oxigénnel szénmonoxidot képez, és erős buborékképződés indul meg (a fémfürdő „fővése”). Az ilyen acélt **csillapítatlannak** vagy *meg nem nyugtatott acélnak*

nevezik. Ha a kikészítés során az acélt csillapították, vagyis ötvözték olyan, a szénél az oxigénhez nagyobb affinitású ötvözővel, amely nem gáz halmazállapotú oxidot képez, az élénk pezsgő jelenség, a buborékképződés elmarad. Az ilyen acél **csillapított** vagy más néven *megnyugtatott* acél (lásd acél dezoxidálása).

A **csillapítatlan acéltuskó keresztmetszetét** a 3.12/a. ábra mutatja be. Csillapítatlan minőségben készülnek általában a 0,25 %-nál kisebb széntartalmú acélok, amelyek legfeljebb 0,5% mangánt, 0,01-0,02% szilíciumot tartalmaznak. A tuskó felülete sima, a felülete közelében mintegy 15-25 mm vastagságban igen tiszta. Ezen belül sugarasan elhelyezkedő gázzárvány koszorú van. Fogyási üreg általában nem alakul ki, mivel a zsugorodás okozta térfogatcsökkenést, a gázképződés kompenzálja.

A **csillapított acéltuskó keresztmetszete** a 3.12/b. ábrán látható. Ebben a minőségben készülnek általában a 0,25 %-nál nagyobb széntartalmú acélok. Az ennél kisebb széntartalmú acélokat akkor készítik csillapítva, ha különleges követelmény a nitrogén- és oxigénmentes öregedésálló minőség. Ilyen acélt használnak kazánlemezekhez, negatív hőmérsékleten sem ridegedő hegeszthető acélokhöz. Ezekben a szilícium mennyisége mindig meghaladja a 0,2%-ot.



3.12. ábra Különböző csillapítású acéltuskók keresztmetszete  
a.) csillapítatlan; b.) féligcsillapított; c.) csillapított

Acéltuskókon az úgynevezett tuskófejek valamennyi jellegzetes tuskóhibát tartalmaznak:

- a szívódási üreget (csövesség, „lunker”),
- porozitást,
- zárványosságot,
- dúsulásokat,
- irányított, durvaszemcsés szerkezetet.

Emiatt az után, hogy a tuskóról leemelik a kokillát, eltávolítják a tuskó fejrészét, ami 10-15% hulladékot jelent.

A hulladék csökkentése érdekében szoktak a kokillára egy hőszigetelt toldatot, úgynevezett *sapkát* tenni. Ezzel csökkenthető a fejrészben a szívódási üreg, a porozitás és a salakzárványok mennyisége. Mivel a toldatban az acél a folyamat végéig ömledék állapotban marad, ez pótolja a zsugorodás során jelentkező fogyást. A kokilla térfogatának 10-15 %-át kitevő toldat alkalmazása csökkenti a keletkező hulladék mennyiségét.

### 3.5.2.8.2. Folyamatos öntés

A szakaszos kokillaöntésnél korszerűbb eljárás a folyamatos öntés és kristályosítás módszere, mivel ennél az eljárásnál:

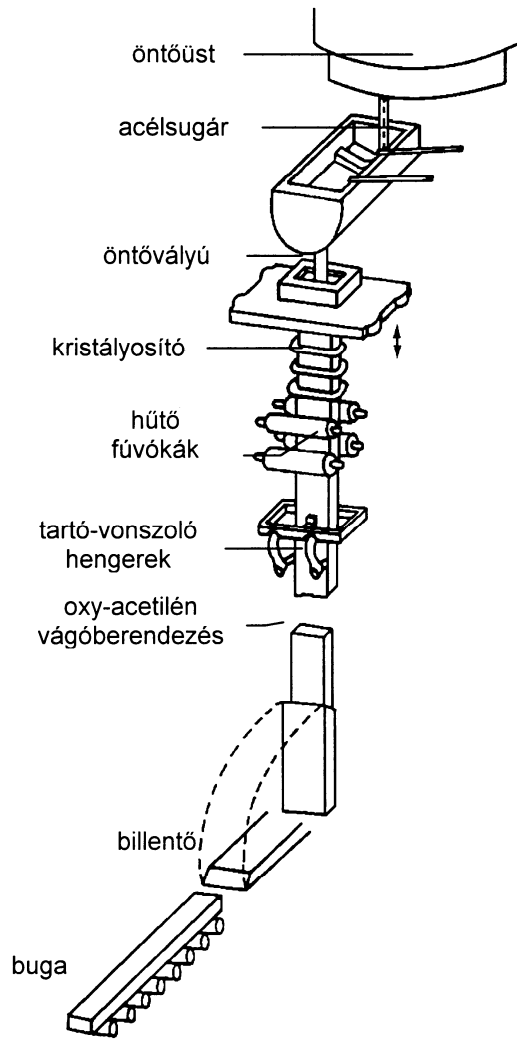
- kisebb a makroszkópos dúsulás és a porozitás kialakulása, valamint a dendrites kristályosodás veszélye az intenzívebb hűtés miatt,
- elmarad a szívódási üreg képződése, így nagyobb a kihozatal,
- mivel az öntés folyamatos, jól automatizálható,
- az öntött buga mérete, alakja jól változtatható a további feldolgozás igényeitől függően.

Az eljárás hátránya, hogy a viszonylag gyors hűtés hatására a felület közelében kialakuló termikus feszültség következtében repedések keletkezhetnek. Csillapítatlan acélok kristályosodásakor heves gázképződés zavarhatja meg az öntési folyamatot, jelentős porozitás léphet fel a bugában.

A folyamatos öntés különféle elrendezésű lehet. A függőleges elrendezésű folyamatábráját mutatja be a 3.13. ábra. A folyékony acél az öntőüstből az öntővályúba, onnan a vízzel hűtött kristályosítóba kerül. A kristályosítási folyamat itt megy végbe.

A keletkező szilárd kéreg a zsugorodás hatására elválik a kristályosító falától. A megszilárdult rész egyenletes sebességgel mozog lefelé. A kristályosító egy darabig együtt mozog lefelé a megszilárdult bugával kb.10-40 mm-t, majd felfelé mozdul. Így a kristályosítás során alternáló mozgást végez. A távozó szilárd anyagot a vályúból folyékony fém pótolja. A már kellően szilárd bugát úgynevezett vonszoló hengerek továbbítják lefelé. A hengerek alatt elhelyezett, a bugával együtt mozgó acetilénes lángvágó berendezés a bugát általában 6 m-es darabokra vágja.

Az eljárásnak van egy félfolyamatos változata is, amelyet leginkább az alumínium kristályosításánál alkalmaznak. Az eljárás elve annyiban tér el az előbbtől, hogy a folyamat egy bugahossz előállításáig tart. Itt azt megszakítják, majd újra kezdik az eljárást. Ennek során kialakul a szívódási üreg, bár ez kisebb veszteséget okoz, mint amit a tuskóöntésnél bemutattunk.

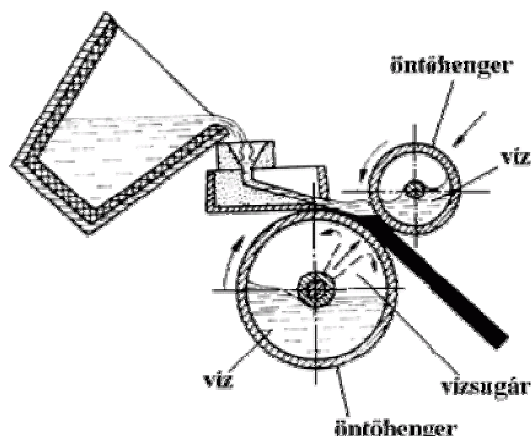


3.13. ábra Folyamatos acélöntés

### 2.5.2.8.3 Öntvehengerlés

Az öntvehengerlés eljárását, amely az öntést és hengerlést egyesíti magában, főleg az alumíniumból és rézből készült félkészgyártmányok, huzalok, szalagok előállításához használják előszeretettel, mert általa csökkenthetők a gyártási költségek.

A huzalok gyártásánál kristályosító gyanánt egy nagy méretű forgó fém dobot használnak, amelynek palástjára olyan profilú hornyot munkálnak ki, mint amilyen a gyártott termék keresztmetszete. Az olvadt fémet az öntőforma szerepét betöltő horonyba vezetik, amit a forgó dob magával visz. A folyékony fém kifolyását egy, a dobon átvetett acélszalag akadályozza meg. A hűtött dobon a fém mintegy 200-250 fokos szögelfordulás alatt megszilárdul és már a tároló dobra csévéelhető.



3. 14. ábra Öntvehengelés elve [www.tankonyvtar.hu ]

A fémszalagok öntvehengeléséhez kristályosító dob helyett, a járművek lánctalpára emlékeztető, végteleníve összekapcsolt hűtőtömböket használnak. A két lánc egymással szemben mozogva az öntőcsatorna vonalában haladva két párhuzamos síkot formáznak. Az így kialakított térbe öntött fém a hűtőtömbökön megszilárdul. A tömbök a kialakult szalagot magukkal vonszolják. A szalag miután elhagyta a kristályosítót, felcsévélhető.

## 3.6 Egyéb fémek

### 3.6.1 Titán

A titán (Ti) ipari felhasználására csak 1950-es évektől került sor. Szilárdsága a könnyűfémek között viszonylag nagy (az ötvözetlen lágyacélnál jóval nagyobb). Kémiai ellenálló képessége kitűnő, hasonló, mint a 18/8-as ausztenites saválló krom-nikkel acéloké, de a kén- és foszforsav, valamint a halogének megtámadják. Azon fémek közé tartozik, melyeknek allotrop módosulata van. Szobahőmérsékleten hexagonális rácsszerkezetű (ún. alfa-titán), mégis jól alakítható, ha nagytisztaságú (nem szennyezi C, O, N). Szennyezői kis mennyiségben is elridegítik. 900 °C-on térszerű köbös szerkezetűvé (béta-titán) kristályosodik. Olvadáspontja magas, 1820 °C.

A titánt oxidos érceiből állítják elő (rutilérc, titanit). Előbb érckoncentrátumot készítenek, majd klórozással titántetrakloridot állítanak elő (TiCl<sub>4</sub>).

Tisztítását retortákban 900 °C-on, argon védőgázban végzik. Olvadt magnéziumra csepegtetik, így redukálják. A létrejött ún. titánszivacsból, ívkemencében vákuumban állítják elő a titánt vízzel hűtött falú réztégelyben.

Fő ötvözői a vas, krom, mangán, molibdén. Szilárd oldatot képez velük. Méretük hasonló, ötvözésükkel a béta-fázis állandósul, az alumíniummal alfa-fázisú lesz. A titán és ötvözetei jól hegeszthetők argon védőgázzal.

### 3.6.2 Magnézium

A magnézium (Mg) a hatodik leggyakoribb fém. Sűrűsége csupán  $1,74 \text{ kg/m}^3 \cdot 10^3$ , olvadáspontja  $T_o = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ . Rendkívül nagy az affinitása az oxigénhez,  $550 \text{ }^\circ\text{C}$ -on meggyullad.

Hexagonális rácsban kristályosodik, így hidegen rosszul, melegen jobban alakítható. A felületén kialakuló oxidhártya nem elég tömör, szerves savak, sók, de a víz is megtámadja, felületét lakkal kell védeni.

Általában érceiből (magnezit, dolomit, karnalit), elektrolitikus úton állítják elő. Ötvözői az alumínium, horgany, mangán. Lítiummal ötvözve még kisebb az ötvözet sűrűsége. A magnézium melegszilárdsága rénium (Re), tórium (Th), horgany (Zn) ötvözéssel növelhető. Az öntöttvasnak fontos ötvözője (gömbgrafitos vasöntvény). A magnézium szilárdsága kicsi,  $R_{eH} = 20 \text{ N/mm}^2$ , nyúlása  $A_{10} = 2 - 18\%$ .

A magnézium 3-9 % alumíniummal alkotja az ún. *elektronötvözeteket*. 4-9%-os ötvözeteket öntik, a 3-6%-osakat alakítani lehet. A magnézium gyúlékonysága miatt az ötvözeteket csak sófürdő alatt lehet hevíteni, öntése így nehézkes.

### 3.6.3 A horgany

A horganyt (Zn) szulfidos vagy karbonátos érceiből állítják elő kohászati úton. Az ércet előbb pörkölik, majd az így keletkezett horgany-oxidból redukálják a hutahorganyt. A horgany  $419 \text{ }^\circ\text{C}$ -on olvad,  $950 \text{ }^\circ\text{C}$ -on gőzfázisba megy át. Mivel a redukálás hőmérséklete  $950 - 1100 \text{ }^\circ\text{C}$  között van, a horgany gőzfázisból válik ki. Tehát légmentesen zárt térben kell a redukációs folyamatnak végbemenni. Az így nyert fém ólommal és egyéb fémekkel szennyezett, még finomító *átömlesztéssel* kell tisztítani. A színhorganyt (99,99%) elektrolízissel nyerik  $\text{ZnSO}_4$ -ből. Szilárdsága  $150 \text{ N/mm}^2$ , nyúlása  $A_{10} = 15\%$ .

A horgany jól önthető,  $140-170 \text{ }^\circ\text{C}$ -on jól hengerelhető,  $120-140 \text{ }^\circ\text{C}$ -on kevésbé alakítható, viszont  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  felett rideg. Hexagonális rácsban kristályosodik. Hengerlés után szilárdsága a hengerlés irányára merőlegesen jóval nagyobb, mint vele párhuzamosan.

Ipari felhasználásának fontosabb területei:

- lemezgyártás,
- korrózióvédő bevonatok,
- ötvözés.

Fő ötvözői az alumínium és a réz. Ötvözeteit főleg öntik. Az alumíniummal előállított öntvényei nem mérettartóak a kristályrács átalakulása miatt.

### 3.6.4 Az ón

Az ón (Sn) azon fémek közé tartozik, amelyeknek allotrop módosulata van. Az  $\alpha$ -módosulat, az ún. fehér ón csak 18 °C felett stabil. Tartósan 18 °C alá hűtve átalakul szürke ónná és porrá esik szét (*ónpestis*). Ez a  $\beta$ -módosulat.

Szilárdsága öntve 30-40 N/mm<sup>2</sup>, nyúlása 30 – 40%. Hidegen jól alakítható. Fóliává nyújtható, acélbevonatként használható korrózió ellen. Előállítására a horganyhoz hasonló módon történik.

Három fő alkalmazási területe:

- élelmiszer- és konzervipar (fólia, tubus, bevonat),
- csapágyfémek előállítása,
- forraszanyagok előállítása (alacsonyolvadáspontú ötvözetek).

### 3.7 Porkohászati termékek előállítása

Porkohászati eljárás olyan technológiai folyamat, amelynek során fémek, esetleg nemfémek, porának keverékéből állítanak elő ötvözetet. Ezzel a módszerrel olyan fémek is ötvözhetőek, amelyek egyébként nem képeznek ötvözetet, illetve magas olvadáspontjuk miatt nehezen olvaszthatók meg (pl. W, Mo).

#### 3.7.1 Fémporok előállításának módszerei

Az eljárás lényege, hogy a finom szemcsézetű fémporokat (0,02-0,40 mm), a kívánt összetételben, arányban összekeverik, majd a készítendő munkadarab alakjára sajtolják. Így az eljárás alakadó technológiának is tekinthető. A sajtolás után a munkadarabokat az olvadáspontjuknál alacsonyabb hőmérsékleten zsugorítják. A zsugorítás ún. szinterelés során a szemcsék nem olvadnak meg, hanem az érintkező fémszemcsék között fémionok diffúziója jön létre, és a szemcsék összehegednek. Így az eljárás körülményeitől függően, többé-kevésbé porózus szerkezet alakul ki. A porkohászat tehát fémporok előállításával, a fémporokból félkész- és késztermékek előállításával foglalkozik. Az eljárás tömeggyártásra kiválóan alkalmas.

Ez első porkohászati termékeket a XIX. század elején gyártották, majd igazi fejlődésnek a XX. század negyvenes éveiben indult a technológia.

A porkohászati eljárás alapanyagát, a fémporokat különféle technológiával állítják elő:

- szilárd fémek mechanikus aprításával,
- fémömlédek porlasztásával,
- fémoxidok redukálásával,
- fémsóoldatok elektrolízisével.

**Mechanikus úton** csak a rideg fémek apríthatók. Lehet aprítani forgácsolással és őrléssel, pl. golyós, kalapácsos és zúzómalmokban. A wolframkarbidot, titánkarbidot, ferroötvözeteket, fehérnyersvasat stb. általában őrlik. A képlékeny fémek ezekben a berendezésekben csak szétlapulnak, így ezekből port csak, pl. örvénymalmokban lehet előállítani. A nagy sebességgel örvénylő szemcsék egymásba ütközve aprózódnak és 0,02-0,4 mm méretű részecskék jönnek létre.

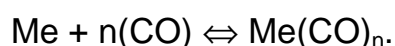
Az alacsony olvadáspontú fémek (pl. ón, ólom, horgany, alumínium és ötvözeik) porát **porlasztással** állítják elő. A porlasztás történhet sűrített levegővel, gőzsugárral, illetve oly módon, hogy a folyékony fémet forgó tárcsára öntik. Alkalmazhatják a módszereket kombinálva is. A porlasztott szemcsék mérete 0,02-0,4 mm, felületük érdes, oxidált, ezért nehezen sajtolhatók.

A magas olvadáspontú fémek esetében szinte kizárólag a megfelelő **oxidok redukcióját** alkalmazzák porok előállítására. Például a wolfram- vagy molibdénoxid port csökemencében, mintegy 800 °C hidrogénáramban redukálják, majd hűtik. Így nagy tisztaságú fémpor állítható elő.

Ha nincs szükség nagy tisztaságú fémporra, mint pl. keményfém gyártásnál, akkor faszénpor, grafitpor, korom segítségével redukálják a fénoxidot.

A redukció terméke jellegzetesen szivacsos szerkezetű, az egyes szemcsék csomókká állnak össze, amelyek sajtoláskor esnek szét.

Fémporok gyárthatók nagy nyomáson és magas hőmérsékleten is. A módszert **karbonil** eljárásnak nevezik. Ennek lényege, hogy néhány fém (Fe, Co, Ni) a szénmonoxiddal karbonil vegyületet képez:



Ez a vegyület nem stabil, könnyen felbontható szénmonoxidra és fémporra. Az előállított porok nagy tisztaságúak, kén- és foszformentesek. A keletkező szemcsék gömb alakúak, méretük nagyon kicsi, 0,1-10 µm. Az eljárás viszonylag költséges. Ilyen módon állítják elő, pl. a lágymágnesek anyagát.

A **fémsóoldatok elektrolízisét** főleg rézpor előállítására használják, de előállítható így ezüst-, ón- és vaspórá is. Az elektrolízis során a fémpor a katódon válik ki, amely onnan könnyen leválasztható. A poralakban történő kiválást a kis fémion-koncentráció, a nagy áramsűrűség segíti elő. A szemcsék méretét, tulajdonságait ezeknek a paramétereknek, valamint az elektrolit cirkulációjának változtatásával lehet befolyásolni tág határok között, azonban a kialakuló dendrites szemcséket még más módszerrel tovább kell aprítani.

Az egyes fémek és ötvözetek porításához alkalmazott eljárásokat a 3.12. táblázat foglalja össze



### 3.12. táblázat Fémporok előállítási módszerei

Sor-sz.	A fémpor előállításának módszere	Fém, ötvözet
1.	Forgácsolás	acél, sárgaréz, bronz, magnézium, öntöttvas
2.	Aprítás zúzómalmokban	bronz, Mn, Cr, Fe-Si, Ni-Ti, Fe-Cr, Fe-Al,
3.	Aprítás örvénymalmokban	acél, sárgaréz, Fe-FeNi, Cu, Al, Ni
4.	Fémporlasztás	alacsony olvadáspontú ötvözetek, Zn, Pb, Al
5.	Redukálás gázatmoszférában	Mo, W, Cu
6.	Karbonileljárás	Co, Ni, Fe-Ni
7.	Elektrolízis	Cu, Ni, bronz

A porkeveréket az **előkészítés** során, az előállítani kívánt ötvözetnek megfelelően, különböző alapporokból állítják össze.

Egyes esetekben a porokhoz még a sajtolást könnyítő adalékokat is kevernek, amelyek csökkentik a részecskék közötti súrlódást. Ilyen anyag lehet, pl. glicerin, paraffin, benzines kámfor, gépolaj.

#### 3.7.2 A porkohászati termékek sűrűségének és szilárdságának viszonya

A porkohászati eljárás két alapvető műveletének, a sajtolásnak és a zsugorításnak a végrehajtási módjától függ a gyártmány sűrűsége, ettől pedig, a szilárdsági tulajdonságai.

Azonos összetétel mellett a sűrűség növekedésével növekszik a szilárdság, így *a sűrűség a szilárdság jellemzője.*

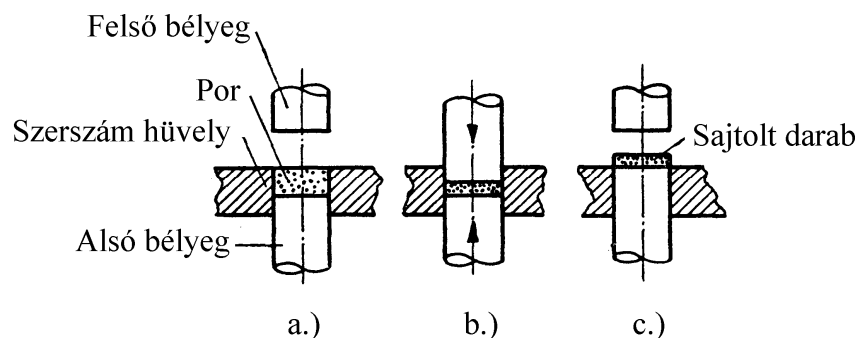
I. Speciális esetekben a kis sűrűségű munkadarabokat nem is sajtolják, csupán a fémport formában zsugorítják. Ilyenkor a **sűrűség kisebb, mint  $5,5 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 10^3 \right]$** , az alkatrész porozitása nagy, ezért pl. fémszűrők készülhetnek belőle. *Ezek az ún. nagyon kis sűrűségű porkohászati termékek.*

II. Az ennél nagyobb,  **$5,5 - 5,8 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 10^3 \right]$  sűrűségű** porkohászati termékeket sajtolással, azt követően zsugorítással állítják elő. A méretpontosság miatt esetleg kalibrálják. *Ezek az ún. kis sűrűségű porkohászati termékek.* Készülhetnek belőlük csapágy anyagok kis terhelésre, nagy fordulatszámra. Porozitásából fakadóan képes kenőanyagot tárolni a pórusaiban.

III. A **5,8 - 6,5**  $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 10^3 \right]$  **sűrűségű** és ezzel nagyobb szilárdságú termékek előállítása során a sajtolást, zsugorítást követően a műveletet egyszer vagy többször megismétlik, amit felületkezelés is követ. *Ezek az ún. közepes sűrűségű porkohászati termékek.* Alkalmasak nagyobb terhelésű, kisebb fordulatszámú csapágyak anyagának.

IV. A **6,5 - 7,3**  $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 10^3 \right]$  **sűrűségű** termékek már jó szilárdságúak és mérsékelten dinamikusán is terhelhetők. Porozitásuk 7-18%. Szilárdságuk felülmúlja az öntöttvas szilárdságát. *Ezek az ún. nagy sűrűségű porkohászati termékek.* Ezekből dörzskereke, dugattyúgyűrűk, fogaskerekek készülhetnek.

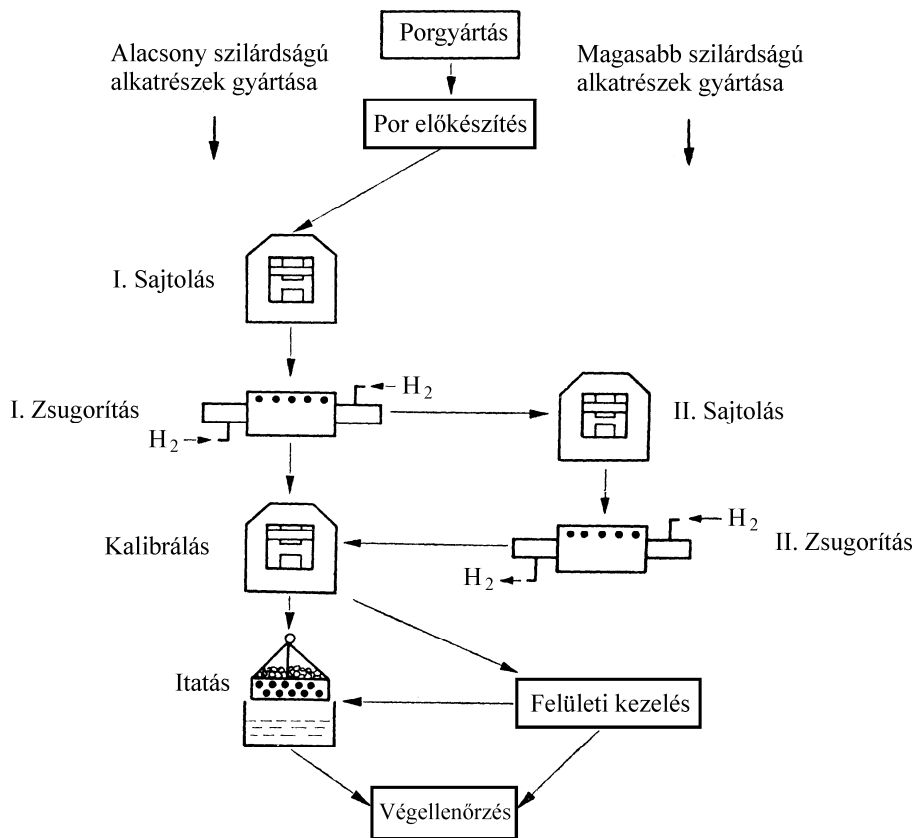
V. A **7,3 - 7,8**  $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 10^3 \right]$  **sűrűségű** termékek hőkezelésnek, felületkezelésnek vethetők alá, mint az edzés, cementálás, galvanizálás. Porozitásuk 7% alatt marad, így igen jó a szilárdságuk, korrózióállóságuk. *Ezek az ún. nagyon nagy sűrűségű porkohászati termékek, mint a keményfémek.*  
A munkadarabok porkohászati előállításának folyamatábráját a 3.15. ábra mutatja be.



3.15. ábra A vaspórtólósa  
a.) töltőállás b.) sajtoló állás c.) kilökö állás

### 3.7.3 A porkohászat eljárások műveletei

Általában az első művelet a **sajtolás**. A fémport a munkadarab alakjának megfelelő alakú és méretű matricába adagolják. A matrica készülhet acélból vagy keményféméből. A sajtolást az egyenletes nyomáseloszlás érdekében két oldalról végzik (3.16. ábra).



3.16. ábra A porkohászati gépalkatrészgyártás folyamatábrája

A fajlagos nyomás értéke  $2,7-7,0 \cdot 10^4$  Mpa és az így kialakuló tömörség kb. 70-90%-a a tömör fém sűrűségének.

A sajtolást a **zsugorítás** művelete követi. A sajtolt munkadarab nyers szilárdsága kicsi, a szemcséket csak alakzárás tartja össze. Így felhasználni nem lehet, ezért hőkezelni, más szóval zsugorítani kell, ami redukáló közegben 1050 – 1300 °C-os hevítést jelent, mintegy 0,5-1,5 órán át, mikor is a szemcsék összehegednek. Zsugorításkor diffúziós és átkristályosodási folyamat megy végbe. Ennek során megváltozik a darab:

- mérete,
- nő a sűrűsége, szilárdsága,
- nő a villamos vezetőképessége, mágneses permeabilitása,
- speciális tulajdonságok alakíthatók ki benne.

A nagy szilárdságú munkadarabok gyártásánál a sajtolást, zsugorítást többször is megismétlik.

A **kalibrálás** lényegében egy sajtolási művelet, amelynek során a munkadarab mérettűrését és felületi minőségét biztosítják.

A pórusok **telítésével** a porkohászati termékek siklási, kopási, korrózióállósági tulajdonságai javíthatók. Erre a célra olajat, parafint, sőt különleges tulajdonságok eléréséhez esetleg fémeket használnak.

### 3.7.4 A porkohászati termékek fontosabb felhasználási területei

A *nagyon kis sűrűségű* termékek kis szilárdságúak, de levegő- és folyadékszűrő képességük kiváló. Ezért általánosan használják légtisztító berendezésekben, üzemanyagszűrőkben, pneumatikus gabona- és porszállító berendezésekben.

Az 50% porozitású és műanyaggal, bitumennel átítatott anyagokból gyártanak tömítőgyűrűket.

A *kis sűrűségű* termékekből, amelyek porozitása 25-30%, kenőanyaggal telítés után kiváló siklási tulajdonságú csapágyakat készítenek.

A *közepes sűrűségű* porkohászati anyagok porozitása 1825%. Általában nagyobb terhelésű súrlódó alkatrészeket, csapágyakat gyártanak belőle. A bennük tárolt kenőanyag inkább csak az indulási és leállási állapotra elegendő. Tartós üzemeléshez pótkelési rendszert kell alkalmazni.

A *nagy sűrűségű* és 7-18% porozitású termékek már jó szilárdságúak, kitűnő kopásállóságúak. Olyan alkatrészeket gyártanak belőle, mint dinamó dörzskerekek, lánckerekek, láncszemek, dugattyúgyűrűk, görgős emelőtestek, alátétek, csapágyházfedelek, fogaskerekek. Az elektromos iparban lágy mágnesekekhez, vasmagokhoz, pólussarukhoz használják.

A *nagyon nagy sűrűségű* termékek porozitása kisebb 7 %-nál. Nagy statikus és dinamikus igénybevételek esetén is alkalmazhatóak. Kopás szempontjából igen erősen igénybevett jármű, háztartási gép, irodagép alkatrészek, forgácsoló, alakító szerszámok készülhetnek belőle. Ezek a *keményfémek*.

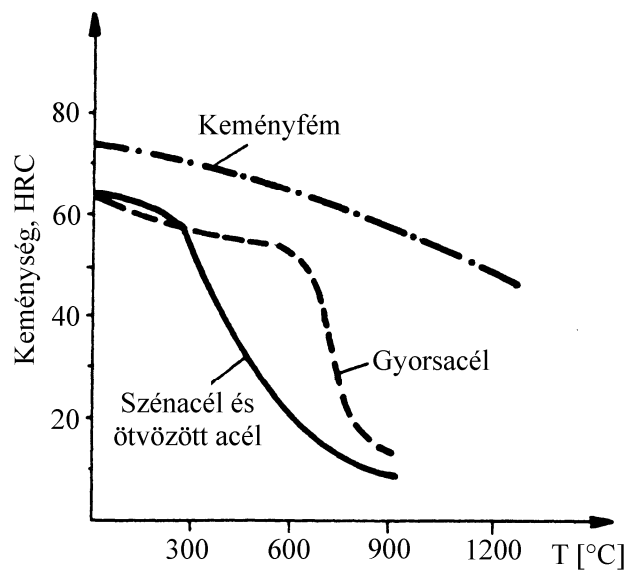
### 3.7.5 Keményfémek

A porkohászati úton előállított, ún. álötvözetek között vannak olyanok, amelyeknek keménysége szokatlanul nagy, olvadáspontjuk igen magas. Ezeket **keményfémeknek** nevezik.

A keményfémek nagykeménységű fémkarbidokból, a már ismertetett porkohászati eljárással állíthatók elő, a wolfram (W), titán (Ti), tantál (Ta), króm (Cr), vanádium (Va) vagy nióbium (Nb) karbidjából (a wolfram olvadáspontja 3370 °C). Ezekon kívül ún. segédanyagokat (ágyazó fémet) is felhasználnak a gyártáshoz. Ezek a vascsoporthoz tartozó fémek: vas (Fe), nikkel (Ni), kobalt (Co). Szerepük kettős:

- elősegítik a teljesen tömör szerkezet kialakulását, a zsugorodást,
- az álötvözeteknek bizonyos fokú szívósságot kölcsönöznek.

A keményfémek felhasználása egyre nagyobb teret hódít rendkívüli hő- és kopásállósága miatt. Fő felhasználási területük a forgácsoló és hidegalakító szerszámok előállítása. A 3.17. ábra a különböző szerszámanyagok keménységének változását mutatja a hőmérséklet függvényében. A keményfém keménysége még 900 °C-on sem csökkenhet 55 HRC alá. A keményfémekkel szinte minden ipari anyag megmunkálható (pl. kéregöntésű öntöttvas, ausztenites mangánacél, üveg stb.).



3.17. ábra Forgácsoló szerszámanyagok keménységének változása a hőmérséklet függvényében

A keményfémek gyártásakor a keményfém karbidok porát a segédanyag porával (legtöbbször kobalttal) keverik, majd *előzsugorítják* 600-900 °C-on, hidrogénvédőgázos kemencében. Az előzsugorított munkadarabok ekkor krétaszerű szilárdságúak, törés és élmorzsolódás nélkül még megmunkálhatók. A szükséges szilárdságot, keménységet, kopásállóságot a darabok a készrezsugorítás során érik el 1300-1500 °C-on, hidrogénvédőgázos vagy vákuumkemencében. A kész darabok már csak szikraforgácsolással, elektrolitikus köszörüléssel, gyémánttal vagy gyémántszemcsés csiszolókoronggal, bórkarbid szerszámmal végzett ún. leppolással lehetséges.

A keményfémeknek három fő csoportját különböztethetjük meg:

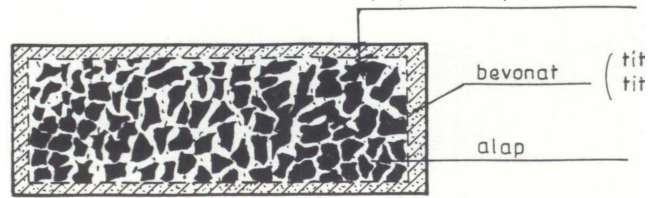
- egykarbidos, wolframkarbid alapú keményfém, a rideg anyagokhoz (magyar jelölés – **DR**, ISO jelölés – **K**);
- kétkarbidos, titán- és wolframkarbid alapú keményfém az acélokhoz (magyar jelölés – **DA**, ISO jelölés – **P**);
- háromkarbidos, titán-, tantál-, wolframkarbid alapú keményfém, univerzális felhasználásra (magyar jelölés – **DU**, ISO jelölés – **M**).

Mivel a keményfémek rendkívül kemény és rideg anyagok, ezért nem megfelelő alkalmazás mellett, bennük repedések keletkezhetnek. Keménységüket HRA keménységben fejezik ki, és értékük 87-92 HRA tartományba esik.

A keményfémek nagyon ridegek, szívósságuk kis mértékben az ágyazó anyag (kötőanyag) mennyiségével nő, de egyúttal keménységük és hőállósága csökken.

A magas hőállóságra és kielégítő szilárdságra való törekvés vezetett az ún. bevonatolt vagy rétegelt keményfém lapkák és szerszámok kialakításához. Az

anyag felületére (pl. a felületre gőzölögtetéssel) vékony, 0,01-0,06 mm vastagságú titánkarbid, titánnitrid bevonatot visznek fel (3.18. ábra), így növelve a szilárdságot, hőállóságot. Így az élettartam is három-négyszeresére nő.



3.18. ábra Bevonatolt keményfém lapka szerkezete

## 4. Ötvözetek hőkezelése

Az anyagszerkezettel, a kristályosodás folyamatával foglalkozó fejezetekben látható volt, hogy a kristályos szerkezet típusának, a kristályosodás mikéntjének jelentős hatása van az anyag szilárdsági-mechanikai és egyéb tulajdonságaira. Az állapotábráknak megfelelő változások a megismert szabályok szerint, mint hangsúlyoztuk, csak egyensúlyi viszonyok mellett mennek végbe. Ez vas-szén ötvözetek esetén 1 °C/min hűtési sebességet jelent. Az acélokat viszont, szinte mindig ennél gyorsabban hűtik.

Eddig főleg a megszilárduláskor lejátszódó folyamatok hatását tárgyaltuk, de azt is láthattuk, hogy a már szilárd állapotban is végbemennek kristályrács módosulások, átkristályosodások, új szövetelemek alakulhatnak ki, kiválások jöhetnek létre, például korlátolt oldás miatt. Ezen ismeretek alapján egy jelentős, az anyag tulajdonságát megváltoztató technológiai eljárás birtokába juthatunk, amikor *a már szilárd ötvözetet felhevítjük egy célszerűen megválasztott hőfokra (olvadáspontja alatt), ott hőntartjuk egy meghatározott szerkezeti átalakulás idejéig, majd a célnak megfelelően gyorsan, lassan vagy valamilyen közbenső módon lehűtjük.* Az eljárást **hőkezelésnek** nevezik.

A hőkezelés tehát egy munkadarab egészének vagy egy részének hevítése, hőntartása, majd hűtése pontosan meghatározott program szerint, anyagának meghatározott mechanikai, fizikai, vegyi tulajdonságainak kialakítása céljából. Attól függően, hogy milyen tulajdonságúvá akarunk alakítani egy ötvözetet, a hőkezelési eljárásoknak, mint később látni fogjuk, több *csoportja*, azon belül számos *fajtája* alakult ki. Ezek alkalmazása teszi lehetővé, hogy pl. az acél megmunkálásakor lágy, könnyen megmunkálható legyen, de a belőle készült fogaskerék már szívóssá, a fogak felszíne viszont keménnyé, kopásállóvá váljon. A hőkezelés által váltak szerszámok, eszközök megfelelő keménységűvé, éltartóvá, szilárdá.

A hőkezelő folyamatok korábban, gyakorlati tapasztalatok alapján alakultak ki. Műszaki, elméleti ismeretek hiányában számos, misztikus elképzelés kapcsolódott a hőkezeléshez. Ilyen például az, az ókori elképzelés, hogy a fegyver pengéjét a felkelő nap színére kell hevíteni, majd egy erős rabszolga szívébe mártva lehűteni, hogy ereje a pengébe szálljon át. Lényegében az eljárást ma is használjuk, csupán a hevítés hőmérsékletét nem a nap színéhez, hanem a vas-vaskarbid állapotábra GOS vonalához viszonyítjuk, hűtőközegként, pedig vizet, olajat használunk.

Csak a műszaki fejlődés, a fémfizika, metallográfia vizsgálati módszereinek és eszközeinek fejlődése teremtette meg a feltételeket a hőkezelés elméletének megalapozásához.

### 4.1 Acélok szerkezetének alakulása nem egyensúlyi viszonyok között

Az acélok (eutektoidos ötvözetek) a vas-vaskarbid állapotábrában a kisebb szénttartalmú, 2,06 % szénttartalomig terjedő **eutektoidos** mezőt foglalják el.

Mint a nevük is mutatja jellemző szövetelemük az eutektoid, más néven a **perlit**, ami a 0,8 %-os széntartalmú ausztenitből alakul ki 723 °C-on. Az átalakulás az állapotábránál ismertetett módon, csak egyensúlyi viszonyok mellett, vagyis nagyon lassú hűtésnél ( $v_h = 1 \text{ °C/min}$ ) megy végbe a leírtak szerint. A gyakorlatban, ipari körülmények között az alkatrészek hűtése szinte sohasem egyensúlyi. Ezért az átalakulás folyamata is attól eltérő lesz.

Ennek oka, hogy az átalakulás fizikai alapja a **diffúzió**. A diffúzióhoz, mivel az atomok hőmozgásán alapul, idő kell. Magasabb hőfokon, ahol a részecskék hőmozgása intenzívebb, sebességük nagyobb, kevesebb idő szükséges a diffúziós út megtételéhez, mint alacsonyabb hőfokon.

*A lassúbb hűtés esetén több idő áll rendelkezésre a részecskék „vándorlásához” a kristályrácsban (ausztenit-perlit átalakuláshoz), így a diffúziós utak hosszabbak lehetnek.*

*Gyorsabb hűtésnél diffúziós idő lerövidül, ezért az átalakulás eltérő módon megy végbe és egy bizonyos határon túl már a diffúzióra nem is áll rendelkezésre elegendő idő, vagyis az átalakulás nem lehet diffúziós jellegű.*

Az ebből származó anyagszerkezeti módosulás jelentős változást idéz elő az anyag mechanikai tulajdonságaiban is. Ezért a továbbiakban részletesebben megvizsgáljuk a hűtési sebesség ( $v_h$ ) változásának hatását az átalakulási folyamatokra.

#### **4.1.1 A hűtési sebesség növelésének hatása az átalakulási folyamatra**

A hűtési sebesség növelésének alapvetően kettős hatása van az átalakulási folyamatra:

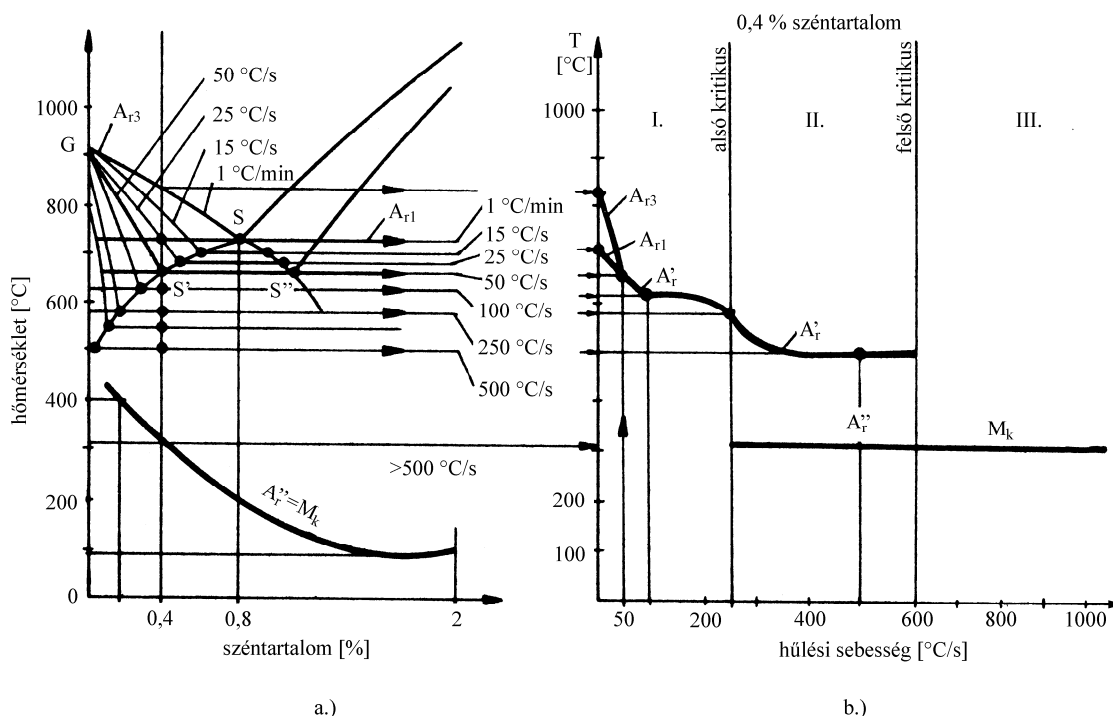
1. az átalakulási hőmérsékletek ( $A_{r1}$ ,  $A_{r2}$ ) alacsonyabb hőmérsékletek felé eltolódnak és közelítenek egymáshoz,
2. az eutektoidos **S** pont szétválak **S'** és **S''** pontokra. Ez azt jelenti, hogy gyorsabb hűtésnél a perlit széntartalma nem 0,8 % lesz, hanem az S'S'' szakasznak megfelelő lehet (4.1. ábra).

A 4.1/a. ábrán jól látható, hogy az egyensúlyi diagram hogyan változik a hűtési sebesség fokozásával, az állapotábra vonalak hogyan tolódnak lefelé. A 4.1/b. ábra szerint kb. 50 °C/s hűtési sebességnél egy 0,4 % széntartalmú acél esetében már az  $A_{r1}$  és  $A_{r2}$  hőmérsékletek egybeesnek, ezért a továbbiakban már  $A_r'$ -vel jelöljük.

Tovább növelve a sebességet  $A_r'$  értéke csökken, majd egy adott értéknél megszűnik, illetve egy jóval alacsonyabb értékre tolódik el, amely ezután már állandó lesz ( $A_r''$ ). Az is látható az ábrán, hogy az  $A_r'$  és  $A_r''$  hőmérsékletek bizonyos mértékben átfedik egymást.

Az átfedés kezdetét és végét meghatározó hűlési sebességek a **felső-**, illetve **alsó kritikus hűlési sebesség** ( $v_k$ ).





4.1. ábra Az átalakulási hőmérsékletek változása az egyensúlyi diagramban  
 a.) egyensúlyi diagram; b.) átalakulási hőmérsékletek

A diagramot a két kritikus hűlési sebességet jelölő vonal három mezőre osztja. Az **I. mező** a kritikusnál kisebb hűtési sebességek tartományát foglalja magába. Ilyen körülmények között van mód a diffúzióra, az ausztenitből **lemezes perlit** keletkezik. Ebben a hűtési sebességtartományban csupán a keletkező perlit lemezeinek vastagsága, finomsága változik. A sebesség növekedésével egyre **finomabb lemezes perlit** alakul ki.

A **II. sebességtartomány** átmeneti jellegű, a szomszédos mezők szövetelemeit egyaránt tartalmazza.

A **III. mező** szöveteleme már nem a perlit. Látható, hogy az átalakulás állandó és alacsony ( $M_k$ ) hőmérsékleten történik. A nagy hűlési sebesség miatt az átalakuláshoz rendelkezésre álló idő túl rövid, a diffúzióra nem elegendő. Az itt keletkező szövetelem a tűs szerkezetű **mertenzit**.

*Az ausztenit-perlit átalakulás - de általában a diffúziós átalakulások - időszükségletét a hőfok függvényében két tényező együttesen, ezek eredője határozza meg:*

1. a diffúzió időigénye egy adott hőfokon,
2. az „átalakulási hajlam” egy adott hőfokon.

A 4.2. ábra e két tényező jellegét, időbeni változását, valamint ezek eredő görbét mutatja be. A 4.2/a. ábrán a **diffúziós görbe** látható a **hőmérséklet – lg idő** függvényében. Magas ( $T_1$ ) hőmérsékleten lényegesen kevesebb idő ( $t_1$ ) szükséges a diffúzióhoz, mint alacsony ( $T_2$ ) hőmérsékleten ( $t_2$ ).

A  $\gamma$ - $\alpha$  átalakulás görbéjének lefutása az előbbivel ellentétes (4.2/b. ábra). Az  $A_1$  átalakulási hőmérséklet közelében ( $T_1$ ) hőfokon hosszú ( $t_1$ ) idő alatt megy végbe az átkristályosodás. Ha mélyen az átalakulási hőmérséklet alá hűtünk ( $T_2$ ) hőmérsékletre (nagy mértékű túlhűtést alkalmazunk), az átalakulás ideje rövid ( $t_2$ ).

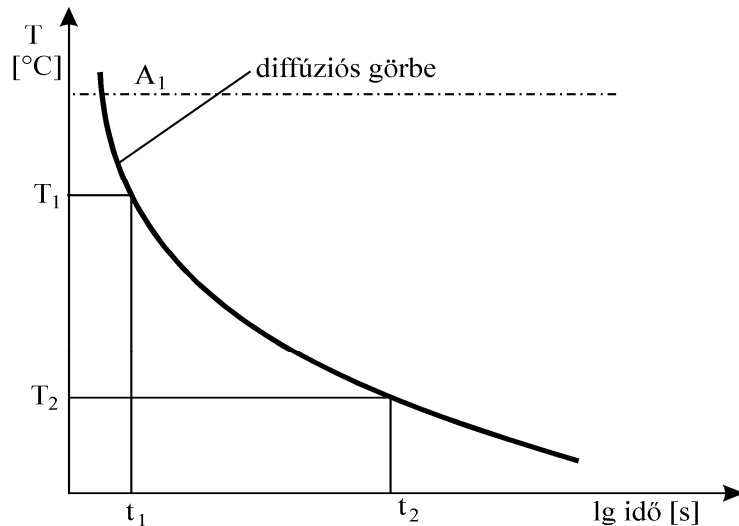
A két tényező együttesen határozza meg az átalakulás időszükségletét, ezért ezeket összegezni kell (4.2/c. ábra). A megszerkesztett eredő görbe pontjai adják meg az átalakulás időszükségletét egy adott hőmérsékleten. Az eredő görbe alakja egy C-betűre emlékeztet, ezért **C-görbének** nevezték el. A görbének a hőmérsékleti tengelyhez legközelebbi pontját pedig **orrpontnak** nevezik.

#### 4.1.2 Az idő-hőmérséklet-átalakulás (IHÁ) diagram

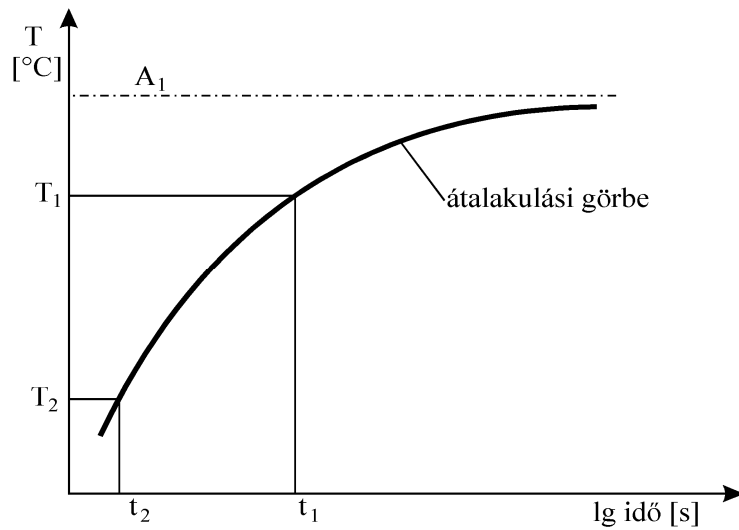
A 4.2. ábra csak a C-görbe szerkesztés elvét mutatja be eutektoidos összetétel (0,8% széntartalom) esetén. Az ausztenit-perlit átalakulás valóságos folyamatának bemutatásához még néhány kiegészítés és magyarázat szükséges.

Az átalakulás, mint már szó volt róla, időt igényel. Ezért a C-görbe mellett kell lennie egy másik C-görbének is. Az elsőnél elkezdődik az átalakulás, míg a másikon befejeződik. A kettő távolsága egy adott hőfokon az átalakulási idővel arányos. A két görbe aszimptotikusan közelít az  $A_1$  átalakulási hőmérséklethez (azt nem metszheti, hiszen  $A_1$  felett nincs átalakulás).

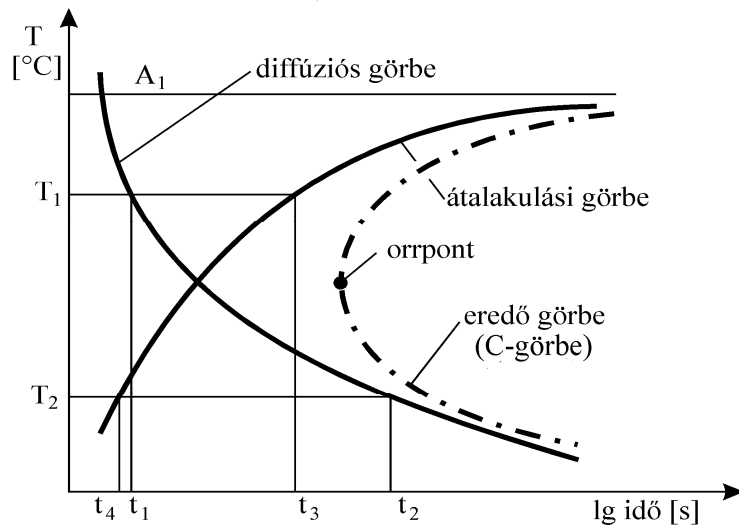
A mérések alapján megszerkesztett C-görbék alsó részét két egyenes vonal ( $M_k$  és  $M_v$ ) zárja le (4.3. ábra). A görbéket ezért S-görbéknek is nevezték. Mivel a görbék az ausztenit-perlit átalakulási folyamatot mutatják be az idő és a hőmérséklet függvényében, így **idő-hőmérséklet-átalakulás** diagramnak nevezik és IHÁ rövidítéssel jelölik a szakirodalomban. Az angol szakirodalomban a TTT, a németben a ZTU jelölést használja. Az első, méréseken alapuló és gyakorlatban felhasználható diagramokat DAWENPORT és BAIN készítették az 1930-as években.



a.)



b.)



c.)

4.2. ábra Az ausztenit-perlit átalakulás időszükséglete a hőmérséklet (túlhűtés) függvényében



A meredekebb vonalak gyorsabb hűtést jelentenek, az idő tengellyel párhuzamos vonalak viszont állandó hőmérsékletet, hőntartást jelölnek.

Az ábrán látható, hogy az 1-sel jelzett esetben, amikor az ötvözetet  $T_1$  hőfokra túlhűtjük, majd ezen a hőmérsékleten hőntartva hagyjuk átalakulni,  $t_2$  idő múlva átalakul perlitte.

A 2-sel jelzett esetben, amikor a túlhűtés nagyobb mértékű, akkor is a perlitmezőben fejeződik be az átalakulás. A különbség a két eset, illetve annak eredménye között az, hogy a második esetben alacsonyabb hőfokon a lassabb diffúzió miatt a diffúziós utak lerövidülnek, ezért a perlit cementit lemezei közelebb lesznek egymáshoz, vékonyabb lemezek alakulnak ki. Másként kifejezve a perlitmezőben lefelé haladva, egyre finomodnak a perlit lemezei, finomperlitet kapunk, ami növeli az acél szívósságát, keménységet.

Korábban a különböző finomságú perlitet különböző névvel illették. Azt, amelynek lemezei a mikroszkópon csak 250-szeresnél nagyobb nagyításnál különböztethetőek meg **sorbitnak**, azt pedig, amely csak 1000-szeres nagyítás felett megkülönböztethető, **troostitnak** nevezték.

A 3-sal jelzett gyors túlhűtés esetén kb. 400 °C-on tovább finomodik a szövetszerkezet és már az ausztenit nem finomlemezes perlitte, hanem tűs szerkezetű szövetelemmé alakul, amelyet E. C. BAIN-ről **bainit**-nek neveztek el. Ez lényegében egy átmeneti szövetelem, bár kialakulása még diffúziós folyamat.

A hűtés sebességét tovább növelve, elérkezünk egy olyan értékhez, amikor a hűtés sebességét ábrázoló vonal nem metsz bele a C-görbébe (vagyis nem indul meg ausztanit-perlit átalakulás). Azt a hűtési sebességet, amely éppen érinti az első, a baloldali C-görbét, (felső) **kritikus hűlési sebességnek** nevezik,  $v_{krit}$ -sal jelölik. Ennél gyorsabb hűtés mellett, már egyáltalán nem keletkezik perlit. Azt a hűtési sebességet, amely a második C-görbét érinti, alsó kritikus hűlési sebességnek nevezik, itt még mintegy 50% perlitte alakul át az ausztenit.

A 4-sel jelzett hűtés alapvetően különbözik az előzőektől. Nemcsak abban tér el, hogy gyorsabb, mint az eddig vizsgáltak, hanem abban is, hogy a hűtés vonala nem metszi a C-görbéket, vagyis a hűtés sebessége **nagyobb, mint a felső kritikus hűtési sebesség**. Így a hűtés vonala az  $M_K$  és az  $M_V$  vonalat metszi. Mivel a perlit a C-görbék mentén alakul ki, itt perlit nem keletkezik. Az átalakulás az  $M_K$  vonal elérésekor kezdődik és az  $M_V$  vonalnál fejeződik be. Az átalakulási idő igen kicsi, így itt diffúziós átalakulásról nem lehet szó. Egy olyan szövetelem alakul ki, amellyel eddig nem találkozhattunk, és amely nem diffúziós folyamat révén jön létre. Ez a tűs szerkezetű **martenzit**.

*Tehát az  $M_K$  az ötvözetre jellemző átalakulási hőmérséklet, amelyen megkezdődik az **ausztenit-martenzit** átalakulás. Az  $M_V$  szintén átalakulási hőmérséklet, ezen a hőmérsékleten befejeződik a martenzitté alakulás.*

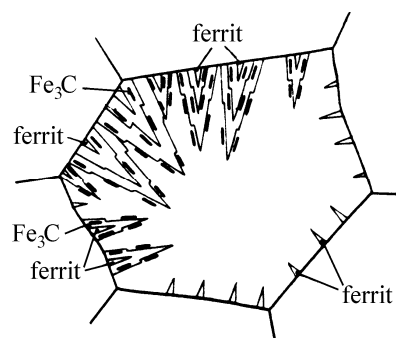
Az eddigieket összefoglalva elmondhatjuk, hogy egy eutektoidos széntartalmú acél ausztenites állapotából az  $\gamma$ - $\alpha$  átalakulás során, a hűtés sebességétől

függően különféle finomlemezes **perlitté**, **bainitté** vagy **martenzitté** alakulhat át.

A 4.3. ábrán bemutatott C-görbe egy eutektoidos acél IHÁ diagramja izotermális (adott állandó hőfokon történő) átalakulás esetén.

#### 4.1.3 Az ausztenitnek bainitté, martenzitté alakulása

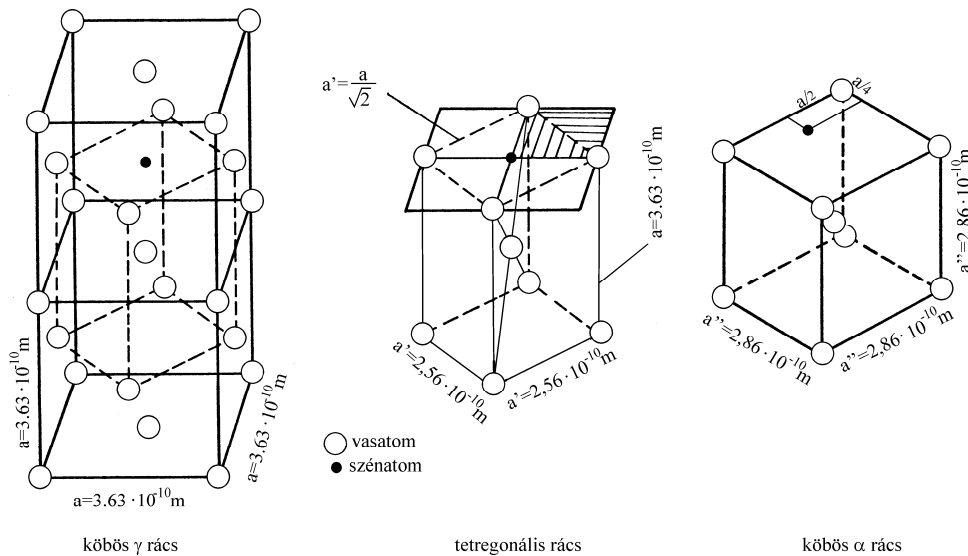
Az ausztenit perlitté alakulásának folyamatát a vas-vaskarbid állapotabránál már részletesen ismertettük. Az **ausztenit-bainitté alakulása** bár szintén diffúziós folyamat, abban tér el a perlites átalakulástól, hogy az ausztenit szemcsék határa mentén nem cementit-, hanem ferritcsírák képződnek, majd nőnek tovább ferrit tűkké (4.4. ábra). A nagymérvű túlhűtés miatt, kicsik a diffúziós utak, nagy a kristályosodási képesség, ezért finom szerkezetű lesz a szövetelem. Mikroszkópon vizsgálva az is látszik, hogy a perlittől eltérően nem lemezes, hanem tűs szerkezetű lesz. A ferritcsírákból alakulnak ki a **ferrit tűk**, és ezeknek a felületére a szén **cementit korongocskák** formájában válik ki. A ferrit tű növekedése során a cementit korongokat benövi, de ezt további kiválás követi a teljes átalakulásig. Felépítéséből adódóan a **bainit szilárdsága** és keménysége nagyobb, mint a perlité, nyúlása viszont kisebb.



4.4. ábra Az ausztenit bainitté alakulása

A **martenzit keletkezése** alapvetően különbözik a többi szövetelem kialakulásától. Nem diffúziós folyamatban jön létre, hiszen a felső kritikus hűlési sebességnél gyorsabb hűtés miatt nincs elég idő a széndiffúzióra. Itt az  $\gamma$ - $\alpha$  átalakulás sajátos módon, az atomok vándorlása nélkül, azok kis elmozdulásával megy végbe, és így alig van időigénye.

Az átalakulásnak ezt a fajtáját 4.5. ábrán figyelhetjük meg. Az egyszerűség kedvéért csupán két, egymáson elhelyezkedő,  $\gamma$ -rácstípusú ausztenit elemi cellát vizsgálunk, amelyben egy interosztíciósan oldott szénatomot is feltüntettünk.



4.5. ábra Az ausztenit martenzitté alakulásának vázlatja

Ennek helye, mint korábban szó volt róla, az elemi cella közepén van. A lapközépes köbös  $\gamma$ -rács mérete  $a = 3,63 \cdot 10^{-10}$  m.

Ha az ábra szerint a lapközépen lévő vasatomokat szaggatott vonallal összekötjük, egy tetragonális (négyzetes oszlop) elemi cella áll elő, amely **térközepes** (középen is egy vasatommal). A  $\gamma$ -rács egy lapközépen lévő atomja ebben a rácsban térközépre esik, a szénatom, pedig lapközépre. Ez a tetragonális rács úgy jött létre, hogy még a szénatom is a helyén maradt, de most lapközépre került. A tetragonális rács, ami lényegében az egyik irányban „megnyúlt kocka”, felvehetné a köbös formát. Ez azonban azért nem lehetséges, mert a térközépen lévő vasatom és az ábrán pont felette, lapközépen lévő szénatom mérete ezt nem teszi lehetővé. Ha a szénatom a lap közepéről eldiffundálhatna oda, ahol a legnagyobb üres hely van a térközepes köbös rácsban, vagyis az  $\left(\frac{1}{2}a; \frac{1}{4}a; 0\right)$  koordinátájú helyre, akkor a

tetragonális martenzit rács, térközepes köbös ráccsá alakulhatna. A nagyon gyors hűtés miatt erre a diffúzióra nincs lehetőség, így a beékelődött szénatomok feszítik tetragonálissá torzítva a rácsot, az acélban jelentős feszültséget hoznak létre, ami az acél keménységét okozza. Az az ausztenit poliéderez krisztallitjából kemény, tűs szerkezetű szövetelem jön létre, amit A. Martens kutatóról **martenzitnek** neveztek el. A martenzit keménysége 800-1000 HV, az elemi cella rövidebb élének hossza az ábrán feltüntetett geometriai összefüggések alapján:

$$a' = \frac{a}{\sqrt{2}} = 2,56 \cdot 10^{-10} \text{ m.}$$

Magassága megfelel a korábbi  $\gamma$ -rács magasságának.

Ez a tetragonális rácsszerkezetű szövetelem a gyakorlatban sokszor túl rideg. Ha azonban alacsony,  $M_k$  alatti hőmérsékleten hőntartják és ezzel egy bizonyos fokú diffúziót biztosítanak, akkor a beékelődött szénatomok egy része ún.  **$\epsilon$ -karbid** formájában ( $\text{Fe}_{12}\text{C}_5$ ) kiválik. A kiválás és

feszültségcsökkenés hatására a tetragonális martenzit köbös szerkezetűvé alakul. Az átalakulás következtében keménysége kis mértékben csökken. A tetragonális rácsból kialakuló köbös rács mérete az azonos térfogat alapján az ábra szerint:

$$\sqrt[3]{2,56 \cdot 2,56 \cdot 3,63} \cong 2,86 \Rightarrow \text{tehát } a'' = 2,86 \cdot 10^{-10} \text{ m.}$$

Mikroszkópon vizsgálva mind a tetragonális, mind a köbös martenzit szövete képe tús szerkezetet mutat.

Természetesen az acélnak a rácsszerkezetében nem minden üres helyen van szénatom. Ha minden üres helyre beékelődne szénatom, akkor az ötvözet széntartalma 33 % lenne, az acél széntartalma pedig legfeljebb 2,06 %.

Az ausztenitben körülbelül minden második-harmadik, a martenzitben csak minden ötödik rácselemben van egy-egy szénatom.

Ez azt is jelenti, hogy az acélban csak azok az elemi cellák torzulnak a gyors hűtés következtében, amelyekben szén van oldva, így tehát csak egy *átlagos rácstorzulásról* beszélhetünk. A nagyobb rácstorzulás nagyobb feszültséget hoz létre az anyagban, ami nagyobb keménységet jelent. A gyors hűtés hatására sem ékelődik be minden szénatom.

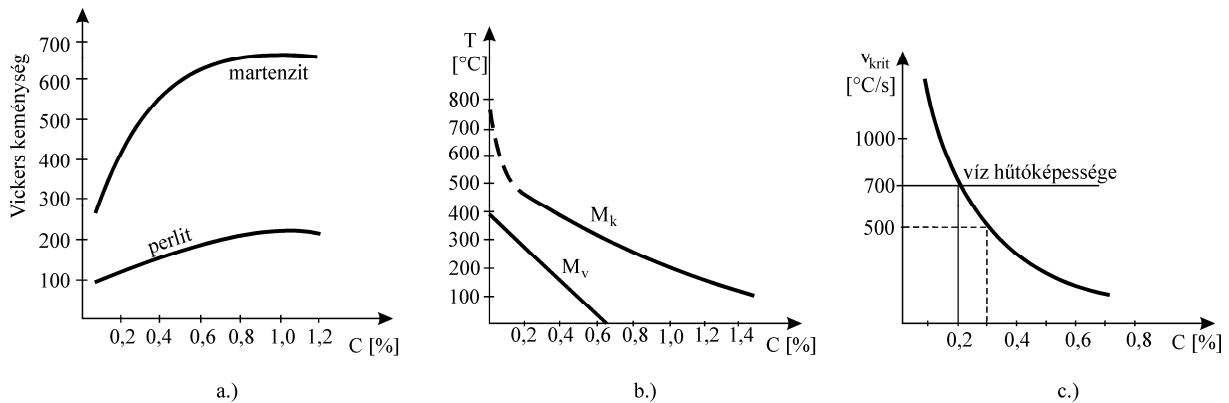
Ha tehát az ausztenit széntartalma nagy, egy adott hűtési sebességnél, nagy valószínűséggel több szénatom ékelődik be és így keményebb lesz, mint kisebb széntartalom esetén. Ennek alapján az is belátható, hogy egy bizonyos széntartalom felett, ha túl sok szénatom ékelődik be, az anyag szilárdságát meghaladó feszültség is létrejöhet, az ötvözet megrepedhet.

A széntartalomnak jelentős hatása van a  $\gamma$ - $\alpha$  átalakulásra (4.6. ábra). Bizonyos széntartalom alatt már olyan kevés a szénatom, hogy ha azok mind beékelődnének is a hűtés során, jelentős belső rácstorzulást, így keménységnövekedést nem tudnának előidézni. Ez magyarázza azt a tényt, hogy az ausztenit-martenzit átalakulás során nagyobb széntartalom esetén kisebb a kritikus hűtési sebesség, míg kisebb széntartalomnál gyorsabb hűtés szükséges és van a széntartalomnak egy határértéke, amely alatt már nem érhető el jelentős keménységnövekedés.

Az ausztenit széntartalma befolyásolja a belőle kialakuló szövetelemek (perlit vagy martenzit) keménységét (4.6/a. ábra). A keménységnövekedés azonban nem áll egyenes arányban a széntartalommal. Az ábra szerint a keménység csak egy bizonyos széntartalomig nő (kb. 0,8%-ig), azután stagnál, sőt csökken. Erre a jelenségre a magyarázatot a martenzit szerkezetében, tulajdonságaiban kell keresni, ugyanis a martenzitté alakulás térfogat növekedéssel jár (kockából négyzetes oszloppá nyúlik az elemi cella). Legkisebb fajtérfogata az ausztenitnek, legnagyobb a martenzitnek van. A már átalakult martenzites krisztallitok térfogata növekedett, így nyomást fejt ki a még át nem alakult ausztenit szemcsékre. Ha a már átalakult krisztallitok egy-egy ausztenit krisztallitot körülvesznek, arra olyan nyomást gyakorolhatnak, hogy azok nem tudnak átalakulni, hiszen ezek átalakulása is térfogattöbblettel járna. Így ezek az ausztenit krisztallitok környezeti



hőmérsékleten is megmaradnak, csökkentve az anyag keménységét. Ezt a megmaradt ausztenitet **maradék ausztenitnek**, idegen szóval **reszt-ausztenitnek** nevezik.



4.6. ábra A szénttartalom hatása a  $\gamma$ - $\alpha$  átalakulás során

a.) keménységre, b.) az  $M_k$  és  $M_v$  vonalak hőmérsékletére c.) kritikus hűlési sebességre

*A maradék ausztenit hosszabb idő alatt magától is átalakul martenzitté (ami méretváltozással jár), de a folyamat meggyorsítható, ha csökkentik a feszültséget az anyagban (pl. mélyhűtéssel). Erről részletesebben szó lesz a hőkezelési eljárásoknál.*

Az ausztenit nem teljes átalakulását csak részben indokolja az anyagban ébredt belső feszültség nagysága. Az átalakulást befolyásolja a C-görbéknél megismert  $M_k$  és  $M_v$  vonal elhelyezkedése is. Az ezeknek megfelelő hőmérséklet ugyanis nem állandó, hanem függ a szénttartalomtól. Ezt mutatja be a 4.6/b. ábra, amely szerint egy 0,4 % szénttartalmú ötvözet esetén a martenzites átalakulás kb. 370 °C-on kezdődik ( $M_k$ ) és mintegy 160 °C-on fejeződik be ( $M_v$ ). Az ábrán az is megfigyelhető, hogy a két átalakulási hőmérséklet a szénttartalom növekedésével egyre alacsonyabb hőfokra tolódik, és az  $M_v$  vonal 0,65% C-tartalomtól negatív hőmérsékleti tartományba lép át, ami azt jelenti, hogy a 0,65%-nál nagyobb szénttartalmú acélok szobahőmérsékletig történő hűtése esetén, ausztenit marad vissza bennük.

A szénttartalom a kritikus hűlési sebességre ( $v_{krit}$ ) is hatással van (4.6/c. ábra). Kisebb szénttartalomnál erősebben, majd csökkenő mértékben, de folyamatosan csökkenti azt. Az ábra alapján meghatározható, hogy milyen szénttartalomhoz, milyen kritikus hűlési sebesség tartozik (pl. az ábra szerint a 0,4% szénttartalmú acél kritikus hűlési sebessége kb. 500 °C/s).

Ha figyelembe vesszük, hogy a műszaki gyakorlatban a legnagyobb hűlési sebességet a hideg vízzel lehet elérni, ami kb. 750 °C/s-nak felel meg, akkor látható, hogy 0,3% -nál kisebb szénttartalmú acélok esetében nem lehet a  $v_{krit}$ -nál nagyobb hűlési sebességet biztosítani a martenzites átalakuláshoz.

Mindent figyelembe véve az auszteni-martenzit átalakulás sajátosságai a következőkben foglalhatók össze:

- a martenzitté alakulás diffúziómentes átalakulás,
- a martenzitté alakulás kezdő- ( $M_k$ ) és véghőmérséklete ( $M_v$ ) a hűtés sebességétől független, a szénttartalomtól függ,
- a martenzit keménysége függ a szénttartalomtól,
- a martenzit egyfázisú szövetelem,
- a tetragonális martenzitet, alig kisebb keménységű köbös martenzitté lehet alakítani  $M_k$  hőmérséklet alatti hőntartással.

#### **4.1.4 Az acélok IHÁ diagramjainak főbb típusai**

A C-görbék szerkesztését és sajátosságait egy eutektoidos (0,8% szénttartalmú) ötvözet esetében tekintettük át. Az acél IHÁ diagramját az ötvözet összetétele befolyásolja, vagyis **ahány ötvözet, annyi C-görbe létezik**. Az acélok azonban két típusba, hipo- vagy hipereutektoidos csoportba sorolhatók. Ezek C-görbéje az ismertetett eutektoidoshoz képest némiképp kiegészítésre szorulnak.

A vizsgálatok során az alkalmazott hűtési eljárás is befolyásoló tényező, kétféle típusú lehet. Az eddig ismertetett esetben az ún. **izotermális hűtésre** vonatkozó diagramot mutattuk be. E hűtési típus esetén az acélt túlhűtöttük egy adott hőfokra, majd ezen az állandó hőmérsékleten (izotermán) tartottuk, amíg végbe nem ment az átalakulás. Az ötvözetet csak ez után hűtöttük szobahőmérsékletre.

Hűthetjük az ötvözetet úgy is, hogy a hőmérséklet állandóan, folyamatosan csökken. Ezt **folyamatos hűtésnek** nevezik.

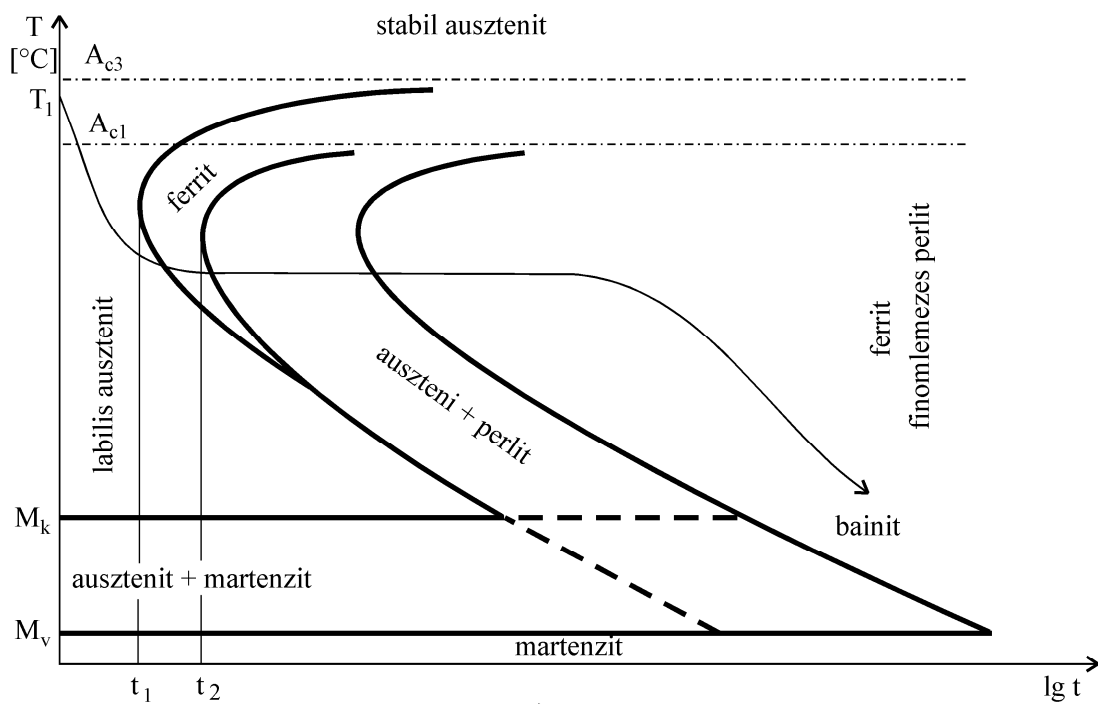
Az ötvözet fajtája és a hűtés módja alapján a továbbiakban négy fő típusát mutatjuk be az IHÁ diagramoknak:

1. hipoeutektoidos acélok izotermális átalakulási diagramja,
2. hipereutektoidos acélok izotermális átalakulási diagramja,
3. hipoeutektoidos acélok folyamatos átalakulási diagramja,
4. hipereutektoidos acélok folyamatos átalakulási diagramja.

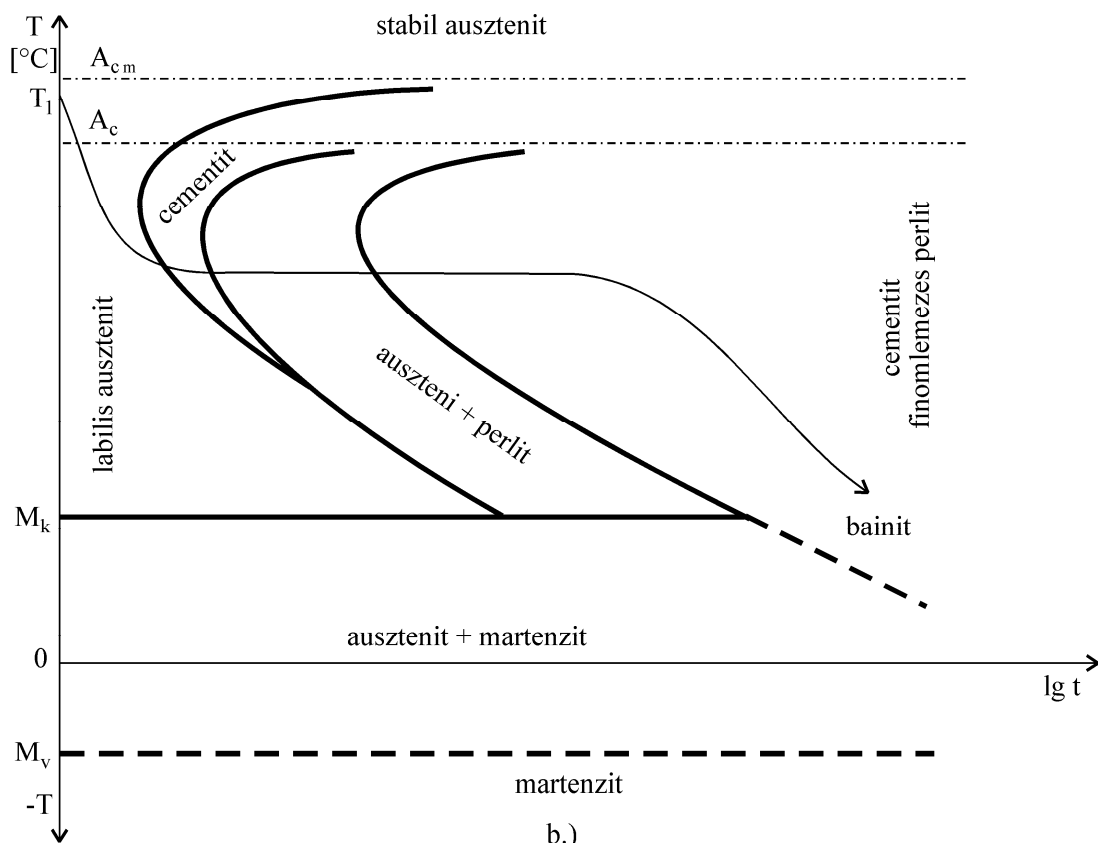
#### **4.1.5 Acélok izotermális IHÁ diagramja**

A **hipoeutektoidos** acélok esetében az ausztenit 0,8%-nál kisebb széntartalma miatt az átalakulást a vasban dús ferritképződésnek kell megelőznie (4.7. ábra). Ennek során dúsul az ausztenit széntartalma eutektoidos összetételre. Az ilyen típusú IHÁ diagramokban megjelenik egy ún. *proferritképződést* jelző vonal (harmadik C-görbe, amely tart az  $A_3$  átalakulási hőmérséklet vonalához), mint azt a 4.7/a. ábrán látható.

Az ábrán berajzolt hűtés mellett  $t_1$  lappangási idő után ferritképződéssel indul meg az átalakulási folyamat, majd  $t_2$  idő után a kialakult ferrit miatt az ausztenit széntartalma feldúsult az eutektoidos értékre, így megindulhat ismert módon az átalakulás.



a.)



b.)

4.7. ábra Izotermikus átalakulási diagramok  
a.) hipoeutektoidos acéloknál, b.) hipereutektoidos acéloknál

Az ábrán az is megfigyelhető, hogy gyors, az orrpontot elkerülő hűtés esetén elmarad a proferritképződés. Ezt az eutektoidos **S** pontnak a gyors hűtés

hatására történő S' és S'' pontokká alakulása magyarázza, amint azt a 4.1. ábránál ismertettünk. Itt a két pontnak megfelelő széntartalom mezőben tisztán martenzit alakul ki, nincs ferritképződés.

A **hipereutektoidos** acéloknál, mivel az eutektoidosnál nagyobb a széntartalom, a szénkiválás miatt cementit képződésével indul az átalakulási folyamat izotermális hűtés esetén (4.7/b. ábra). A harmadik C-görbe, ami itt az  $A_{cm}$  hőmérséklet vonalához tart, ezt a folyamatot jelzi.  $A_{cm}$  hőmérséklete a vas-vaskarbid állapotábra SE-vonalának felel meg, így értéke a széntartalomtól függ.

#### 4.1.6 Acélok folyamatos IHÁ diagramja

A hőkezelési eljárásokat a gyakorlatban legtöbbször folyamatos hűtéssel hajtják végre (4.8. ábra). Az átalakulások folyamatos hűtés mellett is a már megismert módon mennek végbe, de az izotermális eljárásokhoz képest azonban néhány eltérést figyelembe kell venni:

- kissé módosul a diagramokban a C-görbék alakja és más vonalaké is,
- az átalakulás kezdetét jelző vonalak felfelé, a magasabb hőmérsékletek felé, az átalakulás végét jelző vonalak lefelé az alacsonyabb hőfokok irányába tolódnak el,
- mivel ezek a diagramok folyamatos hűtésnek megfelelő diagramok, csak folyamatos hűtési görbe mentén van értelme őket vizsgálni.
- A gyakorlatban használatos hűtőközegek, mint a víz, olaj, levegő, folyamatos hűtési görbéit mérésekkel határozták meg.

A **hipoeutektoidos** acélok folyamatos átalakulási diagramját a 4.8/a. ábra mutatja be. Az 1-es és a 2-es hűtési sebességet jelölő vonal mentén leolvasható, hogy tisztán martenzites lesz az ötvözet az átalakulás végére. A 2-es hűtési sebesség éppen a felső kritikus hűtési sebesség értéknek felel meg. A 3-as jelű hűtés következtében olyan szövetelemek alakulnak ki, amilyen mezőket metsz a görbe. Előbb ferrit, majd perlitkiválással kezdődik a folyamat, azután bainit, majd martenzit keletkezik. Így az átalakulás végén az ötvözet ferritből, perlitből, bainitből és martenzitből áll. A 4-es jelű lassú hűtés hatására az ötvözet, a folyamat elején kialakuló ferrit mellett, jórészt perlitből fog állni.

A **hipereutektoidos** acélok IHÁ diagramja folyamatos hűtés esetén a 4.8/b. ábra szerint alakul. Itt hosszabb lappangási idő után indul meg az átalakulás, az  $M_k$  vonal jelentősen eltolódott az alacsonyabb hőmérsékletek irányába és az  $M_v$  vonal már negatív hőmérsékleti mezőbe esik. A különböző sebességű hűtéssel kialakuló szövetelemeket az eddigiekhez hasonló módon lehet meghatározni.

## 4.2 A hőkezelési eljárásokat befolyásoló tényezők

*Az eddigiek alapján láthatjuk, hogy a hőkezelési eljárás során az acél tulajdonságai úgy alakulnak, ahogyan azt a kialakuló szövetelemek meghatározzák. Azt, hogy a hőkezeléskor milyen szövetelemek alakulnak ki, többféle hatás is befolyásolja. Ezek négy tényezőben foglalhatók össze, amelyek a következők:*

1. *hevítés hőfoka,*
2. *hőntartás ideje,*
3. *az acél kritikus hűlési sebessége,*
4. *az alkalmazott hűtési sebesség.*

### 4.2.1 A hevítés hőfoka

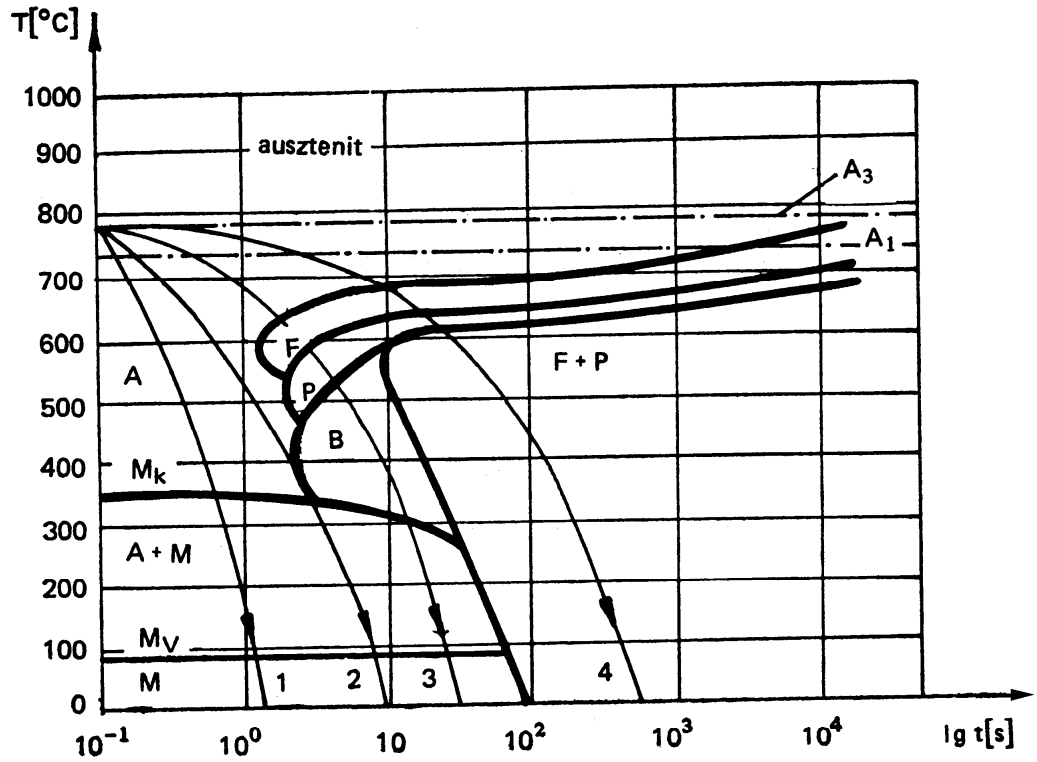
A legtöbb hőkezelési eljárásnál az  $\gamma$ - $\alpha$  átalakulás során lejátszódó folyamatot befolyásoljuk oly módon, hogy különböző hűtési sebességet alkalmazunk. Hevítéskor tehát cél az ausztenites állapot elérése. Ez azt jelenti, hogy a vas-vaskarbid állapotábrában a GSE vonal fölé az ausztenit mezőbe kell felhevíteni az ötvözetet. Konkrét hőfokot csak egy adott összetétel esetén lehet meghatározni, mivel minden széntartalomnál más és más az értéke.

Hevítéskor, ha éppen az átalakulási hőmérsékletre hevíténénk fel egy alkatrészt, az azt jelentené, hogy mire kivesszük a hevítő berendezésből a munkadarabot, és mielőtt áthelyezzük a hűtőközegbe, hőmérséklete már az átalakulási hőmérséklet alá esne vissza. Azért, hogy az acél elegendő hőtartalékkal rendelkezzen, kissé (30-50 °C-kal) a GSE vonal fölé kell hevíteni. Ha viszont a hevítés hőmérséklete ennél nagyobb mértékben meghaladja az átalakulási hőmérsékletet, az **acél túlhevítéséről** beszélünk, ami káros, mivel szemcsedurvulást idéz elő, és ezáltal, rontja a szilárdsági tulajdonságokat, valamint gazdaságtalan is.

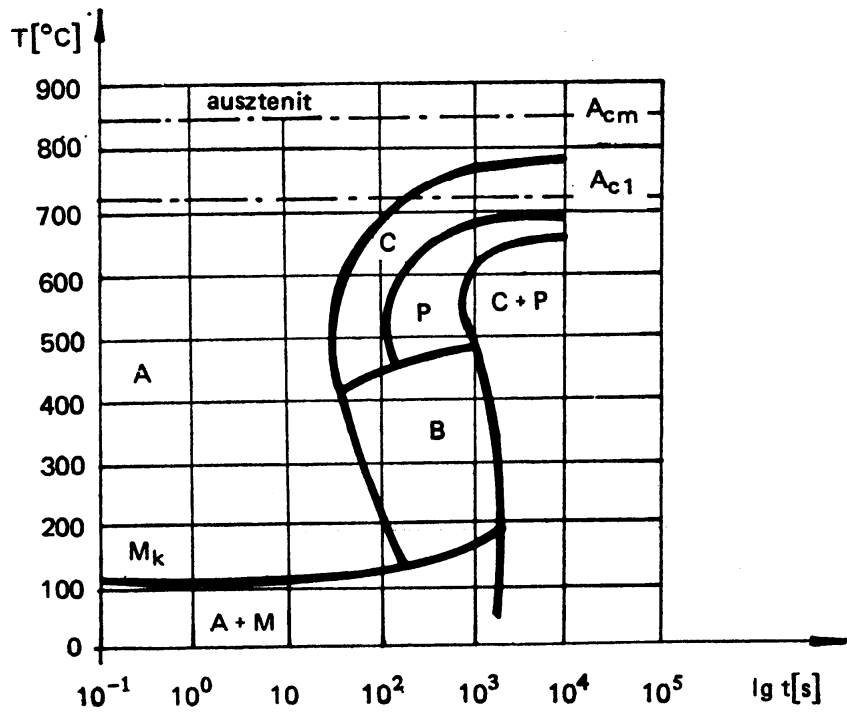
Ha az acél túlhevítése már olyan mértékű, hogy az alkatrész kisebb keresztmetszetű részeinek hőmérséklete megközelíti a szoliduszt hőmérsékletét, a kristallitok határán oxidáció lép fel, esetleg az olvadás is megkezdődik, akkor az **acél elégetéséről** beszélünk. A túlhevített acél még további hőkezeléssel javítható, bár ez költségnövekedést okoz. Az elégett acél már nem javítható, így selejté válik.

Az sem lényegtelen, hogy a kívánt, optimális hevítési hőfokot milyen gyorsan érjük el. A **hevítés sebességének** megválasztását szintén több tényező befolyásolja:

1. anyag hővezető képessége, ami függ az összetételtől,
2. alkatrész mérete, tömege,
3. alkatrész tagoltsága.



a)



b)

4.8. ábra Átalakulási diagramok folyamatos hűtés esetén  
 a) hipoeutektoidos acéloknál, b) hipereutektoidos acéloknál.

Az erősebben ötvözött, nagyobb szénttartalmú, nagyobb méretű acélok eléggé érzékenyek a gyors hőmérsékletváltozásra, különösen alacsonyabb (650 °C-alatti) hőmérsékleten. Itt ugyanis még nem eléggé szívós az acél. Az ilyen acélok hevítésénél egyenletes, lassú hevítést kell alkalmazni, esetleg ajánlatos több fokozatban végrehajtani a hevítést úgy, hogy az egyik kemencében előmelegített acélt áthelyezzük egy másik kemencébe, amelynek hevítési hőfoka megfelel az elérendő hőmérsékletnek. Szénacélok esetében vehetjük a hevítés időtartamát annyi percnek, ahány milliméter az alkatrész átmérője (pontosabb adatokat a „Hőkezelés gyakorlata c. fejezet tartalmaz).

#### **4.2.2 A hőntartás ideje**

Ha az alkatrész hőmérséklete elérte az átalakulási hőmérsékletet, további időre van szükség, hogy teljes keresztmetszetében végbemehessen a tervezett szerkezeti átalakulás (pl. az  $\alpha$ - $\gamma$  átalakulás). Ezt az időt nevezzük **hőntartási időnek**, amibe természetesen nem számít bele a hevítés ideje. Ha a hőntartás  $A_{c3}$  felett túlságosan elnyúlik, akkor hasonló jelenség (pl. szemcsedurvulás) lép fel, mint túlhevítéskor. A hőntartási idő szénacélok esetében hozzávetőlegesen negyed része a hevítési időnek.

#### **4.2.3 Az acél kritikus hűlési sebessége**

Az acélok kritikus hűlési sebessége az acél minőségétől, az ötvözők mennyiségétől függ. Szinte valamennyi ötvöző, így a szén is, mennyiségétől függő mértékben a C-görbék az idő tengely mentén eltolja az origótól távolodó irányába. Így az orrpont távolabb kerül a hőmérséklet tengelytől. Ez azt jelenti, hogy lassúbb hűtéssel (kevésbé meredek hűlési görbével is) el lehet elkerülni az orrpont.

#### **4.2.4 A hűtés sebessége**

A hűtés sebességén az anyagban előidézett, időegységre jutó hőfokcsökkenést értjük. Ennek nagysága az idő egység alatt elvont hőmennyiségtől, az alkalmazott hűtőközegtől függ. Az ipari gyakorlatban különféle hűtőközeget, és ezeknek megfelelően különféle sebességű hűtési fokozatokat alkalmaznak.

**Normál** hűtésnek nevezik, amikor az acélt nyugodt, szellőmentes levegőn hűtik (pl. hűtőaknában). **Lassú** hűtésről beszélünk, ha a hűtőközeg száraz homok vagy hamu. Ha a hűtést zárt dobozban, vagy csökkenő hőmérsékletű kemencében hajtják végre, a hűtés sebessége tovább csökkenthető.

A normál hűtésnél nagyobb hűtési sebességet **gyors** hűtésnek nevezik. Ilyen hűtést biztosít a levegőáram, az olaj, a víz. Gyakorlatban a hideg víznél gyorsabban nem tudunk hűteni.

Attól függően, hogy milyen hőfokra hevítjük az acélt, és hogyan tartjuk hűn, valamint az acélnak milyen a szén-, illetve ötvözőtartalma (más szóval milyen a kritikus hűlési sebessége), továbbá, hogy milyen hűtési módot alkalmazunk, a hőkezelési eljárásoknak számos fajtája alakul ki, különféle célja lehet.

### 4.3 Acélok hőkezelési eljárásai

Az acélokhöz kialakított sokféle hőkezelési eljárást könnyebben áttekinthetjük, ha a hőkezelés eredménye, az elért tulajdonságok alapján csoportosítjuk azokat. Így ezeknek öt fő csoportját különböztethetjük meg:

1. kiegyenlítő hőkezelések,
2. lágyító hőkezelések,
3. keménységfokozó hőkezelések,
4. szívósságot fokozó hőkezelések,
5. kéregötvöző hőkezelési eljárások.

Ezek mindegyike több hőkezelési eljárást foglal magába. A hőkezelési eljárások hevítési-hőntartási-hűtési folyamatát diagramokon célszerű ábrázolni. Ez oly módon történik, hogy előbb a hőmérséklet-összetétel diagramon (ez lényegében a vas-vaskarbid állapotábrának a bal alsó része) bemutatjuk be a szénttartalomtól függően, milyen hőfokra kell hevíteni az acélt, majd egy hőmérséklet-ideő diagramban a hőntartás időtartamát és az alkalmazandó hűtés sebességét is ábrázoljuk.

#### 4.3.1 Kiegyenlítő hőkezelési eljárások

Az eljárások célja az acélban előforduló „kiegyenlítetlenségeknek” egész keresztmetszetre történő kiegyenlítése. Az acélban a gyártás, a megmunkálások során kialakulhatnak különböző szénttartalmú, ötvözöttségű, szemcseméretű, szemcsealakú, feszültségállapotú részek. Ez az inhomogenitás károsan befolyásolja a felhasználhatóságot. Attól függően, hogy minek a kiegyenlítését szolgálja a hőkezelési eljárás a következő fajtái alakultak ki:

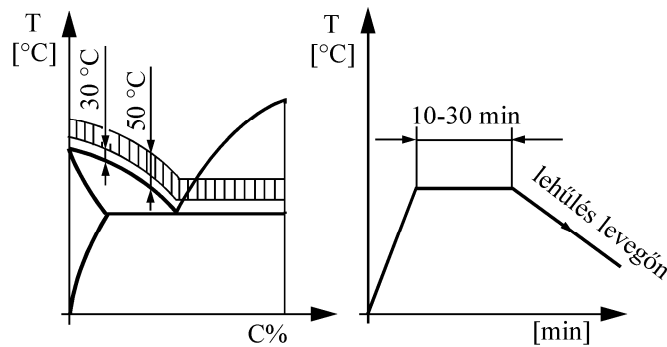
1. normalizálás,
2. újrakristályosítás,
3. diffúziós hőkezelés,
4. feszültségcsökkentés.

#### **A normalizálás**

Más néven átkristályosító izzítás célja acélöntvények, hidegen vagy melegen alakított, hegesztett acélok túlhevített, dűrvaszemcsés, egyenlőtlen méretű szerkezetének javítása. A túlhevített acélok normalizálással való javítását regenerálásnak is nevezik. Csak a túlhevített, de nem az elégetett acél javítható ilyen módon.

Normalizáláskor az acélt az ausztenit mezőbe hevítik fel, majd megfelelő idejű (általában 10-30 perc) hőntartás után nyugodt, szellőmentes levegőn hűtik (4.9. ábra). Normalizálás után a hipoeutektoidos acélok szövetszerkezete ferrit-perlites, a hipereutektoidosé pedig perlites, illetve perlit-cementites lesz.





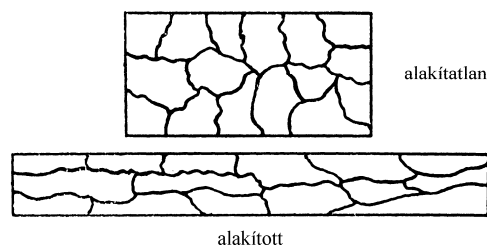
4.9. ábra Normalizálás

### Újrakristályosítás (visszakristályosítás)

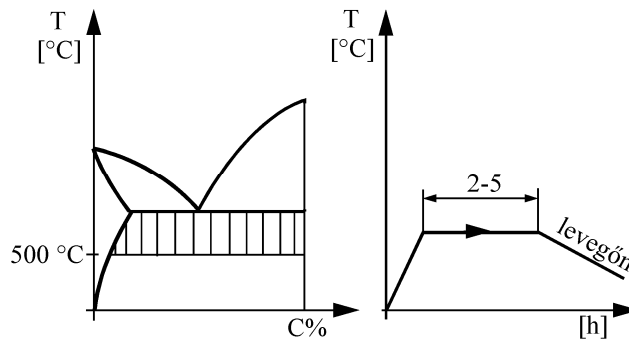
A hidegen húzott rudak, csövek, mélyhúzott lemezek, hidegen alakított, kis szénttartalmú acélok hőkezelési eljárása, mert kristallitjaik megnyúlnak, deformálódnak a megmunkálás hatására és bennük feszültség marad vissza (4.10. ábra). Ennek hatására szilárdsága nő, keménysége fokozódik, de szívóssága csökken, alakíthatósága romlik. A hidegalakítással járó ridegedés, szemcsetorzulás újrakristályosítással megszüntethető, mivel ilyenkor új kristallitok alakulnak ki a hidegen alakított, torzult szemcsék helyén. A szemcseátalakulás legalacsonyabb hőmérsékletét **újrakristályosodási hőmérsékletnek** nevezzük.

Az acélt hidegalakítás után vagy közben újrakristályosító hőkezelésnek vetik alá. Az újrakristályosítás hőmérsékletét és időtartamát mindenkor az alakítás mértéke alapján kell meghatározni. Hőmérséklete ne legyen sokkal magasabb az újrakristályosítás hőmérsékleténél, különben a szemcsedurvulás lép fel. Ha az alakítás mértéke miatt magasabb hőfokú hevítést kellene alkalmazni, akkor célszerű más eljárást választani.

Az újrakristályosításkor a hevítés hőmérséklettartománya az  $A_{c1}$  átalakulási hőmérséklet és  $500\text{ °C}$  közé esik (4.11. ábra). A szükséges hőntartás 2-5 óra. Magasabb hőfokhoz kevesebb hőntartási idő tartozik. A hőntartást normálhűtés követi. A kialakult szövetszerkezet ferrit-szemcsés perlit lesz.



4.10. ábra Kristallitok alakváltozása képlékeny alakítás hatására

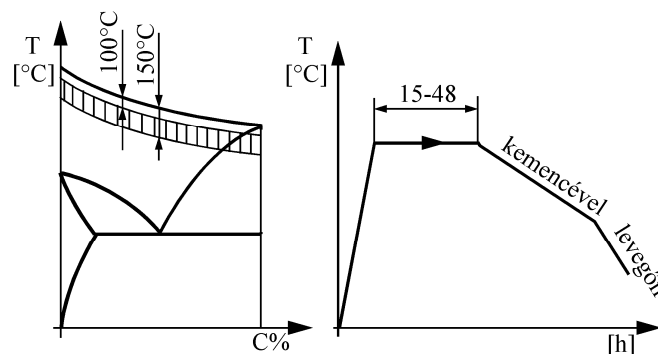


4.11. ábra Újrakristályosítás

### Diffúziós hőkezelés

Az öntvények különböző részei nem egyszerre szilárdulnak meg a formában, ezért a különböző részeknek a szemcsefinomsága, vegyi összetétele különböző lesz. A vas ötvözetek szennyezői, ötvözői, fémes és nemfémes elemek dúsulásokat hozhatnak létre az acélban, amelyek károsak a szilárdsági tulajdonságokra, hőkezelés közben repedéseket okozhatnak. A dúsulások diffúziós hőkezeléssel csökkenthetők vagy szüntethetők meg. Alkalmazásával lényegesen javul a vasötvözetek szívóssága.

A diffúziós izzítás hőmérséklete magas, 1050-1200 °C. Ez azt jelenti, hogy az acélokat közvetlenül a szolidusz alá hevítik 100-150 °C-kal (4.12. ábra). A hőntartási idő az acél összetételétől és a szelvény vastagságától függ, néhány órától, akár több napig is tarthat (15-48 óra). A hűtés kemencével együtt, majd alacsonyabb hőfokon levegővel történik. Mivel ez a hőkezelési eljárás a diffúzió alapul, az átalakulás annál tökéletesebb, minél magasabb hőfokra hevítjük az acélt és minél hosszabb a hőntartási idő. Ennek hatására szemcsedurulás léphet fel, de ez további hőkezeléssel (pl. normalizálással, plusz költséggel) utólag javítható.



4.12. ábra Diffúziós hőkezelés

### Feszültségcsökkentő izzítás

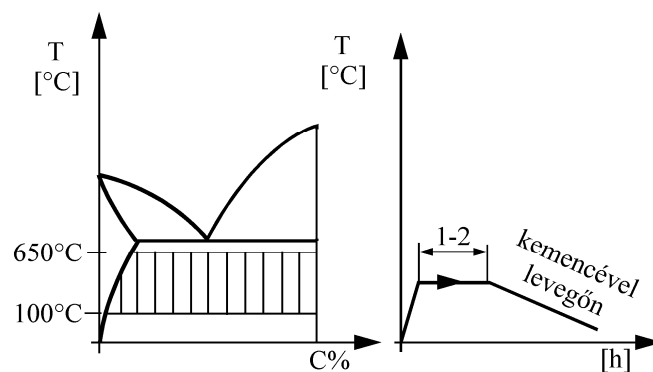
Az öntés, a meleg- és hidegalakítás a forgácsolás és az egyengetés hatására keletkezett feszültségek hőkezeléssel történő csökkentését nevezik feszültségcsökkentő izzításnak. Az edzés okozta belső feszültségek

csökkentése, viszont a megeresztés, amit a szívósságfokozó hőkezeléseknél tárgyalunk részletesen.

A feszültségcsökkentő izzítással az acél belső feszültségeit úgy csökkentjük a lehető legnagyobb mértékben, **hogy szilárdsága, szövetszerkezete nem változik.**

Feszültségcsökkentéskor 100 és 650 °C közé melegítjük az acélt, a feszültségcsökkentés mértékétől függően, majd 1-2 órai hőntartás után szabad levegőn vagy kemencével együtt hűtjük (4.13. ábra).

Megmunkált alkatrészekon edzés előtt célszerű ezt a hőkezelést elvégezni, mivel az acélban lévő feszültség az edzésnél keletkező feszültséggel összeadódik, és így repedéseket okozhat. Kovácsolt darabok feszültségcsökkentését általában nagyolás után végzik.



4.13. ábra Feszültségcsökkentő izzítás

### 4.3.2 Lágyító hőkezelések

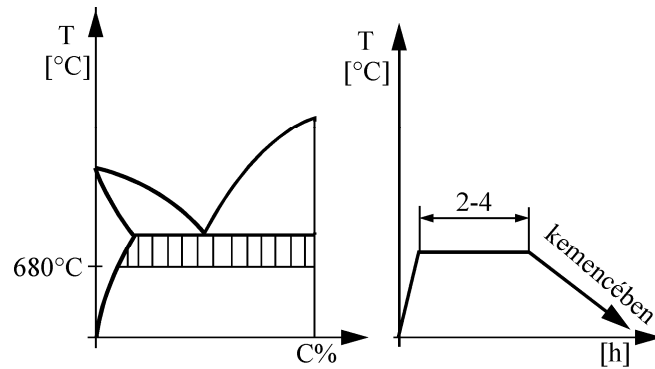
A lágyító hőkezeléseket azért végzik, hogy az acélokat könnyen megmunkálhatóvá tegyék. Ezt általában úgy lehet elérni, hogy az acél jellemző szövetelemének, a perlitnek cementit lemezeit a hő okozta felületi feszültség hatására cementit szemcsékké alakítjuk hőkezeléssel. Ennek a szövetelemnek a neve **szemcsésperlit**. Attól függően, hogy milyen acélt, milyen célra kell lágyítani különböző eljárások alakultak ki:

1. teljes kilágyítás,
2. normalizáló lágyítás,
3. izotermális lágyítás,
4. ausztenitre lágyítás.

#### **Teljes kilágyítás**

A lágyító hőkezelési eljárással célunk az acél forgácsolhatóságának javítása, szilárdságcsökkentése. A lágyító izzítással a perlitnek a cementit lemezeit alakítjuk cementit gömbökké, szemcsékké. A lágyított szövetszerkezetet szferoiditnek, a folyamatot, amelynek során kialakul szferoiditesítésnek nevezik. A szemcsésperlitben a lágyszemcsék ferritbe ágyazott cementit gömbök. mintegy kigördülnek a szerszám éle előtt, így kisebb ellenállást fejtenek ki a

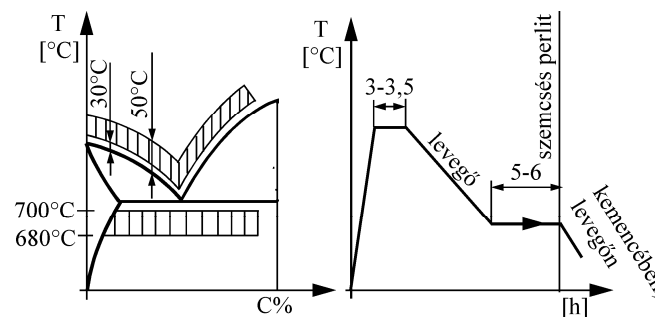
szerszám élére. Ez a szerkezet képlékeny alakításnál is kisebb ellenállást mutat. Teljes kilágyításkor a szénacélokat általában  $680\text{ }^{\circ}\text{C}$  és az  $A_{c1}$  átalakulási hőmérséklet közé hevítik és ott mintegy 2-4 óráig hőntartják. A hevítés hőfoka függ a széntartalomtól és az egyéb ötvözők mennyiségétől. Különböző acélok lágyítási hőmérsékletét a szabványok tartalmazzák. Lágyításkor az acélt lassan, általában kemencével együtt hűtik le (4.14. ábra).



4.14. ábra Teljes kilágyítás

### Normalizáló lágyítás

Az ötvözött, hipoeutektoidos acélokat az  $A_{c3}$  hőmérséklet fölé hevítik kb.  $30\text{-}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal, majd normál hűtéssel az  $A_{c1}$  alá hűtik  $20\text{-}40\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal (4.15. ábra). Ezen a hőfokon addig tartják, amíg az ausztenit szemcsésperlitté nem alakul. Ezt követően az ötvözetet kemencében vagy levegőn szobahőmérsékletre hűtik.

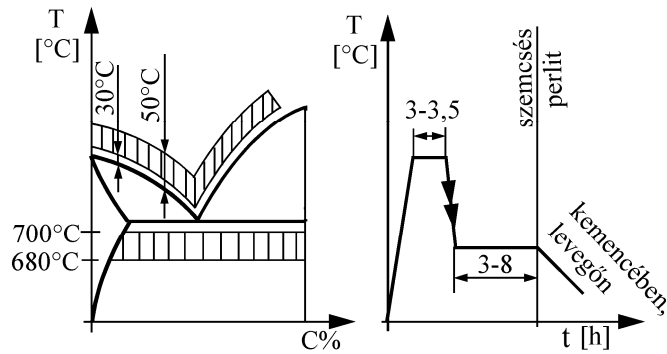


4.15. ábra Normalizáló lágyítás

### Izotermális lágyítás

Az izotermális lágyítással hőkezelt acélok általában a kisebbességű forgácsoló megmunkálásokhoz alkalmasak, pl. fogazáshoz, bordamaráshoz, üregeleshez.

Itt is az acélt, mint a normalizáló lágyításnál, az  $A_{c3}$  hőmérséklet fölé hevítik kb.  $30\text{-}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal, de onnan nem normálhűtéssel, hanem gyorsan hűtik  $A_{c1}$  alá  $20\text{-}40\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal (4.16. ábra). Ezen a hőfokon addig tartják, míg az ausztenit szemcsésperlitté nem alakul. Ezt követően az ötvözetet kemencében vagy levegőn szobahőmérsékletre hűtik.

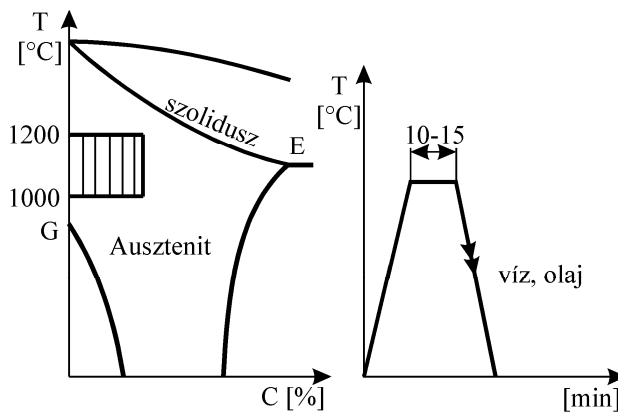


4.16. ábra Izotermális lágyítás

### Auszténitre lágyítás

A vas-vaskarbid állapotára szerint szobahőmérsékleten nincs ausztenit. Erősen ötvözött acélok esetén viszont az ötvözők hatására a GS és az SE vonalak szétnyílnak és ekkor az ausztenit mező szobahőmérsékletig leérhet. Az ilyen korrózió-, sav-, hő- és kopásálló vagy nagy mangántartalmú acélok viszonylag leglágyabb, legjobban megmunkálható állapotát ausztenitre lágyítással lehet elérni. A saválló acélok ebben az állapotban állnak legjobban ellent a vegyi hatásoknak.

A hőkezelési eljárás során az acélt 1000-1200 °C-ra hevítik fel, majd 10-15 percig hőntartják (4.17. ábra). Ezt követően vízben vagy olajban lehűtik. 1 mm-nél vékonyabb lemezek levegőn is hűthetők.



4.17. ábra Ausztenitre lágyítás

### 4.3.3 Keménységfokozó hőkezelési eljárások

A keménységfokozó eljárások célja általában a kopásálló, martenzites szövetszerkezet kialakítása, esetleg kemény fémvegyületek kiválásának elősegítése. E csoportba tartozó hőkezelési eljárások:

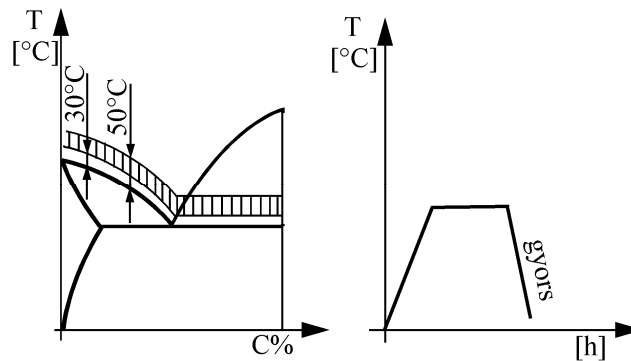
1. közönséges edzés,
2. kombinált edzés,
3. lépcsős edzés,
4. mélyhűtés, mesterséges öregítés.

### A közönséges edzés

Edzésnek azt a hőkezelési eljárást nevezzük, amelynek során a 0,3 %-nál nagyobb széntartalmú acélokat a GSK vonal fölé hevítik 30-50 °C-kal, majd az ausztenitké alakulás után gyorsan, a kritikus hűtési sebességnél gyorsabban lehűtik, hogy kemény martenzites szövetszerkezet alakuljon ki bennük (4.18. ábra).

A hipoeutektoidos acélok esetében tehát az  $A_{c3}$  hőmérséklet fölé kell hevíteni, hogy teljes keresztmetszetében ausztenites szövetszerkezet alakuljon ki, amit majd gyors hűtéssel martenzitté lehet alakítani. Ha ennél alacsonyabb hőfokra hevíténénk, akkor az ausztenit mellett még a ferrit is megjelenne, ami tudvalevőleg nagyon lágy szövetelem.

Más a helyzet a hipereutektoidos acélok esetében. Ha ezeket az acélokat nem hevítjük fel az SE vonal feletti ausztenit mezőbe, hanem csak az SK vonal fölé, akkor itt sem kapunk tisztán ausztenites szerkezetet, de itt a gyors hűtés után kialakuló kemény martenzit mellett a szintén nagyon kemény másodlagos cementit található, ami nem rontja az edzett szerkezet keménységét, az alacsonyabb hőfokú hevítés viszont kedvezőbb a szilárdsági jellemzők szempontjából.



4.18. ábra Közönséges edzés

Az ötvözött acélok edzését a karbidok teljes feloldódása érdekében rendszerint jóval az  $A_{c1}$ -et meghaladó hőmérsékletre kell végezni.

Edzésnél a hűtőközeg kiválasztásakor az acél kritikus hűlési sebességét kell figyelembe venni. Az acélok kritikus hűlési sebessége eltérő, függ a széntartalomtól, az ötvözöttségtől. Ezért a hűtőközeg is különböző, lehet víz, lehet olaj. Erősen ötvözött acélok akár levegőn is leedződhetnek (légedző vagy önedző acélok).

Az edzések egyik legáltalánosabb módja a közönséges edzés. Mint a neve is mutatja a hevítés, hőntartás, hűtés folyamatos, a diagramokon nincs törés. Legtöbb acél esetében az eljárás megfelelő eredményre vezet (4.18. ábra).

A gyakorlatban az is gyakran előfordul, hogy nem akarjuk az alkatrészt teljes keresztmetszetében keménnyé tenni, mivel annak csak a felületét éri koptató hatás. Ilyenkor csupán egy bizonyos vastagságú kemény, edzett felületi kéregre van szükség, az alkatrész magja viszont jobb, ha szívós marad.

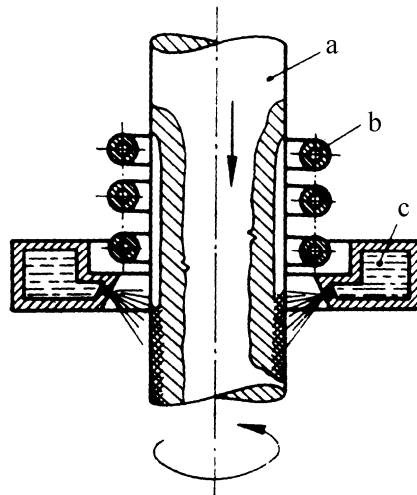
Az acél csak akkor edződik be, ha az edzés valamennyi feltételét biztosítjuk:

1. megfelelő szénttartalmat,
2. edzési hőmérsékletet,
3. kritikusnál gyorsabb hűtést.

Ha valamelyik nem teljesül a három közül, a martenzites átalakulás elmarad. Kemény edzett kéreg tehát kialakítható úgy, hogy nagy hőbevitellel a kérget olyan gyorsan felmelegítjük, hogy nem áll rendelkezésre elegendő idő ahhoz, hogy a hő a mélyebb rétegek felé elvezetődjön. Így csak a kéreg lesz edzési hőfokú, csak ez edződik be. Ezt koncentrált hőbevitelt indukciós hővel, acetilén lánggal, olvadt fémsófürdőbe mártással, esetleg lézersugárral lehet megvalósítani. Ennek megfelelően az ún. **felületi edzéseknek** a következő fajtáit különböztetjük meg:

- indukciós edzés,
- lángedzés,
- bemártó edzés,
- lézersugaras, elektronsugaras edzés.

Az **indukciós edzésnél** az elektromos áram hőjét használjuk hevítésére (4.1. táblázat). Ennek során az alkatrészt egy nagyfrekvenciás tekercs (induktor) belsejébe helyezük (4.19. ábra). Az alkatrész felületi rétegében feszültség indukálódik, aminek hatására örvényáramok alakulnak ki az ötvözetben, annak felületének közelében. Az örvényáramok az anyagban felemésztyődve, hővé alakulnak, azt gyorsan felhevítik edzési hőfokra.



4.19. ábra Indukciós hevítés

#### 4.1. táblázat Hőátadási teljesítmények

Sor-sz.	A hőátadás módja	Hőátadási teljesítmény [W/cm <sup>2</sup> ]
1.	Áramlással	0,5
2.	Sugárzással	10
3.	Érintkezéssel	20
4.	Lánggal	1 000
5.	Indukcióval	15 000

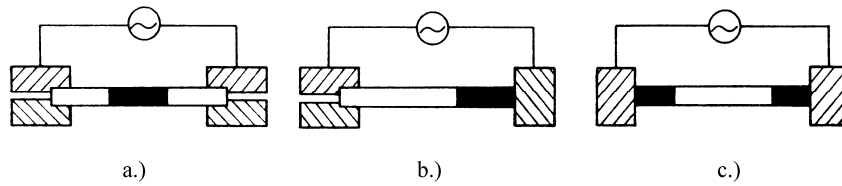
A hő közvetlenül az anyagban keletkezik. A tekercs maga nem melegszik, sőt a rézcsőből készült egy-két menet belsejében hűtővíz kering, hogy megvédje az alkatrész sugárzó hőjétől. A tekercs nagyfrekvenciás feszültsége az acél alkatrészben indukál feszültséget, aminek hatására örvényáramok jönnek létre a zárt vezetőben, amelyek hővé alakulnak. A folyamat jellemzője, hogy minél nagyobb a frekvencia, annál inkább kiszorúlnak a felület közelébe az örvényáramok, tehát csökken a hevített kéreg vastagsága, a hevítési idő növelésével, pedig nő. Az alkalmazott hevítési idő általában nagyon rövid, **8-10 másodperc** csupán és **hőntartás nincs**. Ezért a hő nem tud elvezetődni az anyag belseje felé. A hevítés hőfoka, mint már szó volt róla, a közönséges edzésnek megfelelően a GSK vonal felett van 30-50 °C-kal.

Mivel az edzetlen magrész és az edzett kéreg között nagy feszültség ébred, ezért célszerű indukciós edzés előtt, a repedések elkerülése végett, az alkatrészt normalizálni vagy nemesíteni. A már felületedzett darabokban a feszültséget 150-200 °C-os megeresztéssel csökkenteni kell. Ennek hatására a keménység alig, a repedés veszélye viszont jelentősen csökken.

Ezt az eljárást olyan nemesíthető, szerkezeti acélból készült alkatrészekenél alkalmazzák, ahol elvárás a belső részek szívóssága, illetve a felület keménysége, kopásállósága, mint pl. fogaskerek, csapok, forgattyústengelyek csapjai esetében. A szokásos kéregvastagság 0,4 - 1 mm. Az eljárás tiszta, jól szabályozható, gyors, az alkatrészen nem jön létre jelentős elhúzóadás, revésedés. Beruházási igénye jelentős, de termelékenységé miatt a tömeggyártásban a költségek viszonylag gyorsan megtérülnek. (Az indukciós hevítés sajátosságairól még a Hevítőberendezések és kiegészítő eszközök c. fejezetben lesz szó részletesebben).

Az elektromos áram másként is felhasználható az alkatrészek hevítésére (4.20. ábra). A közvetlen (kontakt) melegítés lényege, hogy az alkatrészt úgy fogják befogópofák közé, hogy rajtuk néhány volt feszültségű áram folyik keresztül. A rézből készült befogópofák tömegének és felületi nyomásának változtatásával lehet a hevítés helyét változtatni. Az így megvalósítható hevítés gyors, de az egész keresztmetszetet átmelegíti, tehát nem felületi edzésekhez alkalmazható.



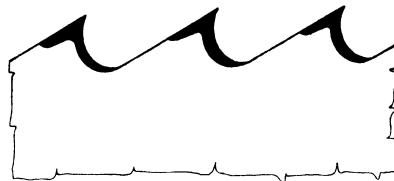


4.20. ábra A közvetlen hevítés módja  
a.) középen b.) egyik végén c.) mindkét végén

Az impulzusedzés lényegében indukciós felületi edzés, de igen nagy fajlagos teljesítményt ( $30 \text{ kW/cm}^2$ ) és igen nagy frekvenciát igényel (27 MHz). Az edzési hőmérséklet nagyon rövid idő, néhány milliszekundum alatt fejlődik a munkadarab felületén. Külön hűtőközeg alkalmazására nincs szükség, a beedződés levegőn hűlve is végbemegy.

A hevített térfogat igen kicsi, ezért a munkadarab nem vetemedik (4.21. ábra). Az impulzusedzés alkalmas minden ötvözetlen és többféle ötvözött, nemesíthető acél helyi hőkezelésére. Általában fa- és fémipari szerszámok, fűrészek és egyéb vágó-, sajtolószerszámok, precíziós alkatrészek helyi hőkezelésére alkalmazzák.

Széntartalom %	Keménység, HV
0,8...0,9	1500
1,0...1,1	1200...1250
1,4	1250...1350



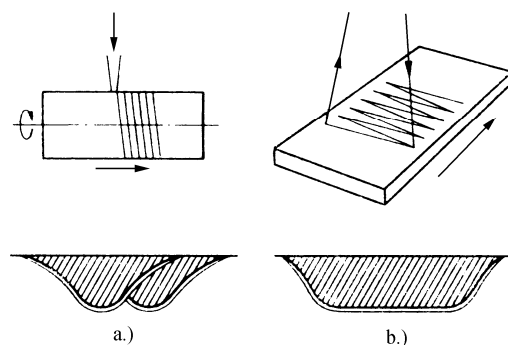
4.21. ábra Impulzusosan edzett szalagfűrész

Koncentrált hőbevitel nagy energiájú **lézersugárral** is lehetséges. Az alkalmazás elvi vázlatát a 4.22. ábra mutatja be. Az alkatrész felületétől 750 mm-re lévő, 12 mm széles sávban mozgatott (oszilláló) lézersugár jellemzőit a táblázatban foglalják össze.

Mivel a lézersugár lényegében fénysugár, ezért figyelembe kell venni, hogy a fém felülete a sugárzás egy jelentős részét visszaveri, jelentősen csökkentve a hasznosuló teljesítményt. Ezért a hevítendő felületet sötét színű, hőálló, a hőt jól vezető réteggel kell bevonni.

A lézeres edzés sajátosságai és különleges előnyei a következők:

- a hevítendő felülethez csatolása egyszerű,
- kellően nagy gyújtótávolság esetén jelentős magasságkülönbségű felületek is hevíthetők,
- a nagyenergiájú sugár jól irányítható, furatok hornyok felülete is hevíthető,
- hevítés után külön hűtőközeget nem kell alkalmazni,
- az eljárás tiszta, pontos, jól szabályozható.

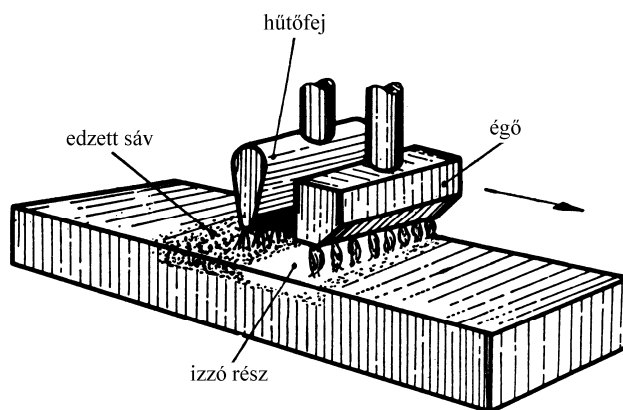


4.22. ábra Lézersugaras edzés  
a.) edzés átfedéssel, b.) folyamatos edzés

Az acélok hőkezelésére csak folyamatos CO<sub>2</sub> lézerek használhatók. Az eljárás jelentős beruházást igényel.

Koncentrált hőbevitelt tesz lehetővé még az **elektronsugár** alkalmazása. Az elektronsugaras edzés hasonló a lézeres edzéshez. Eltérés abban mutatkozik, hogy az elektronsugaras hevítést vákuumban kell végrehajtani, mivel a levegőben az elektronok lefékeződnek. Az elektronsugarat elektromágneses mezővel irányítják. A csaknem fénysebességgel a munkadarab felületére csapódó elektronok mozgási energiája alakul hővé. A vákuumban történő hevítés után hevítési nyomok nem maradnak az alkatrész felületén.

A felületi edzéseknek egy elterjedten alkalmazott fajtája a lángedzés, amelynek során a hevítéshez legáltalánosabban az acetilén gáz égéshőjét használják az alkatrész felületének gyors hevítéséhez. Az edzési hőfokra hevített kérget, a hevítő fejet 30-40 mm-re követő hűtőfejjel gyorsan lehűtik vagy egyszerűen, az alkatrészt a hűtőközegbe ejtik (4.23. ábra). A nagy lángteljesítményű gázt egyébként lánghegesztéshez használják. Az acetilén lángteljesítménye  $44,9 \cdot 10^7 \text{ J/m}^2\text{s}$ , a láng hőmérséklete 3200 °C. Itt is az acélnak csak egy vékony kérget hevítjük fel edzési hőmérsékletre, majd közvetlenül utána a kritikus hűtési sebességnél gyorsabban lehűtjük, így alakítva ki az edzett kemény kérget. Főleg olyan, kopásnak kitett alkatrészek felületi keménységét fokozzuk vele, mint a nagy méretű fogaskerekek, lánckerekek, kötélhornyok, eszterga-szánvezetékek, csúszólapok, forgattyústengely csapok. Ott van nagy jelentősége az eljárás alkalmazásának, ahol a nagy méret miatt más edzési eljárás nem jöhet szóba (főleg ahol kicsi az edzendő felület aránya az összfelülethez képest). A kis beruházási költségek miatt kis darabszám esetén is gazdaságosan alkalmazható.



4.23. ábra Síkfelület haladó folyamatos lángedzése

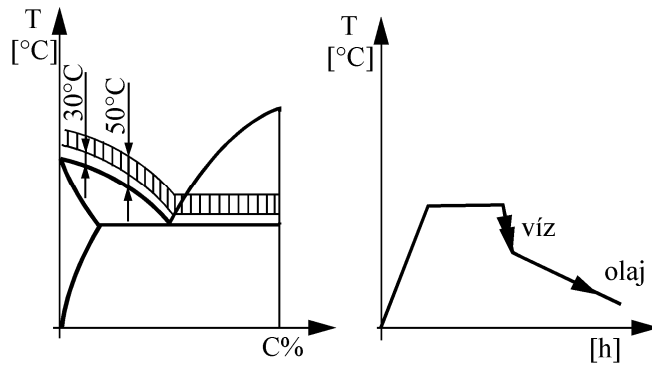
A rétegvastagságot a hevítés sebességével lehet szabályozni, bár kevésbé pontosan, mint az indukciós edzés kéregvastagságát. **Lángedzés előtt is célszerű normalizálást vagy nemesítést** alkalmazni. Edzés után a mag eredeti állapotban marad. Az átmenet a kéreg és a mag között fokozatos. A helyi hevítés miatt a vetemedés nem jelentős, a kéreg vastagsága elég nagy és egyenletes.

A **bemártóedzés** a felületi edzések egy további fajtája. Az edzendő kéreg hevítését 1000-1200 °C-os olvadt fémsó- vagy fémfürdőbe mártással biztosítjuk, majd a kívánt edzési hőmérséklet elérése után gyorshűtést alkalmazunk. A sófürdő magas hőmérsékletével biztosítjuk, hogy a felület gyorsan elérje a megfelelő hőfokot, a mag viszont a hőkezelés után edzetlen maradjon. A hőntartási idő rövid, az alkatrész méretétől és alakjától függ, de általában nem haladja meg az egy percet. Edzés után az acélt azonnal meg kell eresztetni a repedések elkerülése végett.

Kemény kérges acél felületén még **betétedzéssel** is elő lehet állítani, de ennek ismertetésére a Kéregötvözési eljárások c. fejezetben kerül sor.

### **Kombinált edzés**

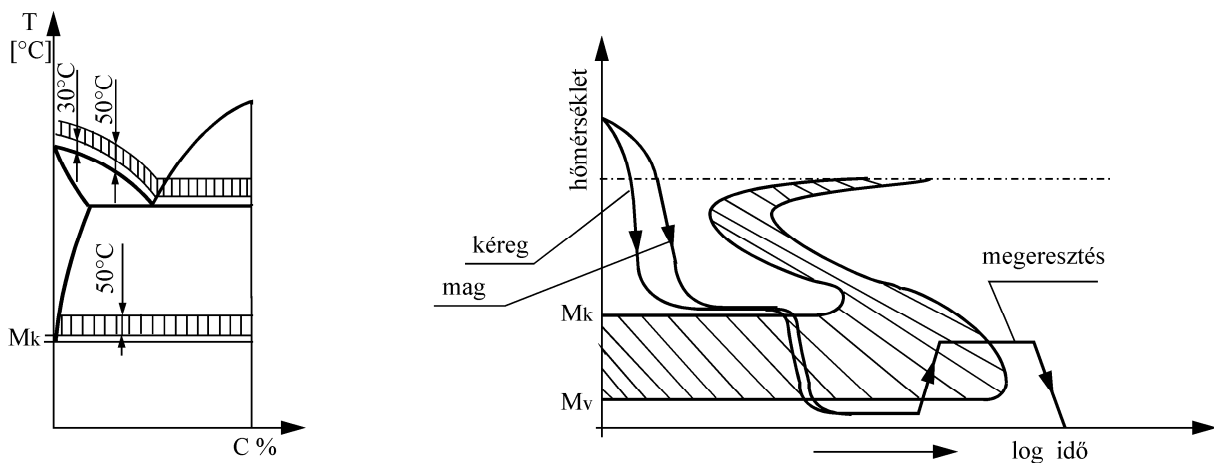
A közönséges edzéstől az eljárás annyiban tér el, hogy nem egyféle hűtőközeget használunk. Kombináltan előbb vízzel hűtünk addig, míg az izzási színek el nem tűnnek (az orrpont elkerüléséig), majd ezt követően a hűtést olajban fejezzük be (4.24. ábra). A hűtés vonala tehát megtörik. Ezt a módszert elsősorban olyan vízédzésű acéloknál alkalmazzuk, amelyeknek az összetétele vagy a munkadarab nagy mérete miatt repedésre hajlamosak. Az alkatrészt, ha szobahőmérsékletig vízben hűtenénk, a gyors hűtés miatt megrepedne, viszont ha kezdettől fogva olajban edzenénk, nem edződne le. Ha csak az orrpont elkerüléséig hűtjük vízben, itt még az acél elég szívós, nem reped meg, az orrpont után már lehet lassabban, olajban is hűteni, nem metszünk bele a C-görbékbe. Így az acél már repedésmentesen leedződik.



4.24. ábra Kombinált edzés

### Lépcsősedzés (martemperálás)

Az edzéseknek ez a fajtája segít elkerülni a repedések, nagyobb vetemedések kialakulását. Nagyobb átmérőjű vagy nagyobb vastagságú munkadarabok esetén az alkatrész a felülete előbb lehűl, mint a belső részek, ezért benne a gyors hűtés során káros feszültségek ébredhetnek. Ha viszont nem folyamatosan hűtjük a munkadarabot szobahőmérsékletig, hanem csak az orrpont elkerüléséig, majd az  $M_k$  vonal felett hőntartjuk a munkadarabot, amíg a belső és külső részek hőmérséklete kiegyenlítődik, nem reped meg. Majd csak ezt követően hűtjük tovább, előidézve a martenzites átalakulást. Ehhez már a normál hűtés is elegendő (4.25. ábra). Az így edzett acél azonos keménység mellett szívósabb, kisebb a repedés veszélye. Vetemedésre kevésbé hajlamos, jobban ellenáll a dinamikus, ütésszerű igénybevételnek.



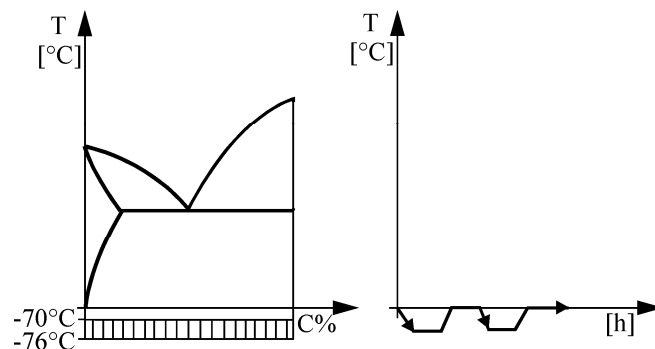
4.25. ábra Lépcsős edzés

### Mélyhűtés

Ez a hőkezelés nem hevítéssel, hanem hűtéssel kezdődik. Célja az acélban visszamaradt, még át nem alakult, ún. maradék ausztenitnek az átalakítása martenzitté. Mint a C-görbék bemutatásánál láttuk, a martenzitté alakulás 0,65 %-nál nagyobb széntartalom, illetve ötvözt acélok esetén nem fejeződik be szobahőmérsékleten, vagyis az  $M_v$  vonal negatív hőmérsékleti tartományba tolódik. Az acélban visszamaradt ausztenit csökkenti az acél keménységét.

Igaz az átalakulás egy idő múlva magától is végbemenne, de ez pontosan megmunkált munkadaraboknál, pl. idomszereknél, adagoló elemeknél nem megengedhető mivel az átalakulás térfogatnövekedéssel jár, ami a pontos méretek megváltozását, geometriai deformációt idézhet elő, a munkadarab selejté válik. Közvetlenül az edzés után alkalmazott mélyhűtéssel a maradék ausztenit, martenzitté alakulása meggyorsítható, a stabil szövetszerkezet kialakítható. Az alkatrész ez után készre munkálva, már nem változtatja méretét.

A hőkezelés során az edzett alkatrészt  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  alá hűtik kétszer, háromszor egymás után (4.26. ábra). Erre a célra denaturált szeszből oldott szárazjeget célszerű használni.



4.26. ábra Mélyhűtés

### **Mesterséges öregítés**

Öregedésnek nevezzük a kis széntartalmú acéloknak azt a tulajdonságát, hogy hosszabb idő után minden szándékos beavatkozás, hatás nélkül nő a keménységük, csökken a szívósságuk, nyúlásuk.

Gyorsan hűtött szilárdoldatokban vagy hidegen alakított ötvözetekben környezeti- vagy növelt hőmérsékleten vegyi kiválások ún. szegregációk jönnek létre (oldott gázok, mint pl. a nitrogén, rideg vegyületet, vasnitridet képeznek). Az átalakulás kedvezőtlen irányban megváltoztatják az acél mechanikai-szilárdsági tulajdonságait (az acél ridegebbé válik).

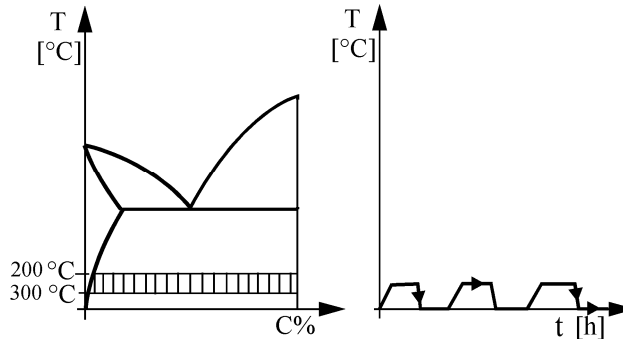
Ha ez a jelenség használat közben, környezeti hőmérsékleten lép fel, az acél természetes öregedéséről beszélünk, ami a kész gyártmányok használhatóságát zavarja.

A szegregációs folyamatoknak tudatos irányítását, gyorsítását mesterséges öregítésnek nevezzük. Az öregített acél felhasználhatósága kialakult tulajdonságai alapján felmérhető.

A kis széntartalmú acéloknak, mint a mélyhúzható lemezek, kazánlemezek, az oldott szén harmadlagos cementit, a nitrogén vasnitrid formájában válik ki, növelve az acél keménységét csökkentve a szívósságát, nyúlását. Az öregedésre hajlamos kazánlemezek ütmunka értéke  $50\text{-}80\text{ J/cm}^2$ -ről az öregedés hatására  $30\text{-}40\text{ J/cm}^2$ -re csökkenhet.

Az öregedési folyamat  $200\text{-}300\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra hevítéssel, 4-12 órás hőntartással meggyorsítható (4.27. ábra). Az öregítés hevítési hőmérsékletének felső

határát úgy kell megválasztani, hogy a kis széntartalmú acélnak a megelőző hőkezeléssel kialakított szövetszerkezete ne változzon meg. A mesterséges öregítés során a hevítés megismételhető. Az alumíniummal dezoxidált acélok nem hajlamosak az öregedésre.



4.27. ábra Mesterséges öregítés

#### 4.3.4 Szívósságot fokozó hőkezelési eljárások

Az acél szívósságát az eltöréséhez szüksége munka nagyságával lehet legjobban kifejezni. Mászóval az acélnak minél nagyobb a fajlagos törési munkája (KCV), annál szívósabb. A szívósság szoros összefüggésben áll a szövetszerkezettel, a krisztallitok méretével. Annál szívósabb az acél, minél finomabb a szemcseszerkezete és minél homogénebb a szövete. A hőkezelés során kialakuló szövetelem finomságát, homogenitását annak kiinduló szöveteleme, vagyis az ausztenit krisztallitjainak mérete határozza meg. Ezért valamennyi szívósságot fokozó hőkezelési eljárás a  $\gamma$ - $\alpha$  átalakulás olyan szabályozott hűtésű változata, melynek kiinduló fázisa a lehető legfinomabb és homogénebb  $\gamma$ -szilárd oldat.

A szívósságot fokozó hőkezelési eljárások csoportjába a következő eljárások tartoznak:

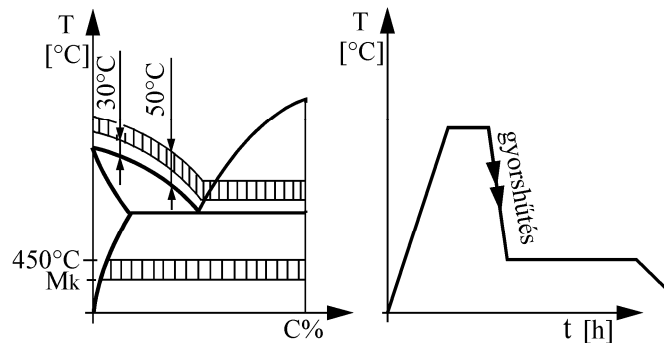
1. izotermális edzés,
2. patentírozás,
3. nemesítés.

A felsorolt eljárások közül az első kettőt egy lépésben végre lehet hajtani, míg a nemesítés, mint látni fogjuk két műveletből áll.

##### Izotermális edzés

Az izotermális edzés sajátossága, hogy az így hőkezelt acél keménysége bár közel áll az edzett acéléhoz, de szívóssága jóval nagyobb, ezért repedésre, vetemedésre sokkal kevésbé hajlamos. A hőkezelés első lépéseként úgy, mint edzésnél, az acélt a GSK vonal fölé hevítik 30-50 °C-kal, majd az edzési hőfokról az orrpontot elkerülve nem szobahőmérsékletig, hanem 450 °C és az  $M_k$  vonal közé hűtik. Ezen az izotermán addig tartják hőn, míg teljes keresztmetszetben át nem alakul az ausztenit bainitté. Ezután már az acél

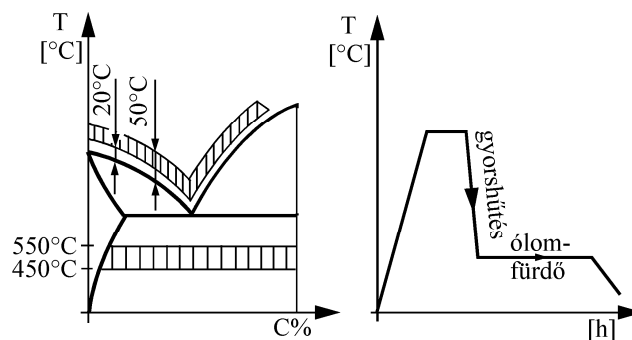
tetszőleges hűtéssel szobahőmérsékletre hűthető (4.28. ábra). Ha a hőntartás hőmérséklete a 450 °C-hoz áll közelebb, az acél lágyabb, ha az  $M_k$  vonalhoz, akkor keményebb lesz. Ezt az eljárást ötvözetlen acélból készült, nagyméretű alkatrészeknél nem lehet használni, mert a munkadarab közepe lágy marad. Az izotermális edzés kiválóan alkalmas rugók, sajtóló- és forgácsoló szerszámok, fűrészlapok, kések hőkezelésére. Az eljárás viszonylag költséges berendezést és hosszabb időt igényel.



4.28. ábra Izotermális edzés

### Patentírozás (izotermális nemesítés)

Ez a hőkezelés lényegében hasonlít a már megismert izotermális edzésre, annak az elvét követi, itt is a túlhűtött ausztenit bainitté alakul (4.29. ábra). Ezt a hőkezelést úgy hajtják végre, hogy az  $A_{c3}$  hőmérsékletre, mintegy 950 °C-ra felhevített acélt a C-görbéjének orrponi hőmérsékleténél alacsonyabb hőmérsékletű fém- vagy sófürdőben hűtik le és tartják hűn addig, amíg a bainitté alakulás teljesen be nem fejeződik. Ezután már tetszőlegesen hűthető az ötvözet szobahőmérsékletre.

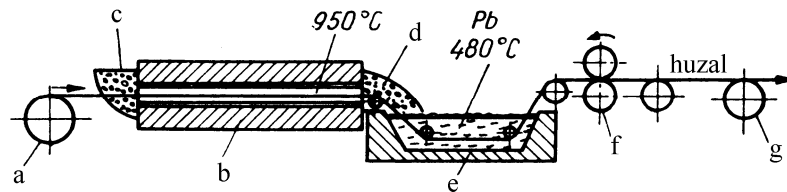


4.29. ábra Patentírozás

Az eljárást már régen alkalmazzák a 0,35 %-nál nagyobb széntartalmú acélhuzalok húzási fokozatai közé iktatott hőkezelésre.

Az eljárás hosszú, vékony termékek (huzalok, szalagok) szívóssá tételére alkalmas. Ezeket általában feltekercselik. A teljes hosszban azonos állapot biztosítása érdekében a huzalt, szalagot letekerve, folyamatosan egy csökemencén vezetik át (4.30. ábra). Az áthaladás sebessége olyan, hogy a kemence utolsó harmadába érve már eléri 900-950 °C-os hőmérsékletet. Ezt követően a huzal egy 480 °C-os ólomfürdőn halad át és bainites szerkezetűvé

alakul. A fémfürdő hossza olyan, hogy áthaladva éppen a hőtartási időnek megfelelő ideig tartózkodik benne. Az így hőkezelt huzal, szalag a készárutároló добра kerül. Az így hőkezelt acél szívóssága nagyobb, mint a nemesítetté, csökken a repedés veszélye, kisebb a vetemedése.



4.30. ábra Huzalpatentírozó berendezés

- a.) huzaldob, b.) csőkemence, c.),d.) faszéndarával töltött nyílászáró, e.) ólomfürdős kád, f.) húzó hengerpár, g.) készáru tárolódob.

### Nemesítés

A nemesítés két hőkezelési műveletből, **edzésből** és azt követően egy magas hőfokú **megeresztésből** áll. Célja a megfelelően nagy szilárdság mellett, nagy szívósság biztosítása. Az acélok szívósságát jól jellemzi a gyakorlatban használatos folyáshatár-viszonyszám. Ez a folyáshatár ( $R_{eH}$ ) és a szakítószilárdság ( $R_m$ ) hányadosa.

A nemesítés során az edzéssel kialakított finom tűs martenzitet alakítjuk át ferrit-cementites szövetszerkezetté a megeresztés során.

**Megeresztésnek** nevezzük az edzéssel vagy hidegalakítással keményített acélnak a „visszamelegítést”, hevítését és megfelelő idejű hőntartását, az  $A_{c1}$  átalakulási hőmérsékletet el nem érő hőfokon, majd normálhűtését. A megeresztés során a martenzit kétfázisú, ferrit-cementitből álló szövetelemre bomlik úgy, hogy kis cementit korongok keletkeznek és épülnek be a ferritbe. A megeresztés hőfokának növelésével a korongok vastagodnak, gömbösödnek. Ezeket a szövetelemeket nevezik **szferoiditnek**. Ennek a legmagasabb megeresztési hőfokon (700 °C-on) kialakuló fajtája a szemcsés karbidos perlit, ún. szemcsésperlit. Ez a legszívósabb szövetelem.

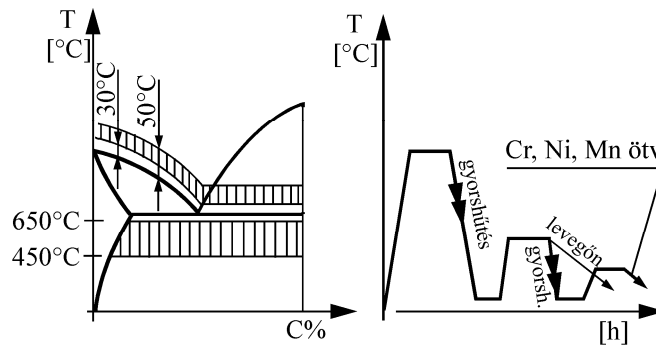
Általában a szerkezeti acélokat szokták nemesíteni. A szerszámacélok közül a melegsajtoló szerszámok anyagán az üzemi hőmérsékletüknél valamivel magasabb hőmérsékletű megeresztést alkalmaznak.

A nemesítésnek a folyamata tehát a következő (4.31. ábra). Az acélt edzési hőmérsékletére hevítjük, majd onnan összetételének megfelelő hűtőközegben, a kritikus hűtési sebességnél gyorsabban leedzük martenzites szövetszerkezetűre. Ezután a szilárdsági előírásoktól függően általában 450-600 °C közötti hőmérsékleten huzamosabb ideig hevítjük, majd 600 °C feletti hőmérsékletről levegőn lehűtjük.

Abban az esetben, ha az acél krómmal, nikkellel, mangánnal ötvözött, a levegőn való hűtés nem alkalmazható, mivel vegyi kiválások miatt ún. **megeresztési ridegség** lép fel. Ez úgy kerülhető el, ha megeresztés után az acélt nem lassan, hanem **gyorsan hűtjük** (mint edzésnél). Ezzel viszont csökken az acél ütőmunka értéke. Az acélban így kialakult feszültségeket egy



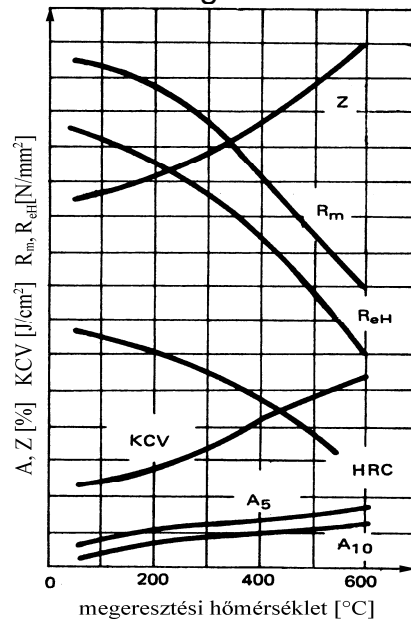
újabb, de alacsonyabb (350 °C) hőfokú megeresztéssel, majd ezt követően már normálhűtéssel jórészt oldani lehet.



4.31. ábra Nemesítés

A nemesítés hatására az acél szívóssága nő. A megeresztés hőfokának növelésével az ütőmunka, a nyúlás, a kontrakció nagyobb, a keménység, a szakítószilárdság, folyáshatár pedig kisebb lesz (4.32. ábra).

A nemesítést sokszor felületi hőkezelések előtt is alkalmazzák, a repedésveszély csökkentésére. Ilyen esetekben a megeresztés hőmérséklete hőkezelési táblázatból határozható meg.



4.32. ábra A megeresztés hatása az ötvözetlen acél tulajdonságaira

Más esetekben előírják, hogy nemesítés után milyen szakítószilárdsággal kell rendelkeznie a nemesített alkatrésznek. Ilyenkor a megeresztés hőfokát az előírt szakítószilárdság ( $R_m$ ) alapján kell kiszámítani a következő összefüggések és empirikus képletek alapján:

$$T_{mege.} = T_{mege.max} - k (R_m - R_m^*) [^{\circ}C],$$

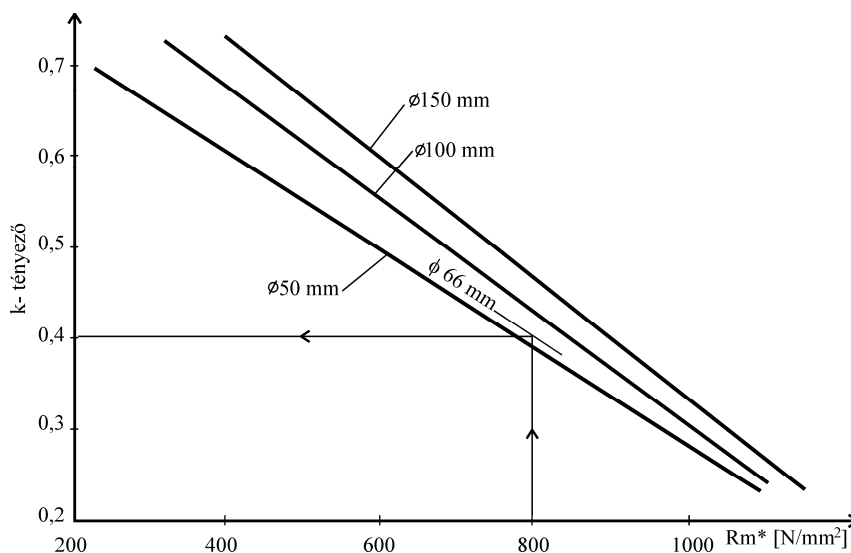
$T_{mege.}$  a megeresztés hőfoka,  
 $T_{mege.max}$  a megeresztés hőfokának maximális értéke,  
 $R_{m*}$  az acél szakítószilárdsága, mint kiindulási adat,  
 $R_m$  az acél összetétele alapján számított szilárdsági érték,  
 $k$  az alkatrész méretétől függő módosító tényező (4.33. ábra alapján).

A megeresztés hőfoka tehát:

$$T_{mege.max} = 695 + 20(Si - Mn + Cr + Mo - Ni + W) + 100V \text{ [}^\circ\text{C]},$$

$$R_m^* = 1\,000 \left( C - \frac{C - 0,4}{3} + \frac{Si}{10} + \frac{Mn}{4} \right) + 120Cr + 300Mo + 60Ni + 20W + 600V \text{ [N/mm}^2\text{]}.$$

(A képletekbe az ötvözők százalékos értékét kell behelyettesíteni.)



4.33. ábra A "k" tényező meghatározása nemesítéshez

#### 4.3.5 Kéregötvezési eljárások

Kéregötvezési eljárásnak nevezzük az olyan hőkezelési eljárást, amikor az ötvözetlen vagy gyengén ötvözött acél alkatrész bizonyos vastagságú felületi rétegébe szént vagy más ötvözőt viszünk be **diffúzió** révén. Az eljárás célja, hogy az ötvöző elemtől függően a kéreg kemény, kopásálló, korrózióálló, hőálló stb. legyen.

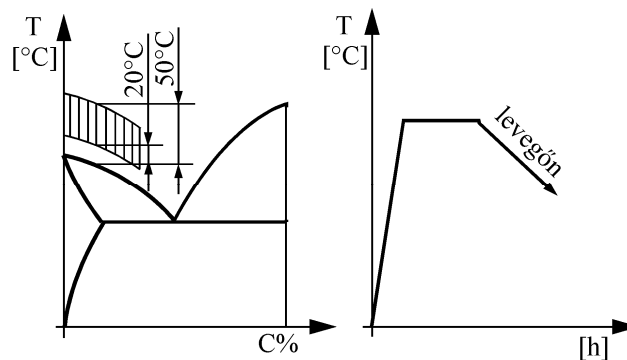
Az elvárásoknak megfelelően többféle kéregötvözési eljárás alakult ki:

1. *cementálás,*
2. *nitridálás,*
3. *nitrocementálás, karbonitrálás,*
4. *alitálás,*
5. *kromálás,*
6. *szilikálás.*

### **Cementálás**

Cementálás az acél felületi rétegének szénben való dúsítását jelenti diffúziós úton. A **0,2%-nál** kevesebb szenet tartalmazó acél alkatrészek felületébe lehet bevinni szenet diffúzióval. Ha az acélt szénleadó közegbe, ún. cementálószerbe ágyazzuk, akkor megfelelő feltételek között létrejön a széndiffúzió, amelynek során a szén **oldódik** az acél felületi rétegében. **Így a kis széntartalmú, nem edzhető acél felülete edzhetővé válik.** A cementálás hőmérséklete 850-950 °C (4.34. ábra). A cementált kéreg vastagsága általában 0,1-2 mm, széntartalma optimálisan **0,8%** körüli érték, de nem haladhatja meg az 1 %-ot. A kialakuló kéreg vastagságát befolyásolja:

- a hőmérséklet,
- a hőntartási idő,
- az acél vegyi összetétele,
- a szemcseszerkezet,
- a cementálószer,
- valamint az acél felületének állapota.



4.34. ábra Cementálás

A szénleadó közeg, vagyis a cementálószer lehet **szilárd, folyékony** vagy **gáz** halmazállapotú.

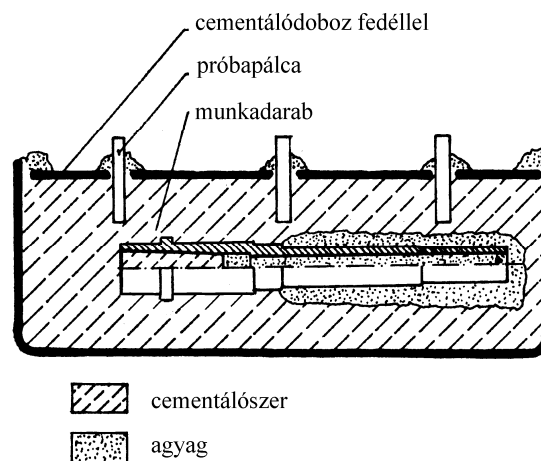
A szilárd cementálószerben való szenítés a legrégebbi eljárás. A cementálószer anyaga faszén vagy bőrszén dara, amely aktivizáló szerként bárium-karbonátot, valamint egyéb anyagokat is tartalmaz. Összetétele lehet pl. 74-78 % faszén, 12-15 % bárium-karbonát ( $\text{BaCO}_3$ ), 1-1,5 % nátrium-karbonát ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), 3-5 % kalcium-karbonát ( $\text{CaCO}_3$ ), valamint kötőanyagként

pakurát vagy melaszt is tartalmaz. Szennyezőként az  $\text{SiO}_2$ -tartalom nem lehet több 0,5 %-nál, S-tartalom 0,1 %-nál.

A faszébázisú cementálószer gyorsan hat, vékony réteg kialakítására alkalmas, míg a lassan ható bórszén cementálószerben vastag kéreg alakul ki. Szilárd szerben történő cementáláskor a kéreg növekedésének üteme óránként 0,1-0,15 mm.

A cementáláshoz az acél alkatrészt egy hőálló fém dobozban cementálószerbe ágyazzák, majd a fedelét agyaggal körbetapasztva, légmentesen lezárják (4.35. ábra). A megfelelő kéregvastagság ellenőrzésekor nem kell a dobozt kinyitni. Az ellenőrzéshez az alkatrész anyagából készült három próbapálca helyeznek a dobozba az ábrán látható módon. A próbapálca a fedél furatán át a dobozba nyúlik és az alkatrészhez hasonlóan cementálódik. Ellenőrzéskor csak ki kell húzni a dobozból, lehűteni, majd eltörni. A töretet savval megmaratva a cementált kéreg láthatóvá tehető.

A folyékony közegben való cementáláshoz általában ciánfürdőt használnak (ciáncementálás vagy cianidálás). Egy ilyen cementáló fürdő összetétele: 85 %  $\text{NaCN}$ , 10 %  $\text{Na}_2\text{CO}_2$ , 2 %  $\text{NaCNO}$ , 1 %  $\text{NaCl}$ . A cementálás hőmérséklete 830-860 °C. Az első órában 0,2 - 0,3 mm vastag kéreg alakul ki, utána mintegy 0,1 mm-rel növekszik a kéreg vastagsága óránként. A ciánfürdő anyagának bomlásakor nemcsak atomos szén, hanem nitrogén is szabadul fel, ami tovább növeli a kéreg keménységét. A gyakorlatban a cianidálás ideje nem haladja meg az 1órát. A kéreg széntartalma csak 0,6 - 0,7 %, így nem alakulhat ki karbidháló. Főként apró tömegcikkék cementálására használják a módszert.



4.35. ábra Dobozba csomagolás cementáláskor

Gázcementálásra atomos szén leadására képes gázkeverékeket használnak. A célra megfelelő a szénmonoxid ( $\text{CO}$ ), a metán ( $\text{CH}_4$ ), a propán ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), bután ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ), valamint elgázosított pirobenzol vagy petróleum.

A nagyteljesítményű, folyamatos üzemű gázcementáló kemencék gázkeverékét alapgázból és cementáló gázadalékból állítják elő.

A folyamatos üzemű csatorna- vagy alagútkemencében az alkatrészek egy kocsira, több rétegben rendezetten rakva haladnak a kemence három

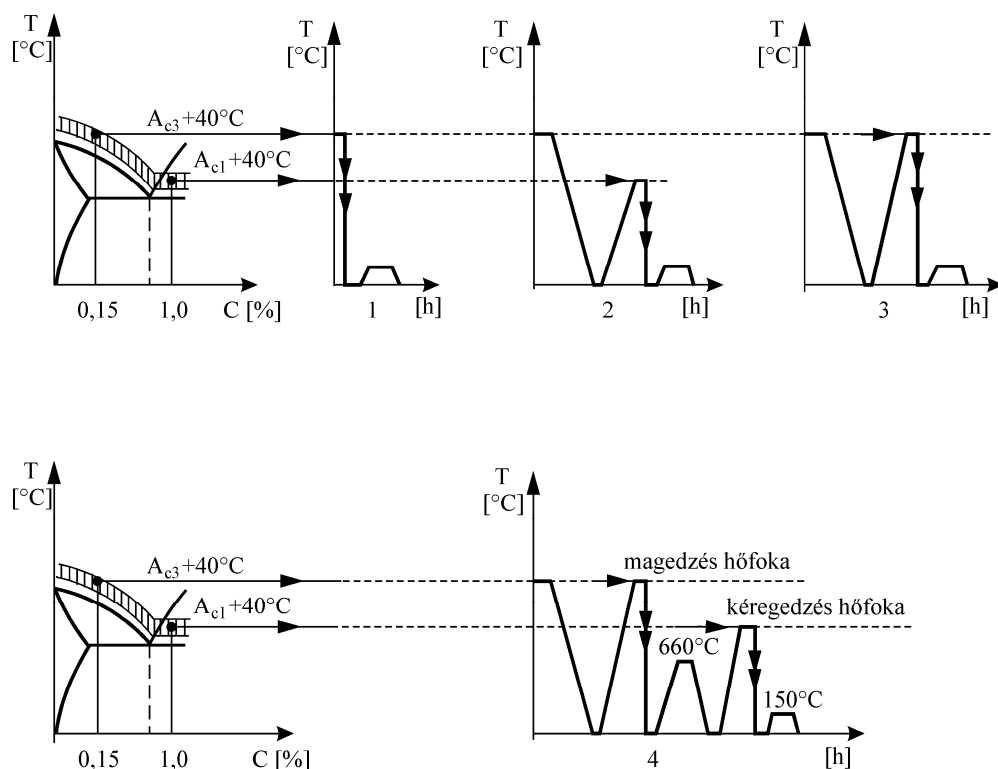
hőszakaszán keresztül. Az első szakaszban előmelegítik 850 °C-ra, metánban szegény gázban a munkadarabokat. A második szakaszban 900 °C-on cementálnak metántartalmú gázkeverékben. A harmadik, a diffúziós szakasz az esetleg kialakult karbidháló elosztatását szolgálja. Hőmérséklete 950 °C és itt semleges gázt alkalmaznak, amely megakadályozza a szén kiegészését és a felület oxidációját.

A szakaszos üzemű aknás gázcementáló kemencék teljesítménye kisebb. Itt a három hőszakaszt egymás után állítják elő a becsepegtetett pirobenzol vagy petróleum percnkénti cseppszámának szabályozásával (pl. 140-200 csepp/perc).

Mivel a szén az acélban oldódik, nem pedig vegyületet alkot, ezért cementálás után a kéreg nem lesz kemény, csupán edzhetővé válik. A kemény kéreg létrehozásához tehát még további hőkezelésre, **edzésre** van szükség. **Azt az összetett hőkezelési eljárást, amelynek során a nem edzhető (0,2 %-nál kisebb széntartalmú) acél felületét megfelelő mértékben cementálják, majd megedzik, betétedzésnek nevezik.**

A betétedzet acél felülete kemény, kopásálló, míg a magrészt edzetlen marad. Az elvárásoktól függően a betétedzést többféle módon lehet végrehajtani (4.36. ábra). Eszerint megkülönböztetünk:

1. közvetlen edzést,
2. kéregedzést,
3. magedzést,
4. kettősedzést.



4.36. ábra Betétedzések fajtái

A **közvetlen edzés** során az alkatrészt nem hagyjuk lehűlni cementálás után, hanem közvetlenül a cementálási hőfokról azonnal leeddzük (4.36/a. ábra). Az eljárás gazdaságos, nem kell az alkatrészt újra felhevíteni, de az alkatrész vetemedésre hajlamos lesz, a magrész durva szemcsézetű és viszonylag kis szilárdságú.

Tagolt, bonyolultabb alkatrészeket, ha felületük kopásnak van kitéve célszerű **kéregedzeni**.

Cementálás után az alkatrészt lassan hűtik (4.36/b. ábra). Ezt követően az acélt újra felhevítik a kéreg összetételnek megfelelő edzési hőmérsékletre és onnan a kéreg szénttartalmának megfelelő hűtési sebességgel leedzik. Az ilyen módon hőkezelt kéreg megfelelő keménységű lesz és nem vetemedik. Mivel a mag széntartalma kicsi, a kéreg alacsonyabb edzési hőmérsékletén nem változik.

**Magedzést** akkor alkalmaznak, ha a magnak szívósnak kell lenni. Ilyenkor a cementálás hőmérsékletéről lassan hűtik le az alkatrészt, majd újra felhevítik, de a mag szénttartalmának megfelelően az ausztenit mezőbe, a GS vonal fölé 30-50 fokkal (4.36/c. ábra). Innen a mag szénttartalmának megfelelő sebességgel lehűtik. Az eljárás elnevezése félrevezető, hiszen a kis szénttartalmú mag nem edzhető. A hőkezelés hatására a **mag szemcséi finomodnak**, a mag nagyobb szilárdságú lesz, a kéreg ugyan leedződik, viszont durvul a magasabb hőmérsékletről végrehajtott gyors hűtés miatt.

Ha az alkatrész igénybevétele megkívánja a szívós, finomszemcsés magot, valamint a finomszerkezetű, kemény felületet, az ún. **kettősedzést** kell alkalmazni. Az eljárás lényegében egy magedzésből, majd egy kéregedésből áll. A cementálás után az alkatrészt lassan hűtik, majd a mag szénttartalmának megfelelő magas hőfokról gyorsan lehűtik (4.36/d. ábra). Ezután az alkatrészt 650-680 °C-on lágyítják, végül a kéreg szénttartalmának megfelelő alacsonyabb hőfokról újra leedzik. Ezzel mind a mag, mind a kéreg finomszerkezetű lesz.

A betétedzés után, függetlenül annak módszerétől, feszültségcsökkentő izzítást kell alkalmazni a későbbi repedések elkerülése végett. Ez egy 150-200 °C-os hevítésből, hőntartásból és normálhűtésből áll.

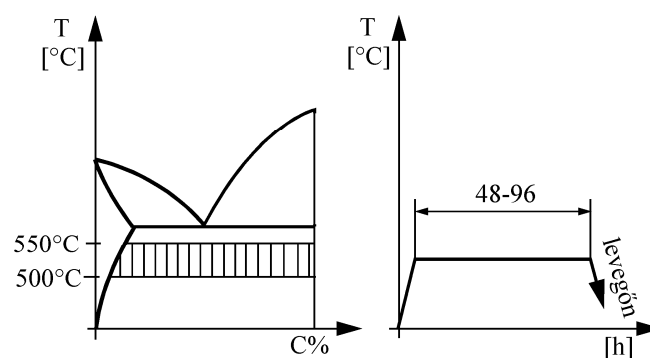
Ha egy alkatrésznek nem kell az egész felületét cementálni, csak bizonyos részeit, akkor a cementálni nem kívánt részt a széndiffúzió megakadályozására, védőbevonattal kell ellátni. Ez lehetséges ún. linitpépes bevonattal vagy galvanikus rézbevonattal. (A linitpép két rész zsírkő, egy rész víz, egy rész agyag és vízüveg elegye, egymásban jól elkeverve.)

### **Nitridálás (nitrálás)**

Nitridálás során az acél felületi rétegébe atomos nitrogént visznek be diffúzió révén. Az ötvözés hatására nő a kéreg **keménysége**, **kifáradási határa**, **korrózióállósága**. A nitridálásnak két fajtája van. Az egyik elsősorban a keménységfokozást szolgálja. Ez az ún. **kemény nitrálás**. Főleg a másik két tulajdonság fokozását szolgálja az ún. **lágynitrálás**.

Az acélba diffundált atomos nitrogén a vassal a felületen  $\epsilon$ -fázisnak nevezett ( $\text{Fe}_2\text{N}$ ) **vasnitrid** vegyületet hoz létre, aminek igen nagy a keménysége. Beljebb egy vékonyabb, de még keményebb ún.  $\gamma$ -fázis, ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ) **másik vasnitrid vegyület** alakul ki. A megfelelő nitridálhatóság érdekében az acélokat alumíniummal (Al), krómmal (Cr) kell ötvözni, így stabil nitridek képződnek. A magszilárdság fokozására még vanádium (V) és molibdén (Mo) ötvöztetést is alkalmaznak. A nitridálást mindig nemesítésnek kell megelőzni. A nitridálható acél széntartalma 0,25-0,4 %.

Legáltalánosabban ammóniás gáznitrálást alkalmaznak, amit mindig megelőz az alkatrész zsírtalanítása. A nitrálás hőfoka általában 500-550 °C. Hevítés után az elérni kívánt kéregvastagságnak megfelelően, 48-96 óráig kell hűntartani az alkatrészt, majd levegőn lehűteni (4.37. ábra).

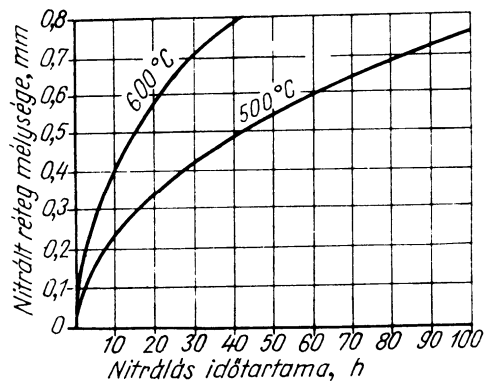


4.37. ábra Nitridálás

A nitrált kéreg vastagsága a nitrogéndiffúzió idejétől függ (4.38. ábra). Az ábra jól mutatja, hogy a diffúzió idővel jelentősen lelassul. 500 °C-on 10 óra alatt 0,25 mm kéreg képződik, de újabb 0,25 mm-es kéregvastagság növekedéshez már háromszor annyi idő kell. Leggyakrabban 48 órás nitrálási időt és ennek megfelelően kb.0,5 mm-es nitridált kérget szoktak kialakítani, de 96 óránál (4 nap) tovább sohasem nitrálnak.

A nitrált kéreg jellemzője tehát, hogy viszonylag vékony (0,2-0,5 mm), a betétedzett kéregnél keményebb mintegy 30 %-kal (1150 HV). Jelentős eltérés, hogy a nitridált kérget nem kell edzeni, mivel itt kemény, fémes vegyület képezi a kérget, amely magasabb (400 °C) hőmérsékleten sem lágyul ki, kopásálló marad. A nitridált alkatrésznél nem kell elhúzódtástól tartani. A nitridált kéreg kifáradási határa nő, és a kéreg bizonyos fokú korrózióvédelmet is nyújt.

Ha nem a keménységnövelés az elsődleges, az ún. lágynitrálást alkalmazzák, amit nitrogént leadó sófürdőben hajtanak végre. A lágynitrálás hőfoka 570 °C, a hűntartási idő 2-4 óra. Az eljárás során csekély a méretváltozás és az elhúzódtás veszélye. Ezzel a hőkezeléssel az ötvöztelen acélok felületi keménysége is fokozható.

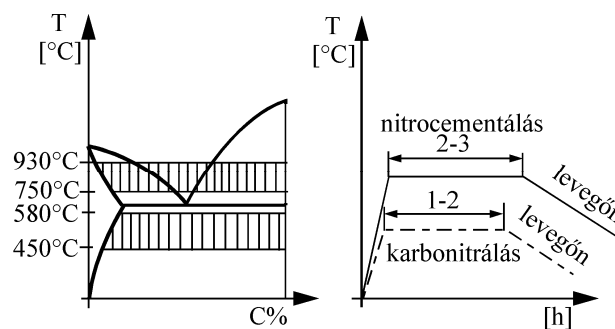


4.38. ábra A nitridált kéreg vastagsága

### Nitrocementálás, karbonitrálás

Ezek az eljárások a cementálásnak és a nitrálásnak az együttes alkalmazását jelentik. **Az acélt egyidejűleg szénrel és nitrogénnel ötvözik** (4.39. ábra). Az alkatrészt szén és nitrogént leadó közegben hevítik. Nitrocementáláskor (a cementálás a domináns folyamat) 650-930 °C-ra, karbonitráláskor 570° körüli hőmérsékletre hevítenek, majd 2-3 órás hőntartást alkalmaznak.

A nitrocementált kéreg  $\epsilon$ -fázisú ( $\text{Fe}_2\text{N}$ ), majd alatta martenzites övből tevődik össz. Az előbbi kopásállósága és korrózióállósága megközelíti a lágynitridálással kialakított kéregét, az alatta található martenzites öv a nagyobb erőhatások elviselésére teszi alkalmassá a réteget. A nitrocementálás a nagyobb széntartalmú acélok kérgesítésére is alkalmas. A kifáradási határt jelentősen növeli.



4.39. ábra Nitrocementálás, karbonitrálás

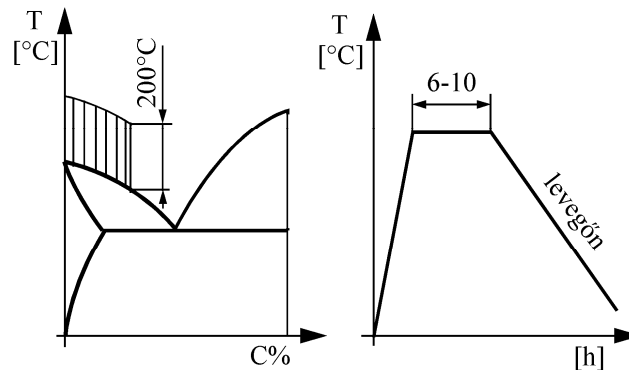
*A karbonitridálás sok esetben helyettesítheti a cementálást. Az alacsonyabb hőmérsékletű, rövidebb ideig tartó eljárás energiamegtakarítással, valamint kisebb deformációkkal jár. A helyettesítést azonban csak a gyártástechnológiai követelmények messzemenő figyelembevételével lehet megvalósítani.*

### Alitálás

Az alitálás (bauxittermizálás, alumetálás) a kis széntartalmú acélok felületének alumíniummal való ötvözését jelenti a tűzállóság növelése, revésedésre való hajlamának csökkentése céljából.



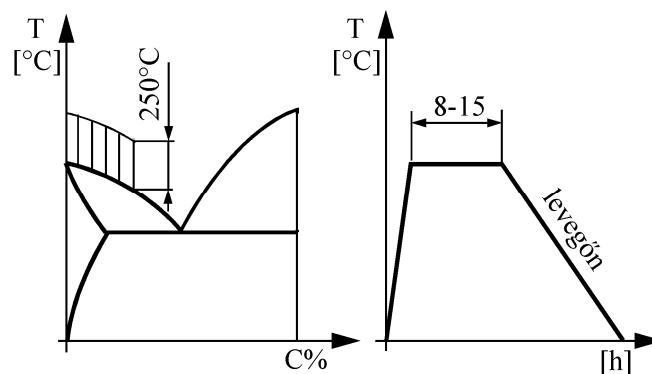
A zsírtalanított, megtisztított alkatrészt dobozban vagy retortában alumínium, timföld és ammóniumklorid keverékébe ágyazva 850 - 1100 °C-on izzítják 6-10 óráig (4.40. ábra). Az alított acélok hőállósága 850 °C-on 20-30-szoros, 900 °C-on 10-15-szörös és 1000 °C-on is még 3-6-szoros a nem alított acélokhoz képest. Az eljárás tág lehetőségeket biztosít a melegüzemű iparágakban az erősen ötvözött hőálló acélok helyettesítésére. Gáz- és olajégők, gőzkazánok csöveit, pirométerek védőtokját alítva lényegesen megnövelhető élettartamuk és ugyanakkor olcsóbb anyagból gyárthatók.



4.40. ábra Alitálás

### **Kromálás**

Kromálásnál a kis széntartalmú acélokat kérgesítik oly módon, hogy krómot leadó közegbe ágyazva vagy gázállapotú Cr-kloridban ( $\text{CrCl}_2$ ) a felületébe diffundáltatják a krómatomokat. Ha az acél tartalmaz titán (Ti) ötvözőt, az csökkenti a szén krómot megkötő hatását. A krómot tartalmazó kéreg jobban ellenáll a korróziónak, keményebbé és hőállóbbá válik. Az acélt 950-1100 °C-on 8 - 15 órán át hevítik, majd levegőn lehűtik (4.41. ábra). A kromált kéreg vastagsága 0,2 - 0,3 mm.



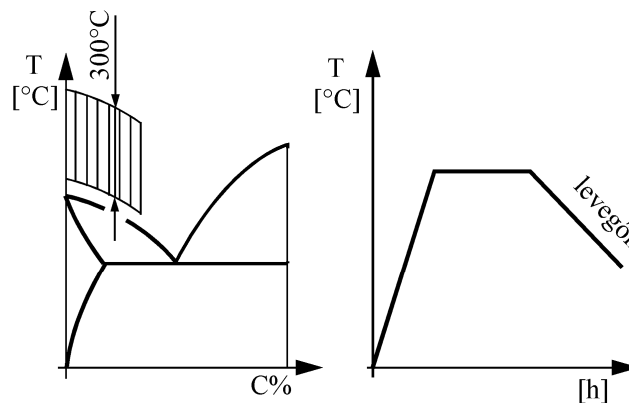
4.41. ábra Kromálás

A nagyobb széntartalmú acélokban a szén a króm egy részével krómkarbidot és komplex karbidokat képez, ami jelentősen növeli **kopásállóságát**, a szerszámok forgácsoló képességét, élettartamát. A nagy, 25-60 % krómtartalmú

kéreg **savak korróziós hatásának** is jól ellenáll. Sok esetben erősen ötvözött saválló acélok kiválthatók kis széntartalmú, kromált acéllal.

### **Szilikálás**

Szilikálás a kis széntartalmú acélok felületének ötvözését jelenti szilíciummal (Si). Célja az acél **savállóságának** növelése. A szilikálást 950-1200 °C-on hajtják végre, leginkább gázfázisú Si-kloridban (4.42. ábra). A kéreg 6 %-os Si-tartalma már **hőállóságot** biztosít, de a jó savállósághoz 14-15 % Si-tartalom kell. Az eljárással csak 11 % biztosítható, ami csak részben biztosít savállóságot. Az eljárás költségei, így nincsenek arányban az eljárás biztosította előnyökkel.



4.42. ábra Szilikálás

## **4.4 Öntöttvasak hőkezelése**

### **4.4.1 Szürkeöntvény hőkezelése**

Az öntöttvas hőkezelésének több célja lehet:

- feszültségek csökkentése,
- megmunkálhatóvá lágyítása,
- kopásállóságának fokozása.

Az öntöttvas fő szöveteleme általában a perlit, de a fémes rész egységét sok grafit lemez megszakítja meg. Ez nemcsak az ép keresztmetszetet csökkenti, de a lemezek szélei feszültséggyűjtő helyek. Mindez rontja a szívósságát. A szürkeöntvény tulajdonságai annál jobban javíthatók hőkezeléssel, minél kevesebb szennyezőt tartalmaz (S, P), és minél finomabb a grafitlemezek eloszlása. Legeredményesebben hőkezelhető a modifikált (finomlemezes) és a gömbgrafitos vasöntvény. Mivel a szürkeöntvénynek rossz a hővezető képessége, így érzékeny a hevítés sebességére:

- kis öntvények esetén 150 – 170 °C/óra,
- nagyobb öntvényeknél 50 – 80 °C/óra lehet.

#### 4.4.1.1 Szürkeöntvény feszültségcsökkentése

Mivel az öntvény kérgé és magrésze az öntőformában nem egyszerre hűl, benne feszültségek maradnak vissza. Ez a kéregben általában nyomó, a magban húzó feszültséget jelent. Megmunkáláskor az öntvény ezért elvetemedhet. Hőkezelés nélkül, az öntvényt hónapokig pihentetik, míg a feszültségek egy része oldódik benne (természetes öregítés).

A hőmérséklet növelésével ez a folyamat órákra rövidíthető és így a feszültségcsökkenés is jelentősebb lesz. A szövetelemek bomlása miatt a hevítés felső határa 550 °C.

Az öntvényt a hideg vagy 200 °C-os kemencével együtt kell **hevíteni**. A **hőntartás** a falvastagságtól függ, milliméterenként 2 óra. A **hűtés** kemencében történik 300 °C-ig, a véghűtés nyugodt levegőn folytatódik.

#### 4.4.1.2 Szürkeöntvények lágyítása

Ez a hőkezelési eljárás nem azonos az acélok lágyításával. Lényegében az öntési technológia hibáját javítja, de közben az öntvény szilárdsága is csökken általa. Erre akkor van szükség, ha az öntvény felületi rétege gyorsan hűlve ledeburitossá szilárdult, „kifehéredett”.

A **hevítés** 500 °C-ig, mint a feszültségcsökkentésnél, lassan történik, majd 850 – 900 °C-ig gyorsan lehet hevíteni. A **hőntartás** ideje 0,5 – 5 óra, a kéreg tulajdonságától és az elérendő keménységtől függően. A **hűtés** kemencében történik 300 °C-ig, a véghűtés nyugodt levegőn folytatódik.

Lehet gyorslágyítást végezni, ahol a hevítés történhet **indukciós úton** vagy **sófürdőben**.

#### 4.4.1.3 Öntvények edzése

Az öntvény edzésének az a célja, hogy a kéreg kemény, kopásálló legyen. Végrehajtása az acéléhoz hasonló, ezért nem részletezzük. Edzés után feltétlenül kell egy alacsony hőmérsékletű megeresztést alkalmazni a repedések elkerülése érdekében. A hőntartási idő nagyobb, mint az acélok hőkezelésénél, mivel itt meg kell várni, amíg az ausztenit a szabad grafitból felveszi a szükséges szénmennyiséget a martenzitté alakuláshoz.

#### 4.4.1.4 Öntvények szívósságát fokozó hőkezelések

A szürkeöntvények szívósságát **normalizálással** és **nemesítéssel** növelik. **Normalizálásnál** 850 – 900 °C-ra hevítik, 1- 3 óráig hőntartják, majd levegőn hűtik le. A hőkezelés során **finomlemezes perlites – grafitos** szövetszerkezet alakul ki.

A nemesítés hasonló az acélok nemesítéséhez, edzésből és magasabb hőfokú megeresztésből áll. Az elérhető szívósság nagymértékben függ a grafiteloszlástól, a grafit alakjától.

#### 4.4.2 A fehéröntvény hőkezelése

A ledeburitos, cementites fehér vasöntvény gyakorlati felhasználásra nem alkalmas ridegsége, keménysége miatt. A kis méretű öntött alkatrészek viszont a kistömegük miatt gyorsan hűlnek, így a metastabilis rendszer szerint kristályosodnak, ledeburitos, cementites öntvénné szilárdulnak. Utólagos hőkezeléssel, ún. **temperálással** azonban, ezek is grafitos öntvénné alakíthatóak. Az eljárás csak kisméretű öntvényeknél alkalmazható.

A temperálás lényege, hogy a fehéröntvényt 950 °C körüli hőfokon hevítik, sok órán át hőntartják. Mindezt több szakaszban végzik, így bontva el az öntvény ledeburitját, cementitjét. A szén diffúzióval ún. temperszén csomókban gyűlik össze helyenként, és kristályosodik ki. Az ilyen öntvény törete a grafitzárványoktól sötét színű, ezért **fekete temperöntvényeknek** nevezik.

Ha a temperálást nem semleges, hanem **oxidáló közegben** végzik, akkor az elbomlott cementitből felszabaduló szén oxidálódik, kiég az öntvényből. Oxidáló közeg lehet például aprószemcsés vörösvasérc. Az így temperált öntvény töret nem lesz szürke, illetve fekete, mivel nem tartalmaz grafitzárványokat. Az öntvényt alkotó ferrit kristallitok miatt a töret fehér, fémes fényű, ezért az ilyen öntvényt **fehér temperöntvénynek** nevezik.

A gyakorlatban csak a 2 – 3 mm falvastagságú öntvényeket temperálják teljesen ferritesre. Nagyobb falvastagság esetén a szövetszerkezet ferrit-perlites.

#### 4.5 Alumínium ötvözetek nemesítése

Az alumínium szilárdsága nem nagy, mintegy 100 N/mm<sup>2</sup>. Réz, nikkel, magnézium ötvözőkkel ez mintegy a kétszeresére növelhető. Az ötvözet alakításával ez az érték tovább növekszik. Ha az ötvözetet hőkezelik is, az alumíniumötvözet szilárdsága elérheti a 400 –500 N/mm<sup>2</sup> szilárdságot.

Az alumíniumötvözetek szilárdságnövelő hőkezelését nemesítésnek nevezik. Ez nem azonos az acélok nemesítésével. Csak azok az alumíniumötvözetek nemesíthetők, amelyek az ötvözőkkel intersztíciós szilárd oldatot képeznek, mivel az eljárás a korlátolt oldáson alapszik.

Például ha egy 4 % réztartalmú alumíniumötvözetet lehűtenek szobahőmérsékletre (1.53. ábra), akkor a kialakult  $\alpha$ -szilárd oldat a korlátolt oldhatósági vonal elérésekor telítetté, majd túltelítetté válik, és belőle a réz válik ki rézaluminát (CuAl<sub>2</sub>) formájában, a kristallitok határára. Ez, mint rideg fémvegyület, kedvezőtlenül befolyásolja az ötvözet szilárdságát, alakíthatóságát.

Nemesítéskor előbb az ötvözetet felhevítik  $\alpha$ -szilárd oldat mezőbe, így újra felbontva a vegyületet és feloldva a kivált rézet. Ezt a lépést egy gyors hűtés követi. Így a diffúziós utak lerövidülése miatt az újra kiváló réz, nem tud a krisztallithatárig diffundálni, hanem a krisztalliton belül marad. Idővel spontán módon is, de kissé felmelegítve az ötvözetet gyorsabban, megkezdődik a rézaluminát kiválása, most már a krisztallitokon belül, **finom, egyenletes eloszlásban** (finoman diszpergált módon), ami jelentősen növeli az ötvözet szilárdságát. Az alumínium nemesítése tehát egy kiválásos, ún. **szegregációs** folyamat.

## 5. Hőkezelés gyakorlata

A hőkezelő eljárások hevítésből, hőntartásból, hűtésből esetleg kéregötvözésből állnak. Ezeknek a műveleteknek, műveleti elemeknek a végrehajtásához különféle módszerekre, eszközökre, berendezésekre van szükség. A következő fejezetben ezek legalapvetőbb fajtáit tekintjük át röviden, amelyeket a gépek, eszközök gyártásánál széles körben használnak.

### 5.1 Alkatrészek hevítése hőkezeléskor

A hőkezelő eljárásokhoz a hőmérséklet *érzékelésére és szabályozására* alkalmas eszközzel ellátott hevítő- és hűtőberendezéseket használnak. A munkadarabok befogásához, illetve továbbításához *készülékek és anyagmozgató berendezések* is szükségesek.

#### 5.1.1 Hevítő berendezések és kiegészítő eszközök

A munkadarabokat hőkezelő kemencékben hevítik. A megfelelő hőkezelő berendezés kiválasztásához többféle szempontot kell figyelembe venni. Ezek közül a legalapvetőbbek:

1. a hőkezelési technológia,
2. a rendelkezésre álló energiahordozó,
3. a hőátadás módja,
4. a munkadarabok mérete és darabszáma,
5. az üzemeltetés módja

A ***hőkezelési technológia*** a kemence olyan felépítését követeli meg, hogy benne (a kemencetérben) kialakulhasson a megfelelő és egyenletes hőmérséklet, továbbá biztosítható legyen a munkadarabot körülvevő atmoszféra kémiai összetétele.

A rendelkezésre álló *energiahordozó* azt határozza meg, hogy szilárd, folyékony, gáznemű tüzelőanyaggal fűtött vagy elektromos energiával működtetett kemencét üzemeltetünk-e.

A *hőátadás módja* lehet *közvetlen* vagy *közvetett*. A közvetlen fűtésű hőkezelő kemence munkaterében felszabaduló kémiai hő sugárzással és érintkezéssel (konvektív módon) adódik át a munkadarabra. A korszerű hőkezelési technológiák viszont megkövetelik, hogy a munkadarab felülete közvetlenül ne érintkezzen az égéstermékekkel. A munkadarab a melegítéséhez szükséges hőt, az égésteret és munkateret elválasztó válaszfalon át, vezetés és sugárzás útján kapja *közvetve*, indirekt hevítés útján.

Fontos a hevítő berendezés méretének, teljesítményének helyes megválasztása, mivel túl kis méretű kemencébe nehéz a munkadarabokat (készülékkel együtt) megfelelő módon behelyezni, kivenni. Ezen túl, a nem megfelelő teljesítményű kemence alkalmazása nem teszi lehetővé a megfelelő

hevítési idők betartását vagy a túl kis adagnagyságok miatt, használatuk gazdaságtalan.

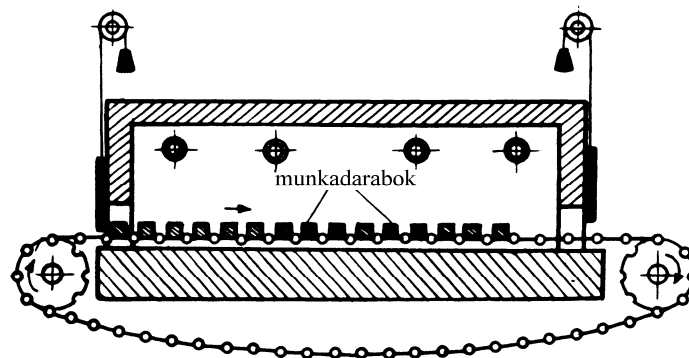
Az *üzemeltetés módja* szerint megkülönböztetünk *szakaszos* és *folyamatos* működésű kemencéket. A szakaszos üzemű kemencékbe helyezett munkadarabok a hőkezelés folyamata alatt nem változtatják a helyüket. A folyamatos üzemű kemencékben mozog a munkadarab, és a szükséges művelet befejezése után elhagyja a kemencét.

Folyamatos üzemű kemencék

Ha nagyszámú, azonos méretű és anyagminőségű munkadarabot kell azonos módon hőkezelni, a folyamatos üzemű hőkezelő kemencék gazdaságosan használhatók. Ezek jól szabályozhatók, a technológiai paraméterek pontosan betarthatók. A bennük hőkezelt alkatrészek minősége egyenletes. Egyes típusaikban megfelelő gázatmoszféra hozható létre. Használatuk során, az üresjáratú veszteségek, csak jól szervezett munkával csökkenthetők. Viszonylag nagy a beruházási igényük. Többféle típusuk terjedt el:

- alagútkemence,
- gurító- és tolókemencék,
- karusszelkemencék,
- forgódobos kemencék stb.

A 5.1. ábra egy szállítószalagos alagútkemencét mutat be.



5.1. ábra Szállítószalagos alagútkemence

Szakaszos üzemű kemencék

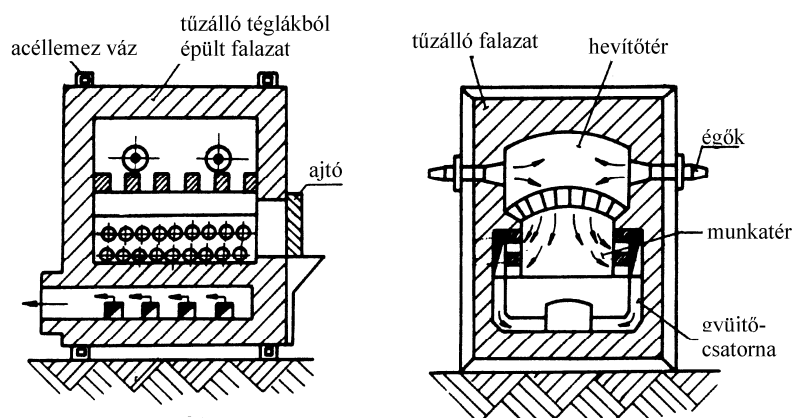
*Időszakos működésű* kemencéknek nevezzük azokat, amelyeknek üzemeltetési szakaszai között üzemszünetek vannak, amikor a kemence teljesen lehül, egy ideig nem használják a kemencét.

A *szakaszos üzemű* kemencék állandóan üzemelnek, de a hőkezelési technológiától függően felfűtési és részben lehülési periódusok váltják egymást. Ebbe a csoportba tartozó néhány fontosabb kemencetípus:

- kamráskemencék,
- aknáskemencék,
- harangkemencék,
- tégelykemencék.

A **kamrás kemencék** - a munkadarabok méretétől és alakjától függetlenül - többféle hőkezelési eljárás elvégzésére alkalmasak. A kisebb méretű kemencéket készre szerelve szállítják a gyártó vállalatok, a nagyobbakat a helyszínen falazzák. Üzemeltetési költségeik szerények, kiszolgálásuk viszont munkaigényes. A közvetlen fűtésű kamrás kemencékben az égéstermékek közvetlenül érintkeznek a hevítendő munkadarabbal. A közvetett fűtésűekben viszont az égéster és a munkatér közötti válaszfalon, vezetéssel és sugárzással jut a szükséges hőmennyiség a munkadarab felületére. Ez utóbbiak munkatere védőgázzal is feltölthető.

Gáz- vagy olajtüzelésű, közvetlen fűtésű kamrás hőkezelő kemencét szemléltet a (5.2. ábra). Falazata acéllemez vázból és tűzálló téglából épül fel. A kemencét az oldalfalon elhelyezett égők hevítik. A hevítő- és a munkatert rácsos falazat választja el egymástól. A fűtőgázok a rácson keresztül jutnak a munkatérbe és ennek oldalfalán át, távoznak a gyűjtőcsatornába. A kemence ajtaja kézi erővel, esetleg hidraulikus vagy pneumatikus mechanizmus segítségével mozgatható.

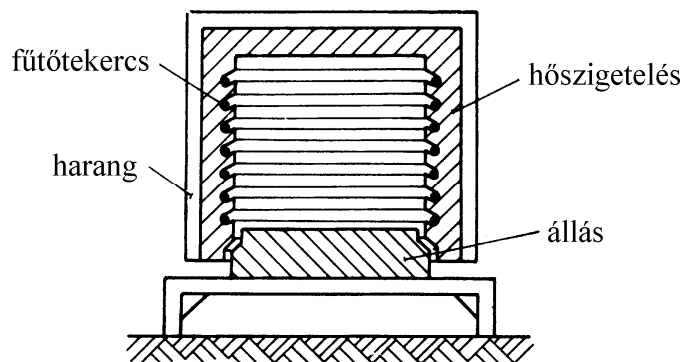


5.2. ábra Kamrás kemence

A munkadarabokat úgy kell a kamrás kemencékbe helyezni, hogy minél nagyobb felületen feküdjenek fel, nehogy saját súlyuk alatt vetemedjenek. Ha ez nem lehetséges, a jó felfekvés biztosítására a darabot több helyen alá kell támasztani, esetleg az elhúzóást megakadályozó, **edzőkészüléket** kell alkalmazni. Célszerű a munkadarabok között elegendő helyet hagyni, hogy a füstgázok szabadon áramolhassanak.

A **harangkemencék** (5.3. ábra) a kisméretű vagy nagy tömegű munkadarabok hőkezelésére alkalmasak. Felépítésük lehetővé teszi, hogy a munkatert képező kemencetestet, a harangot le lehessen emelni a munkatér aljáról, az ún. állásról, palettáról. A jobb időkihasználás céljából több állást építenek, mint a harangok száma. Így, amíg egy adag izzik a kemencében, a szabad álláson előkészíthető a másik adag.





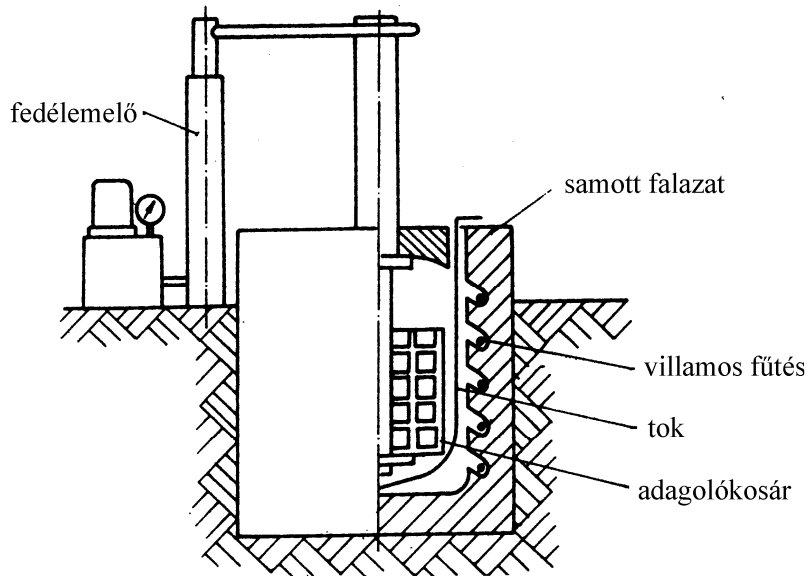
5.3. ábra Harang kemence

Kisebbségi teljesítményű kemencéket gyakran építenek villamos fűtéssel. **Az ábra villamos fűtésű harangkemencét szemléltet, amely sima betonlapon áll. A harang köpenyébe samott hőszigetelést és fűtőtekercset építenek.**

A harangkemencék szakaszos üzeműek, üzemeltetési költségeik átlagosak. Kiszolgálásuk egyszerű. Csoportos telepítésük esetén munkaerőigényük kicsi. Az **aknás kemencék** munkatere olyan henger, amelynek magassága átmérőjének többszöröse is lehet. Gyakran a talajszint alá süllyeszti őket. Bennük a revésedés elkerülése érdekében túlnyomórészt védőgázt használnak. Hosszú munkadarabok függőleges helyzetű hőkezelésére alkalmasak. A hevítendő betétanyag berakása egyszerű, mert a munkadarabok csak függőleges irányú mozgást igényelnek. Használatuk azért is előnyös, mert a függesztett helyzetű munkadarabokon elhúzóerők nem keletkeznek.

A gépiparban a gáz- és villamosfűtésű aknás kemencék terjedtek el. Villamosellenállás-fűtésű kemencét mutat be a 5.4. ábra. A samott falazatban helyezkedik el a villamos fűtést, amit a hevítőtértől a tok választ el. Az adagolókosárba helyezett munkadarabok között ventilátor áramoltatja a fölmelegített levegőt vagy gázt. Hidraulikus fedélemelő nyitja és zárja a kemencét. Az aknás kemence energiaköltsége nagy. Előnye a jó szabályozhatóság és a kis beruházási költség.

A **tégelykemencék**, mint a nevük is mutatja, folyékony hevítőközegben, például sófürdőben történő hőkezeléshez használatosak. A tűzálló anyagból vagy hőálló acélból készített tégelyt falazott kemencetestbe helyezik. Gáz-, olaj- vagy villamos fűtésűek lehetnek. A hőkezelő fémsókat a tégelyben olvasztják meg és a munkadarabot meghatározott időre a fürdőbe merítik. Mivel a fürdő ellepi a tárgyat, az még a tégely közvetlen fűtése esetén sem érintkezhet füstgázzal, levegővel, a hőkezelés tartama alatt. A grafitból, szilíciumkarbidból vagy acélból készülő tégelyek elhasználódnak, ezért időnként cserélni kell őket. A magas hőmérsékletű edző és cementáló sófürdős kemencéknek elszívó berendezéssel is rendelkezniük kell.



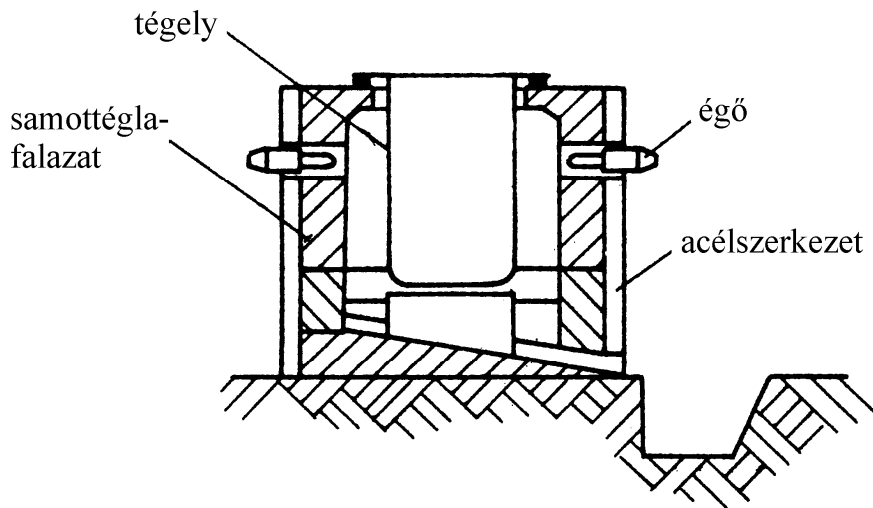
5.4. ábra Aknás kemence

Közvetlen tüzelésű tégelykemence látható a 5.5. ábrán. Acélszerkezetét samott-téglával szigetelik. A tégely a tűzálló anyagból kiképzett felületre támaszkodik. A gáz- vagy olajégő a kemence tűzálló falazata és a tégely közötti teret hevíti. A hasznos hő vezetéssel, a tégely falán át jut el a sófürdőhöz és a kezelendő munkadarabhoz.

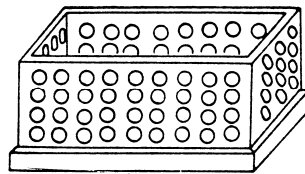
### A hőkezelés anyagmozgató berendezései

A hőkezelés gépesítése a kemencék működtetésén, pl. az ajtók nyitásán és zárásán kívül magába foglalja a kemencén kívüli és belüli anyagmozgatást is. A kemencén kívüli anyagmozgatásban az emelőgépek, daruk, futómacskák kaptak fontos szerepet. E berendezések nagy melegben dolgoznak. Kiválasztásukkor ügyelnünk kell arra, hogy a kezelésükkel megbízott dolgozók a sugárzó hőtől, a kifröccsenő hűtőfolyadéktól, a sófürdők anyagától, valamint a gázoktól és gőzöktől védve legyenek.

A kemencébe helyezés és a kemencén belüli anyagmozgatás megkönnyítése céljából a hőkezelendő munkadarabokat alakjuktól és méretüktől, továbbá a kemence rendszerétől függően, kosarakba vagy függesztő keretekre helyezik. A kosarak (5.6. ábra) ötvöztelen vagy ötvözött acélból, öntött vagy hegesztett kivitelben készülnek. Tömegáru és kisméretű anyagok hőkezeléséhez alkalmasak.

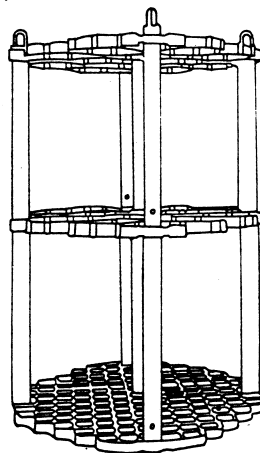


5.5. ábra Tégelykemence



5.6. ábra Hőkezelő kosár

A függesztőkeretek (5.7. ábra) a munkadarabok hőkezelés alatti deformációját csökkentik, és egyben meghatározzák azok egymás közti távolságát is. A kemence típusától függően a kosarak és függesztőkeretek vagy állnak a kemencében, vagy folyamatos, esetenként szakaszos mozgást végeznek.



5.7. ábra Függesztő állvány

### 5.1.2 A hevítendő adagnagyság meghatározása

Ha egy adott teljesítményű kemencébe nagytömegű alkatrész adagot helyezünk, azt hosszabb idő alatt tudja felhevíteni egy meghatározott

hőmérsékletre, mintha egy kisebb tömegű adagot hevítenénk. Ahhoz, hogy a hevítési idő ne haladja meg, a számítással meghatározható optimális hevítési időt, ahhoz a kemencébe egyszerre **berakható tömeg nagyságát**, mindig számítással kell meghatározni.

A hőkezelő kemencékbe „egy adagként” berakható darabszámot a kemence típusa és a rendelkezésre álló teljesítmény adatai alapján számíthatjuk ki.

A kamrás kemencéknél, pl. az  $A_f$  [m<sup>2</sup>] **fűtőfelület** és a  $P_k$  [kg/m<sup>2</sup> h] **fajlagos fűtőteljesítmény**, az aknás kemencéknél pedig az  $M_b$  [kg/h] **fajlagos, maximális betéttömeg** ismeretében, egy adott  $t_{hev}$  [h] **hevítési idő** esetén az egyszerre berakható tömeg kiszámítható.

**Kamrás kemence** esetében a berakható tömeg ( $M_a$ ):

$$M_a = A_f \cdot t_{hev} \cdot P_k \text{ [kg].}$$

**Aknás kemence** esetében a berakható tömeg ( $M_a$ ):

$$M_a = M_b \cdot t_{hev} \text{ [kg].}$$

A kemence által hevítendő tömegbe természetesen nemcsak a munkadarabok, de az alkalmazott *függesztőkeret* vagy *edzőkosár* tömegét is bele kell számítani. Így a kemencékbe egyszerre berakott tömeg ( $M_a$ ):

$$M_a = n \cdot M + M_k \text{ [kg],}$$

- M – egy munkadarab tömege [kg],
- n – az egy adagként berakható darabszám,
- $M_k$  – az alkalmazott készülék tömege [kg].

**Adagnagyság kamrás kemencénél:**

$$n = \frac{M_a \cdot t_{hev} \cdot P_k - M_k}{M} \text{ [db].}$$

**Adagnagyság aknás kemencénél:**

$$n = \frac{M_b \cdot t_{hev} - M_k}{M} \text{ [db].}$$

### 5.1.3 A hőkezeléseknél alkalmazott hőmérők és hőszabályozó eszközök

A hőmérséklet mérésére szolgáló berendezéseknek különféle típusai alakultak ki. Mindegyik elve valamilyen fizikai jelenségen alapul:

- különböző halmazállapotú anyagok hőtágulásán (1 000 °C-ig),
- a magas hőmérsékletű testek fénykibocsátásán (izzási szín) (2 500 °C-ig),
- az ún. *feketemeleg* acélok felületén képződő oxidhártya fényinterferenciáján (futtatási szín 330 °C-ig),
- hőelektromos hatáson (1500 °C-ig),
- fémek hőmérsékletével változó villamos ellenálláson (1000 °C-ig).

Hőkezelő, valamint más melegüzemi eljárásoknál csak olyan hőmérő eszközök használata jöhet szóba, amely megfelelő pontossággal 1000 °C, sőt ennél magasabb hőmérsékletek mérésére alkalmas.

Régebben az acél hőmérsékletét az úgynevezett izzítási, illetve futtatási színskála alapján ítélték meg. Ez a módszer igen szubjektív és pontatlan. Pontosságát például a helyiség fényviszonyai, de az ötvözet összetétele is befolyásolja.

Az **izzítási színskála** hőmérsékletértékei a következők:

520- 580 °C	feketésbarna,
580- 650 °C	barnásvörös,
650- 750 °C	sötétvörös,
750- 780 °C	sötét cseresznyevörös,
830- 880 °C	világosvörös,
880-1050 °C	sárgásvörös,
1050-1150 °C	sötétsárga,
1150-1250 °C	világossárga,
1250-1350 °C	fehéren izzó.

A **megeresztéseknél** használatos futtatási színskála hőmérsékletértékei:

210 °C	sárgásfehér,
220 °C	világossárga,
230 °C	sárga, 240 °C sötétsárga,
250 °C	sárgásbarna,
260 °C	barnáspiros,
270 °C	meggypiros,
280 °C	lila, 290 °C sötétkék,
300 °C	búzavirágkék,
310 °C	világoskék,
320 °C	szürkéskék,
330 °C	zöldesszürke.

A hőkezelő üzemek leghasználatosabb módszere a **hőelektromos** hőmérsékletmérő. Jellemzője az aránylag egyszerű szerkezet, a tág hőmérsékleti határok között való mérés, a távmérési lehetőség és a gyakorlat igényeit kielégítő pontosság. Mivel a hőmérsékleti jelet elektromos jellé alakítja, önműködő hőmérséklet-szabályozó berendezések vezérlésére és a hőmérséklet regisztrálására is alkalmas.

A hőelektromos jelenség lényege: Ha két különböző fémet, ötvözetet összeérintünk (egy forrpontban egyesítünk), akkor a két fém között feszültségkülönbség lép fel (kb.  $10^{-6}$  V), mivel a fémekben a szabad elektronok száma és azok mozgékonyága különböző. A fémeket ún. hőelektromos feszültség sorba lehet állítani a következők szerint: Sc, Sb, Fe, Sn, Cu, Ag, Au, Zn, Pb, Hg, Pt, Ni, Bi. Ha a sor valamelyik két tagjából készült huzalt egy forrpontban egyesítik és az érintkezés helyén melegítik, a két fém közül az mutat pozitívabb töltést, amelyik a sorban előbb áll. A két fém között ébredő feszültségkülönbség nagysága a két fém anyagától függ, és arányos az összeforrasztott hely (melegpont), illetve a két szabadon álló vég (hidegpont) közötti hőmérsékletkülönbséggel (1.31. ábra). A millivoltmérő műszerrel mért feszültség arányos a hőmérséklettel. A általánosan használt hőelempárok pl. a **vas – konstantán** elempár, amely 800 °C-ig alkalmas mérésre, a **nikkel – krómnikkel** (Hoskins) elem 1000 °C-ig, **platina– platina-ródium** ötvözetből készült elem 1350 °C-ig.

Hőelektromos jelenségen alapul a *hőfokszabályozó*, amely egyrészt a mindenkori hőmérsékletet mutatja, másrészt az előre beállított hőmérséklet elérésekor kikapcsolja a kemence fűtőáramát. Az újabb kemencék hőfokszabályozását már elektronikus műszerrel oldják meg. A hosszabb ideig tartó hőkezelés hőmérséklet-változását *hőmérsékletíró* műszerek regisztrálják. *Felhívjuk a figyelmet arra, hogy a termoelem nem tévesztendő össze a bimetállal! A bimetál („két fém”) hőmérő szintén alkalmas a műszaki gyakorlatban hőmérséklet mérésére, de működési elve nem a termoelektromos hatáson, hanem hőtáguláson alapul. Ha két, különböző hőtágulású fémlap egymáshoz erősítenek, pl. összeszegecselnek, akkor, melegítéskor az eltérő hőtágulás miatt elgörbülnek. A deformáció mértéke arányos a hőmérséklettel.*

Az izzó testek sugárzásán alapul az izzószálas pirométer. Magas hőmérsékleten sokszor nem lehet, de nem is célszerű közvetlenül a hőelemet alkalmazni (pl. kohóban). Ilyen esetekben az izzó test hőmérsékletét az általa kibocsátott sugárzásból határozzák meg. Az izzószálas pirométer működésének lényege, hogy az izzó test színét egy lámpa izzószálának a színével hasonlítják össze, és abból következtetnek a hőmérsékletre.

A pirométer tárgylencséjét a vizsgálandó testre irányítják. A műszer látóterében elhelyezett izzószál fűtőfeszültségét, és így izzási színét egy változtatható ellenállással (potenciométerrel) szabályozzák. Ha a mérni kívánt felület felé irányított műszer látóterében az izzószál képe sötétebb, mint a háttér, akkor az „hidegebb”, ha világosabban izzik, akkor forróbb. A

fűtőfeszültség oda-vissza állításával elérhető, hogy az izzószál képe „eltűnik” a háttérben. Ekkor egy hőfokon izzanak, azonos hőmérsékletűek, a hőfokérték a műszeren leolvasható. Az árammérő műszert úgy kalibrálták, hogy azon közvetlenül a hőmérséklet olvasható le.

#### **5.1.4A hőkezelés hőfokának, a hevítés és a hőntartás idejének meghatározása**

##### **Hevítési hőfokok**

A szabványos acélfajták esetében a különféle hőkezelési eljárásoknál alkalmazandó hevítési hőfokokat az érvényben levő acélszabványok táblázatai tartalmazzák.

##### **Hevítési idő**

A hevítési ( $t_{hev}$ ) és hőntartási ( $t_{hőn}$ ) idő függ az alkatrészek jellemző méretétől ( $J_m$ ), alakjától, valamint elrendezésüktől a kemencében (5.8. ábra).

Első lépésként az alkatrész jellemző méretét kell meghatározni, ami lényegében az alkatrésznek az a mérete, amelynél a keresztmetszet várhatóan a legkésőbb fog átmelegedni a hevítési hőfokra. Ennek meghatározásához nyújt segítséget az ábra, különböző alakú és keresztmetszetű alkatrészek esetén. Az ábrából még meghatározható az elrendezésből adódó, hevítési időt befolyásoló módosító tényezők értéke is.

A hevítési idő a hőkezelési szabványok táblázataiban található **fajlagos hevítési idő**, a **jellemző méret** és a **módosító tényező** szorzataként határozható meg.

##### **Hőntartási idő**

A hőntartási idő *normalizáláskor*:

- ha a  $J_m < 50$  mm,  $t_{hőn} = 20$  min,
- ha a  $J_m > 50$  mm,  $t_{hőn} = 20 + \frac{J_m}{2}$  [min].

*Teljes kilagyításkor és feszültségcsökkentéskor*, ahány milliméter a jellemző méret, annyi perc a hőntartás, de legfeljebb 1 óra lehet.

Izotermális lágyításnál  $A_{c3}$  felett legfeljebb 10 min;

650 °C-os sófürdőben  $7 \text{ min} + \frac{J_m}{2}$  [min], de az egész darabra legfeljebb 1 óra.

*Edzésekre és megeresztésekre* a hőntartási időt szakirodalmi adatok alapján kell meghatározni.

Munkadarab alakja					
Jellemző m.	D	a	a	a	s

Munkadarab alakja				
Jellemző m.	$\frac{D-d}{2}$	h	D	a

a)

Elrendezés a kemencében	Módosító-tényező	Elrendezés a kemencében	Módosító-tényező
	1,2		1,0
	1,0		1,4
	2,0		4,0
	1,4		2,2
	1,3		2,0
	1,7		1,8

b)

5.8. ábra Módosító tényezők a hevítési idők meghatározásához  
a.) jellemző méret alapján,  
b.) az elrendezés szerint

### 5.1.5 A munkadarabok hűtése

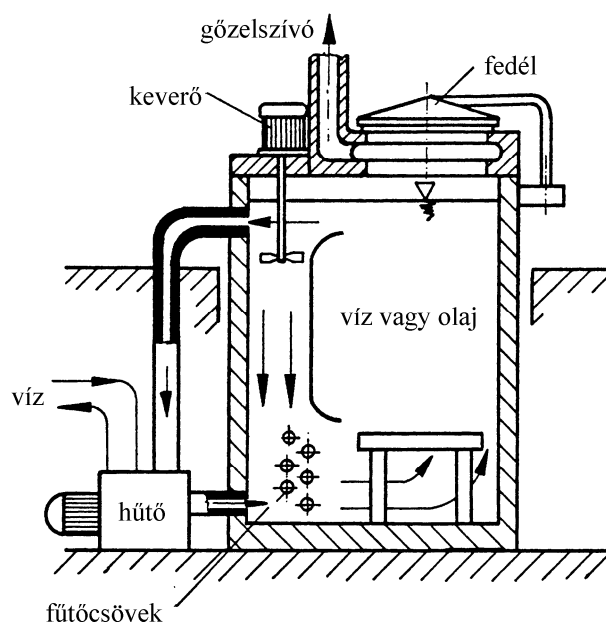
A hűtőberendezések feladata az előírt hűlési sebesség biztosítása. A megfelelő rendszerű hűtőberendezésnek olyan méretűnek kell lennie, hogy a hűtendő darab alakjának, illetve az egyszerre hűtendő mennyiségnek, tömegnek megfeleljen. Végül a berendezéseknek *meg kell felelniük az egészségvédelmi és balesetvédelmi előírásoknak.*



A nagy tömegű munkadarabok lassú vagy mérsékelt sebességű hűtését **hűtőgödrökben** végzik. A hűtőgödrök az üzem talajsíntje alá süllyesztett, jól szigetelt aknák, amelyeknek daruval leemelhető fedelük van.

A kisebb hőkezelő műhelyekben kettősfalú hűtőtartályokat használnak, amelyek külső köpenyében áramló vízzel hűtik a belső tartályt. A korszerű hűtőtartályok hűtőfolyadékát hűthető és melegíthető (5.9. ábra). A tartályokat hőmérséklet-szabályozó, keverő-, szűrő- és anyagmozgató berendezéssel látják el. Egyaránt alkalmasak olaj- és vízűtésre. A tartályt rendszerint a talaj szintje alá süllyesztik.

A szabványos acélfajták különféle hőkezelési eljárásaihoz alkalmazható hűtőközeget az érvényben levő acélszabványok táblázatai tartalmazzák.



5.9. ábra Hűtőtartály

Hűtés közben a munkadarabok alakja és mérete többé-kevésbé megváltozik, vetemedik. Ezeket a változásokat **edzőkészülékek** alkalmazásával csökkenthetik. Kisebb munkadarabok edzéséhez **szorítópozás fogók** használatosak. Furatos tárcsák és fogaskerekek edzésakor **tüskék** akadályozzák meg a deformációt és a méretváltozást. A nagyméretű gyűrűket, fogaskoszorúkat és tárcsákat automatikusan irányítható **edzősajtókban** hűtik. Az edzősajtók úgy irányítják a hűtőolaj áramlását, hogy a hőelvonás a munkadarab minden pontján lehetőleg egyenletes legyen.

A leggyakrabban használt hűtőközegekben, az olajban és a vízben, az izzó tárgy bemelegítésekor rohamos gőzfejlődés indul meg. A gőz vékony hártvaként összefüggő buborékkal veszi körül a munkadarabot és meggátolja a további hűlését. Ez mindig káros, mert egyenetlen lehűlés a következménye. Ellene úgy védekeznek, hogy a tárgyat erőteljesen mozgatják a folyadékban, a nagyobb munkadarabok felületén, pedig áramoltatják a folyadékot, amely leszakítja a hőátadást akadályozó gőzhártyát.

A martenzitképződés térfogatváltozással (duzzadással) jár, ami a tárgyak erős vetemedését, esetleg repedését okozhatja. Vetemedés elsősorban a víznedves acélokra lép fel, az olajnedvesnél kisebb a jelentősége.

A munkadarabokat úgy kell a hűtőfolyadékba meríteni, hogy a vetemedés minimális legyen. Hosszú, egyenes alkatrészeket függőleges helyzetben hűtik. A korongokat, tárcsákat sohasem szabad tengelyirányba (lapjával) a folyadékba meríteni! Elvékonyodó keresztmetszetű munkadarabokat úgy kell bemártani, hogy vastagabb részük merüljön először a hűtőfolyadékba.

## 5.2 A lángedzés gyakorlati módszerei

A lángedzés végrehajtásának módja szerint lehet *szakaszos* vagy *folyamatos*. A **szakaszos** lángedzésnek is két további fajtája van.

**Szakaszos álló** edzés esetében mind a hevítő fej, mind a munkadarab áll. Az edzési hőmérséklet elérésekor megszüntetik a hevítést, és a "hűtőzuhany" bekapcsolásával lehűtik a felületet.

Ez az eljárás a viszonylag kis felületek (sínvégek, lánc- és fogaskerekek fogai, szelepvégek) edzésére használatos.

Egy másik mód a **forgó szakaszos lángedzés**, amellyel forgástestek felületének egy-egy részét edzhetik. A  $75-150 \text{ min}^{-1}$  fordulatszámmal forgó munkadarabot hevítik, és a megfelelő hőfok elérése után megkezdik a hűtést. A vízszög lehűti a felhevített sávot.

A módszert általában tengelyek csaprészeinek, rövid tengelyeknek, forgattyús tengelyeknek és gyűrűknek a kérgesítésére alkalmazzák.

A **folyamatos** lángedzésnek is kétféle módja alakult ki. A **haladó folyamatos** lángedzés során az egybeépített hevítő- és hűtőberendezés egyenes vonalban halad végig az álló munkadarab felületén. Az égőfej egyenletesen melegíti a felületet. Az égőfejet 30-40 mm-re nyomon követi a hűtőfej. Így edzhetők, pl. a szerszámgépek szánvezetékei.

A **haladó forgó, folyamatos** lángedzési módszerrel hosszú tengelyeket, orsókat, hengereket kérgesítenek. A munkadarab  $75-150 \text{ min}^{-1}$  fordulatszámmal forog, és a tengely irányában, pedig egy vagy több hevítő- és hűtőfej halad.

## 5.3 Az indukciós edzés módjai, gyakorlata

Az indukciós edzőberendezés lényegében két részből áll: a **generátorból**, amely a nagyfrekvenciás áramot állítja elő, és az **edzőgép**ből, amely a munkadarab befogására, hevítésére és hűtésére szolgál.

Az induktortekercs vörösréz cső, amelyben hűtővíz kering. Ezzel védjük a tekercset, amely túlmelegedne a felhevített munkadarab sugárzó hőjétől.

A gyakorlatban kétfajta generátor terjedt el. Az elektroncsöves generátor 30 000 - 600 000 Hz frekvenciás áramot állít elő. Ez vékony, *néhány tizedmilliméteres kéreg* kialakítására alkalmas.

A forgó generátor 800-10 000 Hz frekvenciájú feszültséget gerjeszt, amellyel vastagabb, 7,0 - 1,5mm-es kéreg is kialakítható.

A munkadarab alakjától és méretétől függően többféle edzőgép típus terjedt el. Kisebb méretű alkatrészeket, pl. fogaskerekeket, gyűrűket szakaszos eljárással edzenek. A folyamatos (előtolásos) edzési eljárásnál két csúcs közé helyezik, vagy az egyik végén fogják be az alkatrészt. A hevítő induktor, illetve a hűtőberendezés tengelyirányban, egyenletesen halad.

Indukciós és lángedzés esetén a hevítési idő a szakirodalomból, táblázatokból választható, illetve képletek alapján számítható.

Az indukciós edzés során a kéregvastagság függvénye az alkalmazott áram frekvenciájának. A frekvencia növelésével, az alkatrészben keletkező örvényáramok mindinkább kiszorulnak a felület irányába, tehát csökken a kéregvastagság.

Az alkalmazandó frekvenciát az alábbi képlet segítségével lehet meghatározni:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \text{ [mm]},$$

$\delta$  elérendő kéregvastagság [mm],

$\rho$  az acél fajlagos ellenállása [ $10^{-6} \cdot \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ ],

$\mu$  az acél mágneses *permeabilitása* [ $\frac{Vs}{Am}$ ].

A villamos teljesítményszükséglet a következő képlet alapján határozható meg:

$$P = i_o \cdot A \text{ [kW]},$$

$i_o$  fajlagos teljesítményigény [ $\text{kW}/\text{mm}^2$ ],

$A$  edzendő felület nagysága [ $\text{mm}^2$ ].

Indukciós edzésnél a hevítési idő  $t_{\text{hev}} = 8 - 10 \text{ s}$ , és hőntartás nincs!

#### 5.4 A cementálás technológiai

A betétedzéssel kérgesített munkadarabokat általában három tulajdonsággal jellemzik: *keménységükkel, kéregvastagságukkal és széntartalmukkal.*

Betétedzett alkatrészek felületének szokásos keménység 55 - 64 HRC. Ha ez túlságosan nagy, megeresztéssel a megfelelő értékre csökkenthető. A kéreg vastagsága a munkadarab méretétől és felhasználásától függően 0,2 - 2,0 mm között változhat. A legkedvezőbb széntartalom az eutektoidos összetételnek

megfelelő 0,8 %. Ennél kisebb széntartalom esetében a kéreg lágy lesz, lényegesen nagyobb széntartalomnál, pedig karbidháló keletkezhet, amelyet utólagos hőkezeléssel kell eloszlatni, mert különben a kéreg túlságosan rideggé és repedésre hajlamosná válik. A gyakorlatban általában 0,8 - 1,1% közötti széntartalomra törekszünk. Az említett tulajdonságok a cementálószer minőségétől, a cementálás hőfokától és időtartamától, továbbá az acél minőségétől és az utókezelés hőmérsékletétől függenek.

A szilárd cementálószer ismételten felhasználható. Egyszeri használat után kb. egynegyed súlyrésze fogy el, amit friss cementáló anyaggal kell pótolni.

A cementált réteg vastagsága általában a munkadarabok vastagsága szerint változik. A kéreg vastagságát, adott hőfokon, a cementálási idő határozza meg. Például, ha egy 10 mm vastagságú munkadarab kéregvastagsága 0,5 mm, ehhez 900 °C-on 1,5 óra cementálási idő szükséges. Más esetben, ha a munkadarab vastagsága 25 mm és a kéreg 1 mm, akkor 900 °C-on a cementálási idő 4 óra. Az alkatrész 30 mm-es vastagsága felett a kéreg 1,5 mm-es lehet, a hevítési ideje 900 °C-on viszont 6 óra.

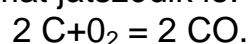
A cementálás másik módja a **sófürdőben** való cementálás. Az edzősót tégelykemencében megolvasztják, a kellő cementálási hőmérsékletre hevítik, majd az edzőkosárba rakott vagy huzalra függesztett munkadarabokat belemerítik a sófürdőbe. Az előírt hőntartási idő elteltével kiemelik és általában nyugvó levegőn, hagyják lehűlni.

Az eljárásnak több előnye van. Elmarad a hosszadalmas cementálószerbe ágyazás. A cementálás tégelykemencében végezhető, ami az előbbi eljárásnál lényegesen gyorsabb, mert a folyékony közegben igen jó a hőátadás. Meg kell jegyezni, hogy a cementálósók **ciántartalmuk** miatt rendkívül mérgezőek. Azokon a munkahelyeken, ahol ciántartalmú cementálósókkal dolgoznak, étkezni, dohányozni, élelmiszert tárolni szigorúan tilos. A dolgozókat a só veszélyességére ki kell oktatni.

A **gázcementálás** lényege, hogy a munkadarabokat olyan légmentesen zárt kemencébe helyezik, amelybe gázkeverékkel töltenek fel. A gázzal töltött kemencét a darabokkal együtt cementálási hőmérsékletre hevítik. *Melegítés közben egyrészt összetétele, másrészt az áramlás hiánya miatt a gáz nem fejt ki cementáló hatást.* A cementálási hőmérséklet elérése után a gáz összetételét úgy szabályozzák, hogy cementáló hatású legyen, amit erélyes áramoltatással fokoznak.

A cementálószer sok fajtája használatos. A megfelelő anyagok választéka a szakirodalomban található.

A jó cementálószerre jellemző, hogy magas hőmérsékleten megfelelő mennyiségű, diffúzióra képes **atomos szén** tartalmaznak. Oxigén jelenlétében a következő folyamat játszódik le:

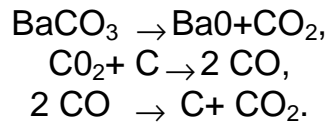


A szén-monoxid lehetővé teszi, hogy az acél felületén atomos szén jöjjön létre és az, a felületbe diffundáljon:



A kereskedelemben kapható cementálószerrek egyéb anyagokat is tartalmaznak, pl. báriumkarbonátot ( $\text{BaCO}_3$ ), kalcium-karbonátot ( $\text{CaCO}_3$ ). Ezeknek a folyamat gyorsításában és a gázfázisok fenntartásában van szerepük.

A folyamat lényege bárium-karbonát esetében:



A vegyi körfolyamat a cementálás alatt állandóan ismétlődik, mert a BaO a  $\text{CO}_2$  jelenlétében ismét karbonáttá alakul vissza.

### A cementálószer hatásának ellenőrzése

A cementáló sófürdők aktivitását úgynevezett szénpotenciállal fejezhetjük ki: A C-potenciál azt a C-tartalmat jelenti, amelyet egy kis széntartalmú acélfólia - adott hőmérsékleten és időtartam alatt - sófürdőben vagy más cementálóközegben hevítve elér.

A cementálószerrel úgy ellenőrizzük, hogy egy 0,05- 0, 1 mm vastagságú, 0,1% széntartalmú fóliát cementálóközegben hevítünk.

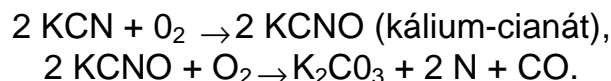
A vizsgálat a következők szerint hajtandó végre: 800 °C-on 60 perc, vagy 850 °C-on 30 perc, vagy 930 °C-on 10 perc. A fólia szén tartalma a *C-potenciál*.

## 5.5 A nitrálás menete

A nitrálás, más néven a nitridálás technológiájának lényege, hogy a készre munkált alkatrészeket olyan gázfázisú vagy folyékony halmazállapotú nitrogénvegyületekben, sófürdőkben hőkezelik, amelyek 450 - 600 °C-on atomos N-t tudnak leadni.

A nitrogéngáz  $\text{N}_2$  molekulái nem alkalmasak a felületbe diffundálásra, ezért pl. ammóniagázt ( $\text{NH}_3$ ) használnak, amely 450- 600 °C-on disszociál. A keletkező (*nascens*) atomos nitrogén már bediffundál a felületbe, ahol vegyületet, mégpedig vékony rétegű, nagyon kemény vasnitrid vegyületet ( $\text{N}_2\text{Fe}$ ;  $\text{N}_4\text{Fe}$ ) hoz létre. A vas nem képes maradéktalanul abszorbeálni az atomos N-t, ezért az ismét képződő  $\text{N}_2$  molekuláris gázt folyamatosan el kell vezetni a nitráló térből és azt ammóniával ( $\text{NH}_3$ -val) kell pótolni.

Attól függően, hogy a nitrogénhordozó vegyület gáz vagy folyékony halmazállapotú, a nitrálás technológiáját gáz-, illetve sónitrálásnak nevezzük. Ez utóbbit cianidtartalmú sófürdőben végezzük. Hevítésekor atomos C és N szabadul fel. Magasabb hőfokon a szénnek alacsonyabban hőfokon ( $T < 600$  °C) a nitrogénnek a disszociációja jellemző. A folyamat káliumcianid esetében a következő egyenletek szerint megy végbe:



Az atomos  $N$  már alkalmas a diffúzióra.

A nitrált kéreg keménysége, kopásállósága, vastagsága jelentős mértékben függ a felületötvözés technológiájától, az acél vegyi összetételétől. Például ammóniagázban ( $NH_3$ ) végzendő nitrálásakor a 0,2 mm-es kéreg kialakulásához 24 óra szükséges. A folyamat a következő időciklusokból áll:

1. 510 °C-on 10 óra,
2. 650 °C-on 10 óra,
3. 500 °C-on 4 óra.

*A nitridálási eljárás hátránya, hogy az ötvözetlen acélok esetében hatása nem kielégítő. Ezért külön nitridálásra alkalmas acélokat gyártanak megfelelő ötvözők felhasználásával. Ezek az Al, Ti, V, Mo, és a Cr.*

*A technológiai követelményeknek megfelelően a nitridálható acélokat a Cr-Al, a Cr-V, és a Ti ötvözésű nitridálható acélok csoportjába sorolják. A kis széntartalmú ötvözetlen acélok nagyon jól nitridálhatók, de a kéreg keménysége csekély lesz.*

*Az acél ötvözőinek szerepe kettős. Részben növelhetik a kéreg keménységét, részben elősegítik a N diffúzióját, ami a kéreg vastagságát befolyásolja (4.38. ábra), mivel a hőntartási időt csökkentheti.*

A nitridált kéreg általában vékony (0,2 – 0,5 mm), a kéreg keménysége az anyag belseje felé haladva nem egyenletes. A külső kérget ( $N_4Fe$ ) beljebb, egy még keményebb, de nagyon vékony ( $N_2Fe$ ) réteg követi, ez alatt viszont már a keménység rohamosan csökken, az alapanyag keménysége a jellemző.

# 6. Vas-szén ötvözetek csoportosítása, szabványos anyagjelölése

## 6.1. Vasötvözetek csoportosításának szempontjai

Vasötvözetnek számít az, az ötvözet, amelyben a vas aránya nagyobb, mint bármely egyéb alkotóé. Ipari *vasötvözet*en a legalább 60% szénvasat tartalmazó ötvözeteket értjük. A gyakorlatban használt vasötvözetek, a kohászati előállításukból kifolyólag, bizonyos mennyiségű szenet mindig tartalmaznak. A különböző széntartalmú vasötvözetek tulajdonságai különbözőek.

A fémek ötvözeteit általában és alapvetően két nagy csoportba osztják:

1. alakítható ötvözetek,
2. önthető ötvözetek csoportjára.

Az alakítható ötvözetekre a *szilárd oldat* típusú, az önthető ötvözetekre az *eutektikum* szövetelem a jellemző. Így a vas-szén ötvözeteknek is két alapvető csoportot alkotnak:

- acélok,
- öntöttvasak csoportját.

***Az acél olyan vas-szén ötvözet, amelynek karbon-tartalma nem haladja meg a 2,06%-ot (vagyis eutektoidos összetételű, ami az alakítás hőfokán szilárdoldattá, ausztenitté alakul). A szénen kívül, általában egyéb elemeket is tartalmaznak több-kevesebb mennyiségben.***

Még mai világunkban is a legnagyobb mennyiségben használt ötvözet az acél. Az acélok sokféle szempont szerint csoportosíthatók (MSZEN 10027 szabvány).

A csoportosítás főbb szempontjai a következők:

1. széntartalom, felhasználás, technológiai tulajdonságok,
2. gyártási mód,
3. ötvözöttség,
4. minőségi osztály,
5. szabványos jel,
6. szabvány szerint stb.

Természetesen még számos, más szempontot is találhatunk (olvadáspont, vezetőképesség, sűrűség, szín stb.), miszerint további csoportokba sorolhatjuk, azt a több mint 1000 fajta acélt, amit gyártanak.

### 6.1.1. **Felhasználás, technológiai tulajdonságok szerinti csoportosítás**

Az ötvözet felhasználhatósága, technológiai tulajdonságai nagyban függenek az ötvözet széntartalmától. A nagyolvasztóból kikerülő **nyersvas** széntartalma akár 2,06- 6,67% között változhat (6.1. ábra). Valójában 3-5% között van. Ha ennek széntartalmát közel eutektikusra állítják be (3,5-4,5 közé), az ötvözet alkalmas lesz öntészeti célra, és **öntöttvasnak** nevezik. Mint, már szó volt róla, a megtermelt nyersvas 80-90%-át **acéllá** dolgozzák fel úgy, hogy széntartalmát 2,06% alá csökkentik. A fennmaradó 10-20% nyersvas lesz anyaga az öntöttvasnak.

Az acélok felhasználás szerint lehetnek:

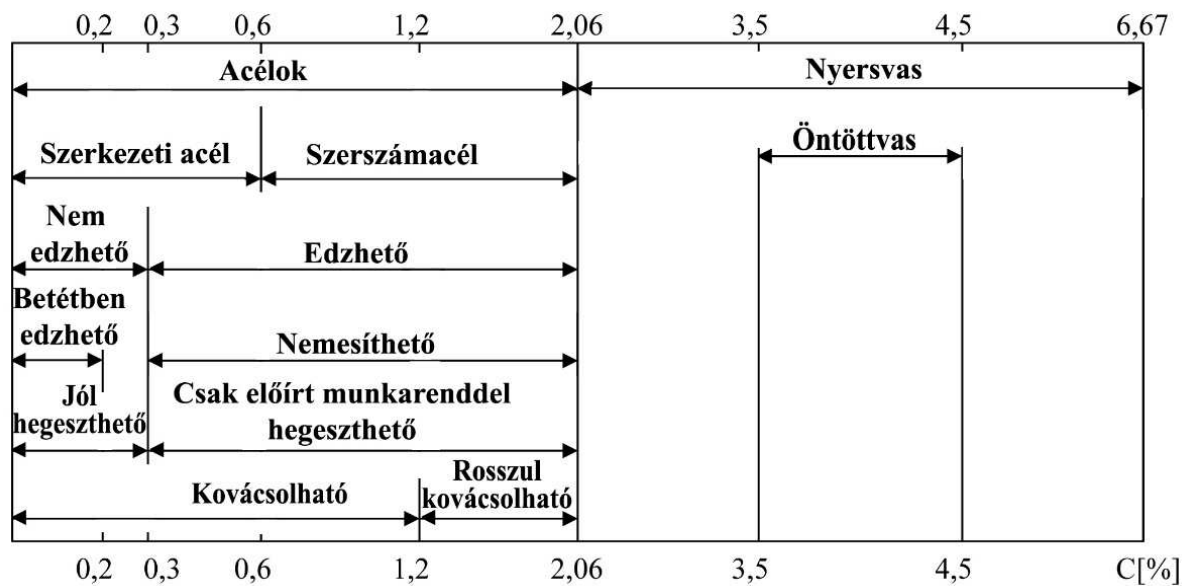
- szerkezeti acélok (ha széntartalmuk < 0,6 %),
- szerszámacélok (ha széntartalmuk 0,6- 2,6 %).

A kisebb széntartalmú acélok szívósabbak, szerkezeti anyagként jól felhasználhatóak, míg a nagyobb széntartalmú, ún. szerszámacélok, a bennük lévő nagyobb mennyiségű fémvegyületek miatt, keményebbek, kopásállóbbak, velük az előbbi acélcsoport megmunkálható.

A különféle technológiai eljárásokhoz való alkalmasság szerint is csoportosíthatjuk az acélokat:

- **Hőkezelhetőség** szerint vizsgálva az acélokat, az állapítható meg, hogy 0,3% széntartalom alatt *nem edzhetőek*. Ezeket az acélokat olyan alkatrészekhez, gépelemekhez használják, amelyeken a kemény kérget betétedzéssel alakítják ki. Ezeknek az acéloknak a széntartalmát nem a határértéknek megfelelően, hanem annál alacsonyabbra, 0,2%-ra vagy ennél kisebbre választják. Tehát a nem edzhető acélokat **betétben edzhető** acéloknak nevezik. A 0,3%-nál nagyobb széntartalmú acélok *edzhetőek*. Ezeket viszont **nemesíthető** acéloknak nevezik.
- **Hegeszthetőség** szerint az acélok, ha széntartalmuk kevesebb 0,3%-nál (nem edzhetőek), akkor **jól hegeszthetőek** (egyszerű kézi ívhegesztéssel is), ugyanis így a varrat biztosan nem fog beedződni. Egyébként a többi acél is hegeszthető, de **csak megfelelő hegesztő eljárással, anyaggal és munkarenddel** (pl. előmelegítéssel).
- Az acélok **kovácsolhatóak** 1,2% széntartalomig, felette, pedig **rosszul kovácsolhatóak** (oka, hogy itt már az ausztenit mező elkeskenyedek, és könnyű túlhevíteni az acélt) .





6.1. ábra Vas-szén ötvözetek széntartalom, felhasználás és technológiai tulajdonság szerinti osztályozása

### 6.1.2. Acélok gyártási mód szerinti csoportosítása

Az acélok gyártási módszere folyamatosan változott a műszaki fejlődés során (mint a fémek előállításánál bemutatottuk).

Acélgyártási módok:

- **Bessemer**-eljárás az első, tömeges acélgyártásra alkalmas módszer volt.
- **Thomas**-eljárás bázikus konverterbélés alkalmazásával kötötte meg a foszforszennyező egy részét, de ez a módszer is öregedésre hajlamos acél előállítására volt csak képes, mit a Bessemer-eljárás.
- **Siemens-Martin** eljárás jó minőségű acél gyártására volt alkalmas, de nagy volt az adagidő és környezetszennyező volt,
- Az **LD**-eljárás biztosítja napjainkban a szükséges, jó minőségű acélmennyiség nagy részét.
- Az **elektroacélgyártási** eljárásokkal, mint az *ívfényes, indukciós* eljárás, állítják elő az ötvözött nemesacélokat.

### 6.1.3. Acélok ötvözöttség szerinti csoportosítása

Az acélok ötvözöttségük szerint két csoportba oszthatók:

1. ötvözetlen acélok,
2. és ötvözött acélok csoportjára.

Az **ötvözetlen acél** elnevezés nem jelenti azt, hogy a vasban nincsenek ötvözők, hiszen az acél már maga egy vas-szén ötvözet. Azt sem jelenti, hogy más ötvözőt nem tartalmaz. Már az acélgyártásnál szükség van legalább

mangán (Mn), szilícium (Si) ötvözőre (dezoxidálás miatt), ezen kívül, pedig mindig marad az acélban szennyező (kén és foszfor).

**A szabvány megfogalmazása szerint ötvözetlen az, az acél, amelyben az ötvözők mennyisége nem halad meg, a szabvány által egy táblázatban megadott, határértéket.**

Ha csak tized százalékban is meghaladja egy vagy több elem a határértéket, akkor már **ötvözött acélról** beszélünk.

6.1. táblázat Ötvözőelemek határértéke az ötvözetlen acélban

Sor-sz.	Ötvöző elem	Tömeg %	Sor-sz.	Ötvöző elem	Tömeg %
1.	<b>Al</b>	0,1	10.	<b>Ni</b>	0,3
2.	<b>B</b>	0,0008	11.	<b>Pb</b>	0,4
3.	<b>Bi</b>	0,1	12.	<b>Se</b>	0,1
4.	<b>Co</b>	0,1	13.	<b>Si</b>	0,5
5.	<b>Cr</b>	0,3	14.	<b>Te</b>	0,1
6.	<b>Cu</b>	0,4	15.	<b>Ti</b>	0,05
7.	<b>Mn</b>	1,65	16.	<b>V</b>	0,1
8.	<b>Mo</b>	0,08	17.	<b>W</b>	0,1
9.	<b>Nb</b>	0,06	18.	<b>Zr</b>	0,05

Természetesen nem mindegy, hogy az ötvözők milyen százalékban haladják meg a határértéket. Az ötvözöttségnek különböző fokozatai vannak, attól függően, hogy az acélban, *a szénen kívül, az ötvözők összes mennyisége* hány százalékot ér el:

1. **mikroötvözetekről** beszélünk, ha az ötvözöttség néhány tized százaléknyi,
2. **gyengén ötvözött** az acél, ha az ötvözők össz mennyisége (a szénen kívül) kevesebb, mint 5%,
3. **közepesen ötvözött** az acél 5-10% ötvöző mennyiség mellett,
4. **erősen ötvözött** az acél, ha ötvözöttsége 10-20 %,
5. **különlegesen** ötvözött acélok ötvözöttsége 20 % feletti.

### **Az acélok ötvöző- és szennyező elemei**

Az ötvözők megváltoztatják az acélok tulajdonságait. A változás előre nem mindig számítható ki. Többféle ötvöző együttes alkalmazása során, egymásra is hatnak az ötvözők, erősítik, vagy gyengítik egymás hatását.

Az ötvözők néhány jellemző hatása:

- az ötvözők eltolhatják az állapotára átalakulási hőmérsékleteit (Si felfelé, Mn, Ni lefelé),
- az ötvözők hatással lehetnek a kritikus hűlési sebességre, pl. csökkenthetik a következő sorrendben – Ni, Mn, Si, Cr, Mo, W,
- vannak ún. karbidképző elemek, mint a V, Cr, W, Mo, Ti, Mn,
- grafitképző elem a Si,

- az acél leggyakoribb ötvözőelemei (a szénen kívül) a Mn, Si, Al, Ni, Cr, Mo, V, W, Co, Ti, Cu,
- szennyezői a S, P, O, N, H. (A szennyező is ötvöző, csak hatása kedvezőtlen. Egy ötvöző elem, más körülmények között szennyező lehet.)

## 6.2. táblázat Az ötvözők hatása az acél tulajdonságaira

Elemek	Mn	Si	Cr	Ni	W	V	Mo	Co	Al
<b>Tulajdonságok</b>									
Keménység	+	+	++	+	+	+	+	+	≈
Nyúlás	≈	-	-	+	-	≈	-	-	-
Ütőmunka	≈	-	-	++	≈	+	+	-	-
Hőállóság	≈	+	+	+	++	++	++	++	≈
Nitridálhatóság	≈	-	++	-	+	+	+	-	++
Forgácsolhatóság	≈	-	-	-	-	-	-	-	≈
Kopásállóság	≈	+	+	--	++	++	++	≈	≈
Hűlési sebesség	--	-	--	--	--	--	--	+	≈
Karbidképződés	≈	-	++	-	++	++	++	≈	-

+ növekedés, ++ erős növekedés, ≈ nem változik, - csökkenés, -- erős csökkenés

### 6.1.3. Minőségi osztály szerinti csoportosítás

Az acélokkal szemben támasztott elvárások, megbízhatósági, biztonsági követelmények szigorúsága, nagymértékben függ azok felhasználási területétől. Szigorúbbak pl. hidak, nyomástartó tartályok, szerszámanyagok esetében, mint pl. egy állattartó telepi korlát esetében. Természetesen a különbség az acél árában is megmutatkozik.

Minőségi osztály szerint az acélok három csoportba (osztályba) sorolhatók.

Lehetnek:

1. alapacélok,
2. minőségi acélok,
3. nemesacélok.

Az ötvözetlen acélok mind a három osztályba tartozhatnak:

- ötvözetlen alapacélok,
- ötvözetlen minőségi acélok,
- ötvözetlen nemesacélok.

Az ötvözött acéloknak nincs alapacél osztály, csak két típusuk van:

- ötvözött minőségi acélok,
- ötvözött nemesacélok.

**Alapacéloknál** a hőkezelttségi állapot vagy egyéb minőségi követelmény nincs előírva.

**Minőségi acélok** az alap- és a nemesacél minőség közöttiek. Szabvány írja elő az átmeneti hőmérsékletre (TTKV), a minimális szilárdságra vonatkozó követelményeket.

**Nemesacélok** esetében előírásokat tartalmaz a szabvány a szennyezők mennyiségére, átmeneti hőmérséklet értékére, ötvözők mennyiségére, különleges fizikai tulajdonságra (hőállóságra, kúszásállóságra) vonatkozóan.

### 6.1.5. Vasötvözetek szabványos jel szerinti csoportosítása, a szabványos anyagjelek felépítése

Az MSZ EN 10027-1 szabvány az acélokat felhasználási céljuk alapján két csoportba osztja:

- Az első csoportba tartoznak azok az acélok, amelyeknél a felhasználó számára valamilyen **mechanikai, fizikai tulajdonság** garantálása fontos.
- A másik csoportba sorolják azokat az acélokat, amelyeknél a **vegyi összetételük** garantált.

**Az acélok minőségének megadására szabványos jeleket használnak.** Van úgynevezett **rövid jel** (MSZ EN 10027-1), ami az anyagminőség előírására szolgál.

Az úgynevezett **számjelek** (MSZ EN 10027-2) három számcsoportokból állnak, elsősorban gépi adatfeldolgozásra, anyagnyilvántartásra szolgálnak.

#### 6.1.5.1. Fizikai tulajdonságokra garantált acélok jelölése

A következő anyagjel példa egy **fizikai tulajdonságokra garantált acél** ún. rövid anyagjelére:

**GS355J2G1WCu5**

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.			
<b>G</b>	<b>S</b>	<b>355</b>	<b>J</b>	<b>2</b>	<b>G</b>	<b>1</b>	<b>W</b>	<b>Cu</b>	<b>5</b>

A jel egyes pozícióiban található betűk és számok a következők szerint értelmezhetőek:

1. **Kezdő jel** – **G** jel kizárólag csak öntvényeknél használható (és csak **G** lehet).
2. **Fő jel(ek)** - a meghatározó alkalmazási terület jelölik, pl. itt az **S** – szerkezeti acélt jelöl.

3. **Fő tulajdonságjel** - a fő tulajdonság garantált értéke, pl. itt a **355** – ez mindig a folyáshatárt ( $R_{eH}$ ) jelöl N/mm<sup>2</sup>-ben kifejezve.
4. **Kiegészítő tulajdonságjel** - egy tulajdonság garantált értéke, pl. itt ütőmunka értéket, adott hőmérsékleten – **J 2** (27 J, -20 °C-on).
5. **Kiegészítőjel** - kiegészítő tulajdonság jel itt pl. **G1** a csillapítás mértéke.
6. **Kiegészítő felhasználás jele** - alkalmazási terület, pl. itt **W** – időjárásálló acél.
7. **Összetételjel** - egy elem jele, garantált mennyisége, itt pl. **Cu5** az 0,5% réztartalmat jelöl.

### A fizikai tulajdonságokra garantált acélok számjelének felépítése:

Az EN 10027-2 szabvány szerint az acélt háromelemű számcsoporttal (kóddal) kell jelölni. Például egy S355J2 jelű szerkezeti acél számjele 1.0577

Egy korrózióálló acél számjele: **1.4001**

Az egyes számcsoportok jelentése:

1. **Anyagjel** - anyag főcsoport jele, pl. **1.** - acélt jelent.
2. **Acélcsoport jele** - az acélcsoport jele pl. **40** - korrózióálló acél, amelynek Ni-tartalma kisebb 2,5%-nál, és nem tartalmaz Mo, Nb, Ti elemeket.
3. **Sorszám** - csoporton belüli sorszám, pl. **01**

### 6.1.5.2 Vegyi összetételre garantált acélok jelölése

A másik acélcsoport, a **vegyi összetételre garantált acélok** jelölésére egy példa:

#### GX10CrNi18-10

1.	2.	3.	4.		5.
<b>G</b>	<b>X</b>	<b>10</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>18-10</b>

A vegyi összetételre garantált acélok rövid jelének felépítése:

1. **Kezdő jel** - kizárólag csak ötvényeknél használható (csak **G** lehet)
2. **Fő jel(ek)** - anyagcsoport jel. **X** jelentése: **legalább az egyik ötvöző elem mennyisége meghaladja az 5 %-ot.**
3. **Karbondaralom jele** - a széntartalom középértékének százszorosa, itt pl. **10** megfelel 0,1% széntartalomnak.
4. **Ötvözők vegyjele** - az ötvözők vegyjele mennyiségük sorrendjében, pl. **CrNi** egy krómmal, nikkellel ötvözött acélt jelent.  
**Figyelem!** A **gyorsacéloknál** nincs ötvöző jel. Például a **HS 7-5-2-5** jelölésben, a számok mindig a következő sorrendben jelentik az ötvözők

mennyiségét, százalékban kifejezve: W, Mo, V, Co. A krómtartalom nincs feltüntetve, mert az mindig 3,8-4,5%.

5. **Összetételjel** - az ötvözők százalékos mennyiségének középértéke egész számban kifejezve, csökkenő sorrendben, üres kötőjellel elválasztva, pl. **18% Cr, 10% Ni**.

Ha az anyagjelben nincs X jel, az értelemszerűen azt jelenti, hogy **egyik ötvöző sem haladja meg az 5 %-ot**. Például egy ilyen acél jele:

### 34CrNiMo6

A jel értelmezése pont úgy történik, mintha lenne **X**-jel, az eltérés csupán annyi, hogy az ötvözők mennyisége nem a jelben szereplő szám értékének felel meg (itt nem 6 %). Mivel az ötvözők mennyisége viszonylag kevés, és mégsem akarjuk, hogy tizedes tört szerepeljen a jelben, ezért az ötvözők többszörösé jelöljük. Itt pl. a Cr-tartalom négyszeresét tüntetik fel. Tehát a Cr-tartalom valójában  $6/4 = 1,5$  %. Minden ötvöző elemnek van szorzója, ezzel kell elosztani a jelben szereplő számot, hogy a tényleges értéket megkapjuk. Elemenként az összetételi szorzók:

- |   |                           |
|---|---------------------------|
| - <b>Cr, Co, Mn, Ni, Si</b> , W ötvöző esetén         | - a szorzó <b>4</b>       |
| - <b>Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr</b> esetén | - a szorzó <b>10</b> ,    |
| - <b>C, N, P, S</b> ötvöző esetén                     | - a szorzó <b>100</b> ,   |
| - <b>B</b>  | - a szorzó <b>1 000</b> . |

A **vegyi összetételre garantált acélok számjele** a fizikai tulajdonságokra garantált acélok számjéléhez hasonló elv szerint épül fel. Ennek a 34CrNiMo6 rövidjelű acélnak a számjele: 1.6582

## 6.2. Szabványos acélcsoportok

Mint már szó volt róla, több mint ezerféle acélt gyártanak. A szabvány az acélokat csoportokba rendezi. Ezeket tekintjük át a következőkben.

**Szerkezeti acéloknak nevezzük, néhány kivételtől eltekintve, a 0,6 %-nál kevesebb szén tartalmazó acélokat.**

Szerkezeti acélból készülnek a legkülönbébb gépek és berendezések alkatrészeinek döntő többsége, továbbá hidak, daruk, épületszerkezetek, csővezetékek, hajók, vasúti szerelvények, gépjárművek és még sok más egyéb szerkezet.

A szerkezeti acélok széleskörű felhasználását segíti, hogy ezeket, az acélokat igen változatos formában állítja elő a kohászat. Többek között gyártanak szerkezeti acélból melegen hengerelt rúd- és idomacélt, durva-, közép és finomlemez, széles- és abroncsacélt, szalagot, huzalt, kovácsolt termékeket, csöveket, továbbá számos más formájú kohászati terméket, többek között acélöntvényeket is.

## 6.2.1. Fizikai, mechanikai tulajdonságokra garantált acélok

### Általános rendeltetésű, ötvöztelen szerkezeti acélok

Az általános rendeltetésű, ferrit-perlit szövetszerkezetű, ötvöztelen szerkezeti acélokat az MSZEN 10025 szerint gyártják.

A szabvány az **S185, S235, S275, S355, E295, E335, és E360** acélfajtákat különbözteti meg, amelyek mechanikai tulajdonságaikban különböznek egymástól.

Az **S235** és **S275** acélfajták minőségi csoportja **JR, JO** és **J2** lehet. A **JR, JO** és a további minőségi jelek jelentését a 6.3. táblázat ismerteti.

6.3. táblázat Ütőmunka minőségi jelei

Ütőmunka [J]			Vizsgálati hőmérséklet, [°C]
27	40	60	
JR	KR	LR	+20
JO	K0	L0	0
J2	K2	L2	-20
J4	K4	L4	-40
J6	K6	L6	-60

Az **S355** acélfajta JR, JO, J2 és K2 minőségben kapható.

Az **S235** és **S275** acélfajtából készült termékeknél a J2 minőségi csoporton belül különbséget tesznek a **J2G3** és **J2G4** között. (**G3** és **G4**-jel: teljesen csillapított acél. A **G1** jel: csillapítatlan acélt jelent).

**Hegeszthetőség:** A **JR, JO, J2G3, J2G4, K2G3** és **K2G4** minőségi csoportokba tartozó acélok általában minden eljárás szerinti hegesztésre alkalmasak. A hegeszthetőség a **JR** minőségi csoportból a **K2** minőségi csoportig minden acélfajánál javul.

### **Melegen hengerelt, hegeszthető, finomszemcsés szerkezeti acélok**

A hegesztett szerkezetekhez alkalmazandó acélokat az MSZEN 10113 tartalmazza.

A szabvány az **S275, S355, S420** és **S460** jelű acélfajtákat különbözteti meg. A számok a garantált minimális felső folyáshatárt ( $R_{eH}$ ) jelentik.

Mindegyik acélfajta minőségi csoportja **M, ML, N** és **NL** lehet. Az **M** és **ML** jelű acélok szénegyenértéke (Ce) az adott szilárdságú csoporton belül a kisebb értékű.

**Így a hegeszthető acéloknak nemcsak mechanikai tulajdonságait, vegyi összetételét, hanem a megengedhető legnagyobb szénegyenértékét is garantálják a gyártók.**

### **Acélok nyomástartó berendezésekhez**

Ezen acélok előírásait az MSZEN 10028 és az MSZEN 10207 szabványok tartalmazzák.

A nyomástartó berendezések gyártásához használt acélokkal szemben támasztott igen fontos követelmény a hegeszthetőségük mellett, a termék megbízhatósága. Ezt az acélban lévő szennyező elemek csökkentésével biztosítják. Ezekben az acélokból az alacsony oxigéntartalmat, különleges csillapítással érik el.

**Az erre a célra használt, a minőségi acélok csoportjába tartozó acélok pl. P235; P265; P275; P295; P355; P460.**

A számok a garantált minimális felső folyáshatárt ( $R_{eH}$ ) jelentik  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on.

**Ötvözött nemesacélok is tartoznak ebbe a csoportba: pl. 16Mo3; 12CrMo4 5; 10CrMo9 10; 11CrMo9 10.**

### **Légköri korrózióknak fokozottan ellenálló acélok**

A kültéri létesítményeket, hegesztett szerkezeteket, mint például villamos távvezetési oszlopok, csarnokok, acélvázak magas építmények, amelyek az időjárás korróziós károsító hatásának vannak kitéve, légköri korrózióknak fokozottan ellenálló acélból célszerű készíteni. Ezek az acélok rézzel, krómmal, nikkellel, illetve foszforral ötvözött acélok. Ezek az ötvözők hatásukat úgy fejtik ki, hogy a belőlük készült gyártmányok korróziója során a felületen dúsulnak, és passzíváló réteget képeznek, ami a további légköri korróziót nagymértékben lassítja. A passzíváló hatás a réz, króm és nikkel foszfátos, szulfátos, hidroxidos vegyületeinek köszönhető, amelyek fokozatosan elzárják a felületi rozsdapórusait.

A légköri korrózióval szemben fokozottan ellenálló acélok EN- jele a következő: **S235JRW; S235JOW; S235J2W; S275JRW; S275JOW; S275J2W; S355JOW; S355K2W**. A jelölésben az S az acélra utaló jel (steel); a számok a garantált felső folyáshatárt ( $R_{eH}$ ) fejezik ki  $\text{N/mm}^2$ -ben; a **JR, JO** és **K2**-jelek az 6.3. táblázat szerinti ütőmunka értékeket közlik, míg a **W**-betű az időjárás-állóságot fejezi ki (weather).

### **Betonacélok**

Az egyik legnagyobb tömegben alkalmazott társított anyag a vasbeton, ami a húzó igénybevétellel szembeni ellenállását a beágyazott acélszálaknak vagy acélhálónak köszönheti. A betonacélokkal szemben elsősorban szilárdsági követelményeket támasztanak, de feldolgozásuk során gyakran hajlítják és hegesztik is ezeket, az acélokat. A betonacélok EN- jele: **B235; B350; B390; B490**. A jelölésben a **B** betű a betonra, mint alkalmazási területre utal. A számok a garantált felső folyáshatár ( $R_{eH}$ ) értéket adják meg  $\text{N/mm}^2$ -ben.

### **Nagy folyáshatárú, perlitmentes acélok**

A nagy folyáshatárú, jól hegeszthető acélok kiváló szilárdsági és szívóssági tulajdonságait kétféle szilárdságnövelő mechanizmus együttes alkalmazásával érik el.

A **különlegesen finom szemcseméretet** szabályozott véghőmérsékletű hengerléssel, *termomechanikus kezeléssel* biztosítják. A termomechanikus kezelés lényege az, hogy összekapcsolják az alakítás és a hőkezelés tulajdonságjavító hatásait.



A nagy szilárdságot és a finom szemcseszerkezet nagyobb hőmérsékletű stabilitását, karbid- és nitridképző elemek (Nb; Ti; B; V stb.) ötvözésével biztosítják.

Hazai szabvány ezekre az acélokra még nem készült, annak ellenére, hogy ezeket az acélokat nemcsak alkalmazzák, hanem gyártják is Magyarországon. Az angol elnevezésükből (**high strength low alloy**) képzett betűszavak alapján **HSLA acélként ismertek**.

Ezek az acélok **Si**-mal és legalább 0,015% **Al**-mal különlegesen csillapítottak. Az EN 10204 szerinti jelölésük:

**E500TM; E550TM; E690TM; ET500TM; ET550TM; EE500TM; EE550TM.**

Az anyagminőségi jelben az **E** betű gépgyártási acélt jelent, az ezt követő **T** betű esetén  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on garantált  $KV = 27\text{ J}$ ; illetve **E** betű esetén  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on a garantált  $KV = 27\text{ J}$  ütőmunka. A számok a garantált folyáshatárt fejezik ki  $\text{N/mm}^2$ -ben. A számok utáni **TM** betűk jelentése finomszemcsés acél termomechanikusan hengerelve.

## 6.2.2. Vegyi összetételre garantált szerkezeti acélok

### Betétben edzhető acélok

A betétedzés céljára külön acélcsoportot fejlesztettek ki, amelyeknek jellemzőit az MSZ 31 tartalmazza, C- tartalmuk 0,2 %, vagy annál kevesebb.

### Ötvözetlen minőségi acélok: **C10** és **C15**.

A jelölésben a **C** betű a szénacélra utal (ötvözetlen acél), a szám a közepes széntartalom százszorososa. Ez az acélfajta kis igénybevételű alkatrészekhez ajánlott.

### Ötvözetlen nemesacélok: **Ck10** és **Ck15**.

A jelükben a **C** betű és a szám azonos az ötvözetlen minőségi acéloknál közöltekkel.

### Ötvözött nemesacélok: **15Cr3; 16MnCr5; 20MnCr5; 25MoCr4; 15CrNi6** és **17CrNiMo6**.

A számok a közepes C- tartalom százszorosát jelentik. A betűk az ötvözőkre utalnak, az azt követő számok a **Cr**, **Mn** és **Ni** ötvöző tartalom négyszeresét, illetve a **Mo**-tartalom tízszeresét tüntetik fel.

A betétben edzhető acélok mindig csillapítottak, amit a legfeljebb **0,4%** szilíciumtartalom garantál. Az előírt megengedett kén- és foszfortartalom  $\leq 0,035\%$ , ami lényegesen kisebb, mint az általános rendeltetésű szerkezeti acéloké, mivel a cementálás során ezek a szennyezők képesek dúsulni, ami a szívósságot jelentősen csökkentené.

Az ötvözött betétben edzhető acélok mindegyike krómmal ötvözött, az átedzhetőség javítása érdekében. A hasonló célú mangánötvözés hátránya, hogy a mangántartalom növekedésével nő a kéregben a maradék-ausztenit mennyisége, ami a keménység és főleg a kopásállóság csökkenését okozza.

A krómon kívül molibdénnel ötvözött acélfajták megeresztési ridegséggel szemben jobban ellenállóak. A nikkelötvözéssel a betétben edzhető acélok szemcsedurvulási hajlama mérsékelhető, amivel a mag nagyobb szívóssága érhető el.

A betétedzésű acélokból főleg fogaskerekeket, tengelyeket, hajtókarokat, csuklókat stb. készítenek, ahol a koptató igénybevétel mellett az alkatrészeknek dinamikus hatással szembeni ellenállásra is alkalmasnak kell lenni. Nagy igénybevételű alkatrészeket főleg **15CrNi6** és **17CrNiMo6** acélfajtákból célszerű gyártani.

### **Nemesíthető acélok**

A gépalkatrészek gyártásához használatos nemesíthető acélok széntartalma meghaladja a 0,2 %-ot, mert ilyen karbontartalom mellett már nagy szilárdság és szívósság hozható létre hőkezeléssel.

Az MSZEN 10083 előírásai szerint a következő acéltípusok tartoznak ebbe a csoportba.

**Ötvözetlen nemesíthető acélok: 2C22; 2C25; 2C30; 2C35; 2C40; 2C45; 2C50; 2C55; 2C60.**

A jelben az első szám a kéntartalomra utal. Az acélokat három különböző kéntartalommal gyártják:

- 1 - jelűeknél  $S \leq 0,045\%$
- 2 - jelűeknél  $S \leq 0,035\%$
- 3 - jelűeknél  $S = 0,02-0,04\%$

A jelölésben a **C**- betű szénacélra utal, a számok a közepes széntartalom százszorosát jelentik.

**Ötvözött, nemesíthető acélok: 28Mn6; 38Cr2; 46Cr2; 34Cr4; 37Cr4; 41Cr4; 5CrMo4; 34CrMo4; 42CrMo4; 50CrMo4; 51CrV4; 36CrNiMo6; 30CrNiMo8; 36NiCrMo16.**

A jelölésben a betűk előtti számok a közepes C tartalom százszorosát, a betűk az ötvözők vegyjeleit fejezik ki. A vegyjelet követő számok a *Cr*, *Mn* és *Ni* ötvöző tartalom négyszeresét, a *Mo* és *V*- tartalom tízszeresét jelentik.

A nemesíthető ötvözetlen- és ötvözött acélok mindig teljesen csillapítottak, amit a legfeljebb 0,4% szilíciumtartalom garantál.

**A nemesíthető acélok szilárdsági jellemzőit az ötvözők ellenére is alapvetően a C tartalom határozza meg.** A gyakorlat megkövetelte igények minél teljesebb kielégítése érdekében a nemesíthető acélok egyes ötvözetcsoportjaiban kisebb és nagyobb C tartalmú, szívósabb, illetve keményebb, kopásállóbb változatok is rendelkezésre állnak.

A nemesíthető acélok két alapvető ötvözője a *mangán* és a *króm*. Az átédzhetőség, a szilárdsági és szívóssági tulajdonságok javítása, kizárólag csak olcsóbb magánötvözéssel, korlátozott, mivel a mangán erőteljesen csökkenti az  $M_v$  (a martenzítálatlakulás) hőmérsékletét és így növeli a maradék-auszténit mennyiségét. A **28Mn6** típusú, **mangánötvözésű**

**nemesíthető acél** jól ellenállnak az abrázív kopásnak. Általában mezőgazdasági szerszámokat, talajjal érintkező alkatrészeket készítenek belőlük. A króm és a nikkel nagyon hatásosan növeli az átedzhetőséget.

A **króm-ötvözésű nemesíthető acélokból** főleg olyan, kisebb méretű, kopásnak is kitett gépalkatrészek készülnek, amelyeknél elsősorban a szilárdsági jellemzők a meghatározók.

A **króm-vanádium ötvözésű acélok** jellemző alkalmazási területe a közepes méretű, nagy igénybevételű, fárasztó és koptató igénybevételeknek egyaránt kitett alkatrészek.

Olyan alkatrészek, amelyek jelentős ütésszerű (dinamikus) igénybevételeknek vannak kitéve a **krómon** és **molibdénen** kívül, **nikkellel** is ötvözöttek.

A nemesíthető acélok kiválasztását segíti a 6.4. táblázat. (A zárójelben szereplő S- betű 0,02-0,04 % kéntartalomra utal.)

### **Rugóacélok (ötvözött, nemesíthető acél)**

A rugók alapanyagával szemben támasztott, egyik legfontosabb követelmény, az igen nagy folyáshatár annak érdekében, hogy a rugó minél nagyobb terhelést vehessen fel **maradó alakváltozás nélkül**. A másik fontos követelmény, hogy a rugó a nagy szilárdság mellett is rendelkezze kellő alakváltozó képességgel ahhoz, hogy az esetleges túlterheléskor ne ridegen törjön, hanem a terhelés egy részét maradó alakváltozás formájában nyelje el.

Az MSZ 2666 előírásai szerint gyártott nemesíthető rugóacélok egyik csoportját azok az acélok képezik, amelyeknél az általános felhasználási célra gyártott nemesíthető acélokhoz viszonyítva nagyobb C tartalommal érik el a nagyobb folyáshatárt: **60Cr3; 60CrB3\***; **60CrMoV** ; **51CrV4**; **52CrMoV4**.

(\* bórral mikroötvözött acél, B ≥ 0,0005%)

A jelölésben a betűk előtti számok a közepes **C** tartalom százszorosát, a betűk az ötvözők vegyjelét, a betűk utáni számok a **Cr** tartalom négyszeresét, a **Mo** és **V** tartalom tízszeresét fejezik ki.

A szilícium a ferritben oldódva erősen torzítja az atomrácsot, és ezáltal igen jelentősen növeli a szilárdságot. Ezt a hatást használják ki a nemesíthető rugóacélok másik csoportjánál, amelyet a **Si**-mal ötvözött acélok alkotják: **38Si7**; **55Si7**; **61Si7**; **61SiCr7**; **60SiMn5**.

A jelölésben a betűk előtti számok a közepes **C** tartalom százszorosát, a betűk az ötvözők vegyjelét, a betűk utáni számok a Si, Cr és Mn tartalom négyszeresét fejezik ki.

A szilíciummal ötvözött rugóacélokat főleg a kisebb vastagságú lap-, lemez- és csavarrugók gyártására használják. Az egyéb ötvözésű rugóacélokat nagyobb átedzhetőségüknek köszönhetően, elsősorban vastagabb, a vanádium ötvözésűeket a jellemzően ismételt igénybevételeknek kitett járműrugók gyártására használják.

6.4. táblázat Ötvözött, nemesíthető acélok célszerű alkalmazása a folyáshatár és az átmérő függvényében

min. $R_{eH}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Átmérő [mm]				
	$d \leq 16$	$16 < d \leq 40$	$40 < d \leq 100$	$100 < d \leq 160$	$100 < d \leq 160$
300		2 C 25 2 C 22	2 C 35		
350	2 C 25 2 C 22	2 C 35 2 C 30	2 C 45		
400	2 C 35 2 C 30	2 C 45 2 C 40	28 Mn (S) 6	25 CrMo (S) 4	
450	2 C 40	2 C 50	34 Cr (S) 4	25 CrMo (S) 4	34 CrMo (S) 4
500	2 C 50 2 C 45	2 C 60 2 C 55	37 Cr (S) 4	34 CrMo (S) 4	42 CrMo (S) 4
550	2 C 55 38 Cr (S) 2	46 Cr (S) 2 28 Mn (S) 6	41 Cr (S) 4	42 CrMo (S) 4	50 CrMo 4 36 CrNiMo 4
600		37 Cr (S) 4 25 CrMo (S) 4		50 CrMo 4	34 CrNiMo 6 51 CrV 4
650	46 Cr (S) 2 28 Mn (S) 6	41 Cr (S) 4	42 CrMo (S) 4	36 CrNiMo 4 51 CrV 4	34 CrNiMo 6
700	34 Cr (S) 4 25 CrMo (S) 4		50 CrMo 4 36 CrNiMo 4 51 CrV 4	34 CrNiMo 6	30 CrNiMo 8
750	37 Cr (S) 4	42 CrMo (S) 4	50 CrMo 4 36 CrNiMo 4	34 CrNiMo 6	30 CrNiMo 8
800	41 Cr (S) 4 34 CrMo (S) 4	36 CrNiMo 4 51 CrV 4	34 CrNiMo 6	30 CrNiMo 8	
900	42 CrMo (S) 4 50 CrMo 4 36 CrNiMo 4 51 CrV 4	34 CrNiMo 6	30 CrNiMo 8		
1000	34CrNiMo 6	30 CrNiMo 8			
1050	36 NiCrMo 16				

### Hidegszívós acélok

Olyan területeken, ahol az acélnak, **lényegesen 0°C alatti hőmérsékleten is**, ellen kell állnia a dinamikus igénybevételeknek (pl. hűtő- és vegyipari berendezések stb.), a nikkellel ötvözött, nemesített, hidegszívós acélokat alkalmazzák.

Az MSZ 4400 előírásai szerinti hidegszívós acélok a következők: **X18NiV2**; **X14NiMoV3**; **X12NiMoV5** és **X10NiMoV9**.

## Melegszilárd és hidrogénnyomás-álló acélok

A szobahőmérsékletet meghaladó hőmérsékleten üzemelő berendezések, szerkezetek gyártásához **melegszilárd acélokat** alkalmaznak. Ezeknek az acéloknak, a **kúzással szembeni ellenállása** növelhető, egyrészt az alapszövet folyáshatárának növelésével, másrészt finomeloszlású fázisokkal. Ezek nemesítéssel hozhatók létre, ezért **a melegszilárd acélokat**, ritka kivételtől eltekintve, **nemesített állapotban** alkalmazzák.

Az MSZEN 10028 és az MSZ 4747 szabványok tartalmazzák a melegszilárd acélokat, amelyeknek jelölése a következő:

**16Mo3; 13CrMo4-5; 11CrMo9-10; 10CrMo9-10; 12CrMoVNi10.**

A jelölésben a betűk előtti számok a közepes **C** tartalom százszorosát, a betűk az ötvözők vegyjelét, a betűk utáni számok a Mo tartalom tízszeresét, a Cr tartalom négyszeresét fejezik ki.

A ferrit szilárdságát és ezzel a kúzással szembeni ellenállását, igen hatékonyan lehet növelni **Mo** ötvözéssel.

A karbidok *nagyobb szemcsévé történő összeállása*, azaz a diszperzitás csökkenése, de különösen a *karbidok oldódása* és a *grafitosodás* szigorú határt szab az egyes melegszilárd acélok megengedhető üzemi hőmérsékletének.

Az említett szabványokban szereplő melegszilárd acéloknak **500 °C**-ig garantálják a folyáshatárát ( $R_{p0,2}$ ). A **10<sup>5</sup> órás** időszilárdságukat 450 és 500 °C-os igénybevételre ismertetik.

## Hidrogénnyomás-álló acélok

A petrolkémiai ipari berendezéseknél, ahol a nyersolaj feldolgozása során a szénhidrogének szétválasztását a szobahőmérsékletnél lényegesen magasabb hőmérsékleten végzik, *hidrogénnyomás-álló acélokat* alkalmaznak. Ilyen alkalmazáskor számolni kell atomos állapotú hidrogén jelenlétével. Az acél felületén adszorbeálódott hidrogén az acél **C** tartalmával képes vegyülni, a reakciók végterméke a gázállapotú metán (CH<sub>4</sub>), ami az acél felületéről eltávozik, megteremtve ezzel a lehetőséget a további hidrogén adszorpciónak. Ezáltal az *acél felülete C-ben elszegényedik*, így az acél felülete és a belseje között koncentráció-különbség alakul ki.

Nagyobb hőmérsékleten az acél belsejéből **C** képes diffundálni a szénszegény felületi rétegbe. Az előzőekben ismertetett hidrogén-adszorpció így tovább folytatódik. Végző soron tartós, nagy hőmérsékletű üzemeltetés során, a *dekarbonizáció* (elszéntelenedés) hatására az acél **C** tartalma lecsökken, ami a szilárdsági jellemzők nagymértékű csökkenéséhez és a szerkezet, illetve berendezés tönkremeneteléhez vezethet.

Az MSZ 2295 ismerteti a **hidrogénnyomás-álló acélokat**, amelyek a következők:

**16CrMo9-3; 12CrMo20-5; 17CrMoV10; 20CrMoV13-5; 24CrMo10; 21CrVMoW12.**

A jelölésben a betűk előtti számok a közepes C tartalom százszorosát, a betűk az ötvözők vegyjelét, a betűk utáni számok a **Cr** tartalom négyszeresét, a **Mo** és **V** tartalom tízszeresét jelentik.

A hidrogén okozta károsodás olyan ötvözők alkalmazásával előzhető meg, amelyek stabil karbidokat képeznek (Cr, V, W, Mo), magas hőmérsékleten az acél szilárdságát növelik, egyben elhárítják a metán képződésének veszélyét is. Ezért a hidrogén károsító hatásának ellenálló hidrogénnyomás-álló acélok, egyben a magasabb hőmérsékleten üzemelő berendezések anyagai is.

### **Automata acélok**

A forgácsolhatóság szempontjából az olyan acélok kedvező tulajdonságúak, amelyek keménysége lényegesen kisebb, mint a forgácsoló szerszámé, alakváltozó képessége nem túl nagy és olyan fázisokat tartalmaz, aminek következtében a **forgács töredezett és rövid lesz**. Ennek nagy a jelentősége a forgácsoló automatáknál, a gyártósorokkal történő és a felügyelet nélküli vagy felügyelet szegény gyártásnál van.

A kifejezetten forgácsoló megmunkálás céljaira kifejlesztett automataacéloknak ötvözéssel érik el a kívánt tulajdonságokat. Az automataacélok jellegzetes ötvözői a **kén**, az **ólom**, a **tellúr** és a **szelén**.

Az MSZ 4339 és MSZ 4360 szabványok ismertetik az automataacélokat, amelyeknek a jelölése a következők szerint történik.

*Általános rendeltetésű automataacélok:* **9S20;** **9SMn28;** **9SMn35;**  
**9SPb28;**

**10SPb35.**

*Betétkben edzhető automataacélok:* **10S20;** **15S20.**

*Nemesíthető automataacélok:* **35S20;** **45S20;** **60S20.**

A jelölésnél a betűk előtti számok a közepes **C** tartalom százszorosát, a betűk az ötvözők vegyjelét, a betűk utáni számok a S- tartalom százszorosát jelentik (9SPb28 és a 10SPb35 jelű acéloknak 0,15-0,3% Pb- tartalom van.)

A **kén** a hagyományos és legolcsóbb ötvözőeleme az automataacéloknak. A kén az acélban jelenlévő mangánnal szulfidokat alkot. A mangán-szulfid olvadáspontja 1610 °C, ami magasabb, mint az acél olvadáspontja, ezért egyenletes, diszperz eloszlásban helyezkedik el a szövetszerkezetben. Forgácsoláskor a szulfidzárvány akadályozza a diszlokációk mozgását, így az acél nagymértékben keményedik, rideggé válik az alakított mikrotérfogóban és a leválasztott forgács, darabos, töredezett lesz.

Az **ólom**, a **tellúr** és a **szelén** a vasban oldhatatlan. A vassal és az acél ötvöző- illetve kísérőelemeivel nem vegyül. Az acél kristályosodásakor a tellúr és az ólom kis olvadáspontjuk miatt olvadt állapotban emulgált, apró cseppek formájában van jelen. Ezek az elemek a forgácsolhatóságot azáltal javítják, hogy a forgácsstőben kialakuló, viszonylag magas (500-800 °C) hőmérsékleten megolvadnak. Az ólom azon túl, hogy a forgácsstőben megolvadva széttördeli a forgácsot, rákenődve a szerszám élére, csökkenti a súrlódást, és ezzel megakadályozza az acél felhegedését a szerszámra.

Legjellemzőbb alkalmazási területük a csavarok és csavaranyák gyártása.

A nagy igénybevételeknek kitett, nagy üzembiztonságot kívánó alkatrészek gyártásához az automataacélok **alkalmatlanok**.

### **Képlékeny hidegalakításhoz kifejlesztett acélok**

A hidegalakítás szempontjából kedvező, ha az alakítási szilárdság és a folyáshatár nem nagy, mert ez csökkenti az alakító szerszámra ható erőt.

A képlékeny hidegalakítás céljára kifejlesztett acélok felsorolt tulajdonságai kedvezőbbek, mint a hasonló, általános rendeltetésű acéloké. Ezeknél, az acéloknál *nem a folyáshatár minimuma garantált, hanem a folyáshatár megengedhető maximuma*.

A hideg, képlékeny alakítással készülő kötőelemek gyártásához ajánlott ötvözetlen és ötvözött acélok jelölése az MSZ 6251 és EN- szerint a következők:

**CO8; C10; C15; C22; C35; C45; 20Cr4; 16MnCr5; 18CrMo4; 34Cr5; 38Cr5.**

Ötvözött változatban:

**41Cr5; 26CrMo5-1; 33CrMo5-1; 42CrMo5-1; 42CrV5; 51CrV5; 41NiCrMo3-2-1; 30NiCrMo6-6-2.**

Az EN- szerinti jelölésnél a betűk előtti számok a közepes **C** tartalom százszorosát, a betűk az ötvözők vegyjelét, a betűk utáni számok a Cr, Mo és Ni tartalom négyszeresét, a V tartalom tízszeresét jelentik.

### **Nitridálható acélok**

A nitridálás céljára külön acélcsoportot fejlesztettek ki, amelyet az MSZ 17779 tartalmaz. Jelölésük: **31CrMo1-2; 34CrAlMo5-4; 41CrAlMo7-4.**

A betűk előtti számok a közepes **C** tartalom százszorosát, a betűk az ötvözők vegyjelét, a betűk utáni első számok a **Cr** tartalom négyszeresét, a második szám az **Al** tartalom négyszeresét jelentik.

A nitridálás céljára kifejlesztett acélok mindig csillapítottak, amit a legfeljebb **0,5% Si** ötvözéssel érnek el. Ezeknek, az acéloknak a maximális **S** és **P** tartalma  $\leq 0,03$  %. Az átedzhetőség javítása céljából ezek az acélok krómmal és molibdénnel ötvözöttek. A molibdén ötvözés a megeresztési ridegedéssel szembeni ellenállást biztosítja.

A nitridálás céljára kifejlesztett acélok két típusa alumíniummal is ötvözött. Az alumínium a nitrogénnel igen stabilis, nagy keménységű **nitridet** alkot. A kéreg keménysége az alumíniummal ötvözött típusoknál 950 HV.

### **Krómacél gördülőcsapágyakhoz**

Ez az acélcsoport gördülőcsapágyak és a dizelbefecskendező berendezések finomfelületi módszerekkel megmunkált elemeinek gyártásához alkalmas. Hőkezelt (edzett) állapotban nagy a kopásállósága és kifáradási határa a krómacélnak.

Ezen acéloknak a jelölése az MSZ 17789 EN- szerint a következő: **100Cr6** és

**100CrMn6**. A betűk előtti számok a közepes **C** tartalom százszorosát, a betűk az ötvözők vegyjelét, a betűk utáni szám a Cr tartalom négyszeresét jelenti. Az

említett mechanikai, tribológiai (kopási) tulajdonságokat az ötvöző elemek mellett a magas *C* tartalom és az alacsony *P* és *S* tartalom ( $P_{\max} \leq 0,027\%$ ;  $S_{\max} \leq 0,025\%$ ) biztosítja. Érdekesség, hogy a golyóscsapágy gépelem, mégis olyan acélból készül, ami széntartalma alapján szerszámacél ( $1\% > 0,6\%$ ).

### **Korrózióálló acélok**

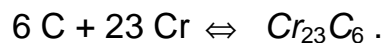
Ezeket az acélokat az teszi korrózióállóvá, hogy **az acél felületén kialakul egy krómoxid réteg**, amely áthatolhatatlan az oxigén számára. Fontos továbbá, hogy az acélcsoport **homogén** szerkezetű. A felületi króm-oxidréteg kialakulásához az acélnak legalább **11 tömeg %** oldott *Cr*-ot kell tartalmaznia.

Az MSZ EN 10088-1 szabvány vonatkozik a korrózióálló acélokra. Ezen szabvány szerint a leggyakrabban alkalmazott ferrites-szerkezetű korrózióálló acélok a következők: **X6Cr13; X6Cr17; X3CrTi17; X6CrMo17-1**.

A jelölésnél az **X**- utáni szám a közepes **C** tartalom százszorosát, a betűk az ötvözők vegyjelét, a betűk utáni számok sorrendben az ötvözők mennyiségének középértékét fejezik ki egész számra kerekítve.

A ferritben oldott krómtartalom növekedésével az acél szilárdsági értékei növekednek. A 0,08 %-nál kisebb *C* tartalmú acélok gyártása csak speciális, argon-oxigén átfúvatásos kezeléssel oldható meg. A karbon igen erős ausztenit-stabilizáló.

A korrózióálló acélok esetében a szén sajátos nehézségeket okoz, mivel erősen karbidképző elem. A korrózióálló acél kis széntartalmú, mert a szén jelentős mennyiségű krómot köt le krómkarbid vegyület formájában:



Az így megkötött króm a korrózióállóság szempontjából hatástalan.

Az acél *C* tartalmának **0,03%** alatti értékre történő csökkentésével a karbidképződés a karbon hiánya miatt elkerülhető.

A szemcsehatáron és annak környezetében nagyobb a karbontartalom, mint a szemcse belsejében. Emiatt a króm-karbid képződése, de különösen annak koncentrációja, kiválása, legvalószínűbben a szemcsék határán megy végbe. A  $Cr_{23}C_6$  karbid krómtartalma 94 tömeg %, ezért 0,1% karbon 1,67% krómot köt meg, ami a karbid környezetében elszegényíti krómban a szemcsét. A szemcsehatáron létrejövő króm-karbid két szempontból is erősen rontja a korrózióállóságot. Az egyik hatás, hogy a szemcsehatáron keletkezett új fázis, a króm-karbid, a szemcse anyagával elektrolit jelenlétében galvánelemet képez. A másik hatás az, hogy a krómban elszegényedett szemcsehatár környezete elveszti a nagy krómtartalom biztosította passzivitást (krómoxid védőréteget). E két hatás együttese okozza a szemcsehatár korróziót.

A feldolgozás (pl. hegesztés) vagy a használat során ismételten nagyobb hőmérsékletre felhevülő korrózióálló acélokból a króm-karbid képződését két módon lehet elkerülni.

Az egyik lehetőség az acél *C* tartalmának **0,03 %** alatti értékre történő csökkentése.

A másik lehetőség, hogy az acélt **stabilizálók**kal ötvözik, amelyeknek a karbon iránti vegyrokonsága még a króménál is erősebb. Ilyen stabilizáló



ötvöző a titán (Ti), a nióbbium (Nb), a tantál (Ta). Ezek megkötik a korbont, ezzel megakadályozzák a káros króm-karbid képződését. Így elkerülhető a szemcsehatár króm- elszegényedése. A titánból, legalább a korbontartalom ötszörösét, nióbbiumból hétszörösét kell ötvözni az acélba a króm-karbid képződésének megakadályozásához. A titán egyben igen erős oxid- és nitridképző, ezért a titánnal stabilizált acélban elkerülhetetlen az oxid- és nitridzárványok jelenléte. Ezek a zárványok a hengerlés hatására elnyúlnak és a termék felületén egyenetlenséget, esztétikai hibát okoznak. A nióbbiummal stabilizált korrózióálló acéloknál ilyen fajta hibát okozó zárványok nem keletkeznek.

A **ferrites korrózióálló acélok** korrózióállósága a C tartalom növekedésével csökken, a Cr tartalom növekedésével nő. A kisebb Cr tartalmú acélok a kevésbé agresszív közegnek, mint a víz, a gőz képesek ellenállni. Tipikus alkalmazási területük a háztartási és orvosi (sebészeti) eszközök gyártása. A nagyobb Cr tartalmú ferrites acélokból gyenge savakkal érintkező tej-, szappan- és söripari berendezések készülnek.

A homogén **ausztenites** szerkezet a Cr tartalom növekedésével mintegy 18% Cr tartalomig egyre kevesebb Ni ötvözéssel érhető el. A Ni lényegesen drágább ötvöző, mint a Cr, ezért az ausztenites korrózióálló acélokba a korrózióállóságot minimálisan biztosító 12%-nál nagyobb, 18% körüli krómmennyiséget ötvöznek.

Az ausztenites szerkezetű korrózióálló acélokat az MSZ EN 10088-1 szabvány tartalmazza. Ausztenites korrózióálló acélok:

**X2CrNi19-11; X5CrNi18-10; X6CrNiTi18-10; X8CrNiS18-9;  
X6CrNiNb18-10; X6CrNiMoTi17 12-2; X2CrNiMo18-14-3; X2CrNiMo18-15-4; X1CrNiSi18-15-4; X1NiCrMoCu25-20-5; X1NiCrMoCuN25-20-5.**

(A jelölés elemeinek magyarázata a korábbiaknak megfelelő)

Az ausztenites korrózióálló acélok a ferrites szerkezetűekhez képest számottevően kisebb folyáshatárral ( $R_{eH}$ ), de lényegesen nagyobb szakadási nyúlással ( $A_5$ ) rendelkeznek. Az ausztenit folyáshatára növelhető például interszticiósan oldódó nitrogén ötvözésével, amint például a **X1NiCrMoCuN25-20-5** jelű acélnál, vagy a szubsztitúciósan oldódó szilíciumötvözéssel érnek el. Ilyen például a **X1CrNiSi18-15-4** jelű acél.

Az ausztenites korrózióálló acélok a legtöbb szilárd, folyékony és gáz halmazállapotú korrózió anyaggal szemben ellenállóak, kedvező mechanikai tulajdonságúak, melegen és hidegen kiválóan alakíthatók, forgácsolhatók és hegesztésük sem igényel bonyolult munkarendet. Ezen tulajdonságok, ezt az acélcsoportot nélkülözhetetlenné teszik a vegyipari, gyógyszeripari, és élelmiszeripari gépgyártásban. Az ausztenites korrózióálló acélok felületkikészítéssel rendkívül esztétikus megjelenést biztosítanak a termékeknek, amit pótlólagos védelem nélkül is szinte korlátlan ideig megőriznek. Ezek a tulajdonságok teszik őket elterjedté a közszükségleti, háztartási cikkek gyártásában és az építőiparban.

Az ún. **duplex** (ausztenit + ferrites) korrózióálló acél ára, a kisebb *Ni* tartalom miatt, a tisztán ausztenites korrózióálló acélokhoz képest alacsonyabb. Az MSZ EN 10088-1 szabvány szerinti jelölésük: **X2CrNiN23-4; X3CrNiMoN27-5-2; X2CrNiMo22-5-3.**

A felsorolt duplex korrózióálló acélok **N**- tartalma 0,05-0,2% között van.

A **martenzites korrózióálló acélok** csak edzett (martenzites – hőkezelt) állapotban korrózióállóak. Az alapvető különbséget a ferrites korrózióálló acélokhoz képest a nagyobb **C** tartalom jelenti. A használatban leginkább elterjedt acélfajták az MSZ EN 10088-1 szerint a következők: **X12Cr13; X20Cr13; X30Cr13; X39Cr13; X17CrNi16-2.**

Az X12Cr13 jelű acélt orvosi eszközök (pl. fogókhoz); az X20Cr13 acélt nagy mechanikai igénybevételnek kitett tengelyekhez, csapokhoz, késekhez, szikékhez; az X39Cr13 acélt műanyag-alakító szerszámokhoz; az X17CrNi16-2 acélt szivattyúelemekhez, szelepek és más nagy igénybevételnek kitett alkatrészek gyártásához használják.

### **Hőálló acélok**

Ezek az acélok a vegyi összetételtől, az alkalmazás körülményeitől függően folyamatos vagy szakaszos üzemeltetés mellett ellenállnak a túlzott mértékű oxidációnak, reveképződésnek.

**Az acélt hőállónak tekintjük addig a hőmérsékletig, ameddig a reveképződés sebessége az adott közegben, óránként kisebb, mint 1 g/m<sup>2</sup>, és a hőmérsékletet 50 °C-kal növelve sem haladja meg az óránként 2 g/m<sup>2</sup> értéket.**

Az ötvözetlen acélok 500 °C-os hőmérsékletig viszonylag jól ellenállnak a levegő oxidációs hatásának, de ennél nagyobb hőmérsékleten, vagy a levegőnél agresszívabb közegnek, mint a füstgázoknak, már nem.

Az acél felületén létrejövő króm-oxid réteg elzárja a levegőben, vagy más gázatmoszférában lévő oxigén útját az acél belseje felé, egyúttal az erősen agresszív kén-dioxid tartalmú füstgázoknak is ellenáll.

A homogén szerkezetű, allotróp átalakuláson át nem eső acéloknál, az oxidréteg feltöredezésével sem kell számolni. A *Cr*-mal erősen ötvözött ferrites, illetve a *Cr*-mal és *Ni*-vel ötvözött ausztenites szerkezetű acélok egyaránt alkalmasak a magas hőmérsékleten fellépő korrózióval szembeni ellenállásra.

A felsorolt ötvözőkön kívül a *Si*, valamint az *Al* szerepe fontos a hőálló acélokban, ugyanis az acél felületével érintkező oxigént elsősorban a felületen lévő ötvöző króm, szilícium és alumínium ionok kötik meg. A keletkező vas-oxid komplex vegyületeket alkot az előbb felsorolt elemek oxidjaival, vagyis a nagy olvadáspontú ionos vegyületek, a króm-, a szilícium- és az alumínium-oxid, védő szerepet tölt be.

A szilícium revésedéssel szembeni ellenállás-növelő hatása, mintegy háromszor erősebb, mint a krómé, az alumíniumé pedig mintegy négyszerese a króménak.

A **ferrites szerkezetű hőálló acélok** MSZ EN szerint: **10CrSiAl13; X10CrSiAl18; X10CrSiAl24, X18CrN28; X5CrTi12.**

A jelölésben az X utáni szám a közepes **C** tartalom százszorosát, a betűk az ötvözők vegyjelét, a betűk utáni számok a Cr ötvöző négyszeres, közepes tömeg %-át fejezik ki egész számra kerekítve. A felsorolt acélok *Si* tartalma 0,8-1,5%, *Al* tartalma 0,7-1,2%; *N* tartalma 0,15-0,25%; *Ti* tartalma 0,45-0,48%.

*Tartós üzemi hőmérsékletük:*

- 850 C°-ig – **X10CrSiAl13; X18CrN28; X5CrTi12.**
- 950 C°-ig – **X10CrSiAl18.**
- 1100 C°-ig – **X10CrSiAl24.**

Ezen adatok alapján látható, hogy a ferritben oldott **C** tartalom jelentősen növeli a megengedhető üzemi hőmérsékletet. A ferrites hőálló acélok a nagy kéntartalmú gázokkal szemben nagyobb ellenállással rendelkeznek, mint az ausztenites acélok. Hátrányuk viszont, hogy két hőmérséklettartományban is elridegednek, továbbá 1000 °C hőmérséklet felett szemcsedurvulásuk rohamossá válik.

A nagyobb *Cr* tartalmú ( $Cr \geq 21\%$ ), ferrites acélokban a 400-450 °C-os hőmérséklet-tartományban diffúzióval rövidtávú, stabilis krómion átrendeződés következik be a szilárd oldatban. A folyamat 475 °C-on játszódik le a leggyorsabban, ezért ezt a jelenséget **475 °C-os elridegedésnek** nevezik. Az így kialakuló kristályrács rácsparamétere eltér az ágyazó alapmátrixtól, ezért rácstorzulással is fokozza a ridegedést.

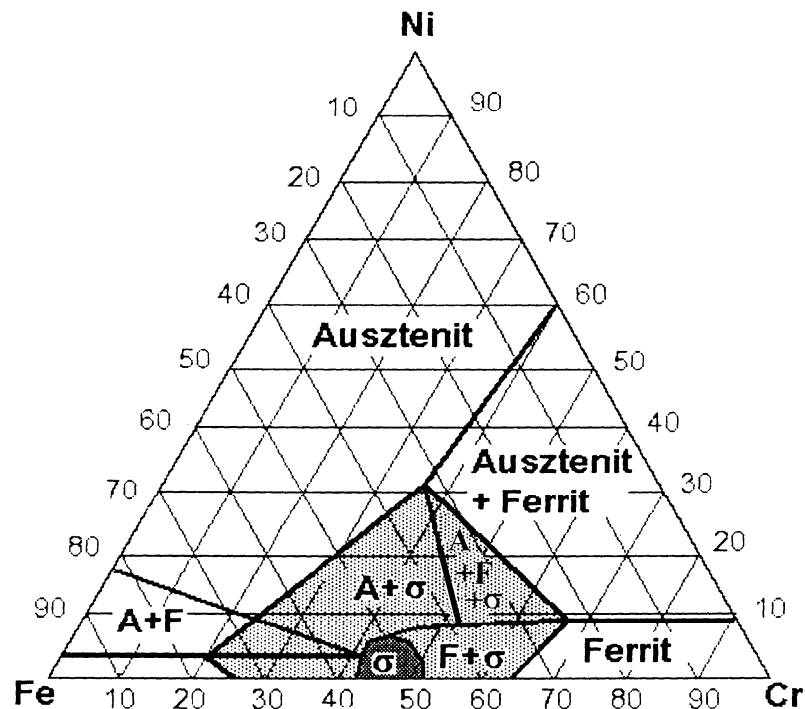
A nagy *Cr* tartalmú ferrit elridegedésének másik oka egy fémes vegyület, az FeCr, képződésével van összefüggésben.

A  **$\sigma$ -fázis** kemény, amit a szemcsék belsejében mikrotűk formájában létrejövő 1000-1600 HV keménységű, nagyobb sűrűségű, 52% *Cr*-ot tartalmazó FeCr vegyület okoz. A  $\sigma$ -fázis 550-900 C° hőmérséklettartományban stabilis, de a képződés sebessége a 750-800 °C-on a leggyorsabb. A vegyületképződéshez szükséges króm koncentrációja diffúzióval megy végbe, ami a hőmérsékleten kívül az oldó rács méreteitől is függ. Kedvezőtlen, hogy a reveállóságot jelentősen növelő *Al*, de különösen a *Si* fokozza a  $\sigma$ -fázis képződését. A  $\sigma$ -fázis 900 C° hőmérsékleten elveszti stabilitását, elbomlik és diffúzióval a *Cr* eloszlása ismét egyenletessé válik a szilárd oldatban.

A 6.2. ábrán a vas-króm-nikkel háromalkotós egyensúlyi diagram 650 °C-os hőmérsékletnek megfelelő metszete jól szemlélteti az egyes alkotók hatását a  $\sigma$ -fázis képződésére.

Ezen ábra alapján a X10CrSiAl13 jelű acél a kis *Cr* tartalom miatt nem hajlamos a  $\sigma$ -fázis okozta elridegedésre, viszont a nagy hőmérsékleten

fellépő korrózióval szemben ennek következtében kevésbé ellenálló. Különösen kicsi az ellenállása a nitrogéntartalmú gázokkal szemben.



6.2 ábra A vas-króm-nikkel háromalkotós egyensúlyi diagram 650 °C-os metszete

A **X10CrSiAl18**, **X10CrSiAl24** és a **X18CrN28** jelű acélok, elridegedésre kissé hajlamosak, ezért használatuk ott javasolt, ahol a gyártmány nincs kitéve lényeges hőmérsékletingadozásnak, és üzemeltetési hőmérsékletük meghaladja a  $\sigma$ -fázis stabilitásának felső határát. Tipikus alkalmazási területük a nagy hőmérsékletű só- vagy fémolvadékok tárolására szolgáló tartályok.

*Ausztenites hőálló acélok:* **X10CrNiTi18-10;** **X10CrNiNb18-10;**  
**X12NiCrSi35-16-2;** **X15CrNiSi19-10-1;** **X15CrNiSi24-19;** **X15CrNiSi26-20-3.**

A jelölésben az X utáni szám a közepes **C** tartalom százszorosát, a betűk az ötvözők vegyjelét, a betűk utáni számok sorrendben az ötvözők mennyiségének középértékét fejezik ki, egész számra kerekítve.

*Tartós üzemi hőmérsékletük:*

- 800 C°-ig – **X10CrNiTi18 10; X10CrNiNb18-10.**
- 900 C°-ig – **X12NiCrSi35-16-2; X15CrNiSi19-10-1.**
- 1000 C°-ig – **X15CrNiSi24-19.**
- 1050 C°-ig – **X15CrNiSi26-20-3.**

Az ausztenites szerkezetű acélokban a  $\sigma$ -fázis képződése nem kizárt, de lényegesen lassabban megy végbe, mint a ferrites acélokban. Az ausztenites acélok további előnye, hogy szemcsedurvulásra is kevésbé hajlamosak és

hatásosan ellenállnak a *nitrózus* gázok károsító hatásának. Az ausztenites hőálló acélok kúszáshatára lényegesen nagyobb. Olyan esetekben, amikor a korrózió mellett, még mechanikai igénybevételnek is ki van téve az alkatrész vagy szerkezet, az ausztenites acélok alkalmazása gazdaságosabb.

Abban az esetben, ha az acélban a *Ni* tartalom meghaladja a 30 %-ot (6.2. ábra), akkor semmilyen *Cr*-tartalom mellett nem képződik  $\sigma$ -fázis. Ezt a tulajdonságot használják ki olyan esetekben, amikor az acél nagy hőmérséklet-ingadozásnak van kitéve, például az

**X12NiCrSi35-16-2** összetételű acélnál, amit elsősorban gázturbina alkatrészek gyártásánál használnak.

A **X15CrNiSi19-10-1** jelű acélt főleg hőkezelő berendezéseknél alkalmazzák. A **X15CrNiSi24-19** és **X15CrNiSi26-20-3** jelű acélokat a nagy mechanikai igénybevételnek kitett alkatrészek, vegyi- és ásványolajipari berendezések szerelvényeihez alkalmazzák.

#### *Nagy mangántartalmú, kopásálló acél*

A nagy *C* tartalom mellett jelentős *Mn* ötvözéssel elérhető, hogy az acél szobahőmérsékleten is homogén, túlhűtött ausztenitből álljon. Ezek az ausztenites mangánacélok, amelyeket gyakran az első előállító után **Hadfield-acélnak** is neveznek, a dinamikusan ható, koptató igénybevételnek egészen kiválóan képesek ellenállni.

Az MSZ EN 520 szerinti jelölése: **X120Mn13**.

A jelölésben az *X* utáni szám a közepes **C** tartalom százszorosát, a betűk az ötvöző vegyjelét, a betűk utáni számok az ötvöző mennyiségének középértékét jelentik.

Az ausztenites mangánacél olyan dinamikus igénybevétellel társult koptatással szemben ellenállóak, amilyen a vasúti váltóknál, földmunkagépek karmainál, kötőrők pófáinál stb. lép fel. Ez az acél azért rendelkezik kiváló ellenálló képességgel, mert a dinamikus hatásokat az ausztenites szerkezet kiválóan elviseli. Nagy az alakváltozó képessége és a felületén a nagy helyi nyomás okozta képlékeny alakváltozás hatására az ausztenit átalakul stabilis martenzites szerkezetté.

A felületen létrejött nagy keménységű martenzit viszont a kopással szemben biztosít nagy ellenállást. Az ilyen acélból készült alkatrésznek a felületén, az üzemeltetés során a martenzites réteg mindig újra képződik, ezzel biztosítva a hosszú élettartamot.

### **6.2.3. Ötvözetlen szerszámacélok**

A szerszámok anyagának olyan ötvözetek felelnek meg, amelyeknek a szilárdsága, és főleg a keménysége, lényegesen nagyobb, mint a megmunkálendő anyagé. Ezt a nagyobb (0,6 % feletti) *széntartalommal*, esetleg más, főleg *karbidképző ötvözőkkel* lehet elérni. A szerszámacélok általában kétfázisúak. A szívósabb alap szövetelembe (pl. perlitbe) kemény vegyület típusú szövetelemek (pl. cementit) ágyazódnak be. Szilárdságuk,

keménységük hőkezeléssel fokozható. A szerszámacélok szilíciumtartalma általában 0,15-0,35%, szennyező tartalmuk (kén, foszfor) kevesebb, mint 0,025%.

Az ötvözetlen szerszámacélokat leginkább környezeti hőmérsékleten használják azért, mert keménységüket, az edzéssel kialakított martenzites szövetszerkezet biztosítja. Az ilyen acél viszont hő hatására kilágyul, elveszti keménységét, kopásállóságát. További hátránya az ötvözetlen szerszámacélnak, hogy csak 2-5 mm vastagságban edződik át. Fő felhasználási területük a fúrók, vágók, fűrészek, őrlőberendezések gyártása. A kisebb széntartalmú szerszámacélok szívósabbak, ezért késeket és olyan szerszámokat gyártanak belőle, amelyeknél a keménység mellett a szívósság is követelmény. Szabványos anyagjelük **C45 – C130**.

#### 6.2.4. Ötvözött szerszámacélok

Az ötvözött szerszámacélok nagyobb igénybevételt és magasabb hőmérsékletet is elviselnek. Ez azzal magyarázható, hogy keménységüket fokozzák a benne, az ötvözőktől kiváló különféle karbidok, amelyek magasabb hőmérsékleten is megőrzik keménységüket. Fő ötvözőik az erősen karbidképző elemek, mint pl. volfrám, króm, nikkel, molibdén, vanádium stb.

Az ötvözött szerszámacéloknak három fő csoportja van:

1. hidegalakító,
2. melegalakító,
3. forgácsoló szerszámacélok csoportja.

##### 6.2.4.1. Hidegalakító szerszámacélok

A hidegmegmunkáló szerszámokat hideg (szobahőmérsékletű) szerkezeti anyagok forgács nélküli alakítására, mint például hideg folytatására, húzására, hajlítására, vágására stb. használják.

**Ezeknek a szerszámoknak szívós maggal és kemény felülettel kell rendelkezniük. Ezeket a tulajdonságokat martenzites alapszövetbe ágyazott kemény karbidokkal lehet biztosítani.**

**A hidegalakító szerszámacélok ötvözői** a következő tulajdonságokat biztosítják:

- növelik az acél átédzhetőségét,
- karbidokat képeznek (kemény, kopásálló kiválásokat hoznak létre),
- javítják az alapfázis (ágyazó martenzit) *megegyezésállóságát*.

Az MSZ EN szerinti hidegalakító szerszámacélok ötvözésük és felhasználásuk szerint a következő csoportokba sorolhatók:

- eutektoidos magánacél, pl. 70MnMoCr8, 90MnCrV8,
- króm-volfrám ötvözésű acélok, pl. 50WCrV8, 95MnWCr5,

- krómmal gyengén ötvözött hipereutektoidos acélok, pl. 102Cr6,
- krómmal erősen ötvözött ledeburitos acélok, pl. X153CrMoV12 és X210CrW12-1.

Az MSZ EN jelölésnél a betűk előtti számok a közepes **C** tartalom százszorosát jelenti. A betűk az ötvözők vegyjelét, a betűk utáni számok, ha **X** jel szerepel, az első helyen álló ötvöző közepes mennyiségének %-át, ha nincs **X** jel a különböző ötvözők esetén a következő %-os mennyiséget jelentik: **Mn, Cr, Si, Mo** és **W** esetén a szám negyedét, **V** ötvözőnél a tizedét.

A **mangánötvözésű hidegalakító szerszámacél** átedzhetőségét a csekély mangánötvözés is jelentősen megnöveli. Az acél keménységét a martenzites szöveten kívül a viszonylag nagy mennyiségű mangán-karbidoknak köszönheti. Mivel hőkezeléskor csekély az alakváltozása, tagolt felületű, jelentősen eltérő keresztmetszetű, illetve fokozott méretpontosságú szerszámok (pl. kivágó-szerszámok, idomszerek) készítésére alkalmas.

A **króm-volfrámötvözésű hidegalakító szerszámacélokban** a króm- és volfrám-karbidok keményebbek és nagyobb hőmérsékleten is stabilabbak, mint a mangán-karbidok, ugyanakkor az acél átedzhetőségét is növelik.

A **krómmal gyengén ötvözött hipereutektoidos hidegalakító szerszámacélokban** a króm főleg az átedzhetőséget növeli. A viszonylag nagy C tartalomnak csak kis része kötött króm-karbid formájában. Gondos gyártásukkal és hőkezelésükkel elérhető, hogy a kisebb mennyiségű króm-karbid igen finom eloszlású legyen az ágyazó szövetszerkezetben. Ennek köszönhetően ezeknek az acéloknak, köszörülés után kiváló a felületi minőségük. Főleg kések, pengék, dörzsáruk készítésére használják.

A **krómmal erősen ötvözött ledeburitos hidegalakító szerszámacélok** kristályosodása karbideutektikum képződésével fejeződik be. Ez hálót képez, amit a kristályosodást követő nagymértékű melegalakítással kell összetörni, felaprózni, ugyanis a nagyméretű, hálós eloszlású karbidok lerontanák az acél szívósságát. A karbidok aránya eléri a 25%-ot, így a nagy mennyiségű  $Cr_7C_3$  karbid kiváló kopásállóságot, a krómötvözés nagymértékű átedzhetőséget biztosít. Ezen tulajdonságok következtében a ledeburitos krómacélok a nagyteljesítményű, nagyméretű, hidegen képlékenyalakító és kivágó szerszámok alapanyagai.

#### **6.2.4.2. Melegalakító szerszámacélok**

Azoknál a szerszámoknál, amelyek üzemi hőmérséklete a 200 °C-ot meghaladja, a keménység és kopásállóság növelése már nem oldható meg csupán vas- és mangánkarbid kiválásával, mert ezek a karbidszemcsék a szerszámoknak tartós üzemeltetése során, növekednek (koagulálódnak), illetve elbomlanak.

A szerszám üzemi hőmérsékletén megkívánt keménység, kopásállóság, szívósság továbbá a termikus fáradás (a szerszám felmelegedése és lehűlése

során ismételten fellépő termikus feszültségek) elviselése már csak **stabilabb karbidképző elemek megfelelő mennyiségű ötvözésével érhető el.**

A melegmunkáló szerszámacélok ötvözői több feladatot is ellátnak. Egyrészt megakadályozzák a szemcsedurvulást és növelik az átedzhető átmérőt, másrészt karbidokat képezve növelik a keménységet és kopásállóságot. A melegmunkáló szerszámacélok megkívánt szívóssága csak viszonylag kis szénttartalomnál érhető el ( $C \leq 0,6 \%$ ).

Az MSZ EN szerinti melegmunkáló szerszámacélok ötvözésük és felhasználásuk szerint a következő csoportokba sorolhatók:

- nikkel-króm ötvözésű acélok, pl. 55NiCrMoV7,
- króm-volfrám-vanádium ötvözésű acélok, pl. 38CrCoWV18-17-17,
- króm-molibdén-vanádium ötvözésű acélok, pl. X40CrMoV5-1; X37CrMoV5-1.

A **nikkel-króm ötvözésű melegmunkáló szerszámacélok** a tagolt felületű, jelentősen eltérő keresztmetszetű, nagy méretű kovács- és sajtoló szerszámok alapanyagai.

Az 55NiCrMoV7 jelű szerszámacél a melegmunkáló acélok csoportjában a legolcsóbb. Igen elterjedt olyan, nagyméretű és nagytömegű szerszámok gyártásánál, ahol az üzemi hőfok a 300 °C-ot nem haladja meg.

A **króm-volfrám-vanádium ötvözésű melegmunkáló szerszámacél** a króm- és volfrám-karbidok révén 600-650 °C-os hőmérsékleten is alkalmazhatók. Jó átedzhetőségük a krómötvözésnek tulajdonítható. Ezeket, az acélokat agas árak miatt csak kisebb méretű szerszámokhoz, főleg **szerszámbetétek** gyártásához használják. Ilyen szerszámokat alkalmaznak rúd- és csősajtolásnál, melegsorjázáskor, süllyesztékes kovácsolásnál és zömítésnél.

A **króm - molibdén - vanádium** ötvözésű szerszámacélokat a lényegesen drágább króm-volfrám ötvözésű acélok helyettesítésére fejlesztették ki. Igen kedvező szívósságuk, valamint termikus kifáradásnak jó ellenálló képességük miatt a legelterjedtebb melegmunkáló szerszámacélok. Különösen alkalmasak fémek nyomásos öntésénél használt formák készítéséhez, mert az olvadt fém okozta erózióknak is jól ellenállnak. További előnyük, hogy hőkezeléskor alak- és méretváltozásuk mérsékelt.

#### **6.2.4.3. Forgácsoló szerszámacélok**

Forgácsoló megmunkáláskor a forgácsolási sebesség növekedésével a szerszámra ható mechanikai és koptató igénybevételnek egyre nagyobb hőmérsékleten kell megfelelnie. Ennek a követelménynek a kielégítésére egy külön acélcsoportot, az ún. **gyorsacélokat** fejlesztették ki. A gyorsacélok 600 °C-ig megőrzik keménységüket és kopásállóságukat. Kiváló tulajdonságaiknak köszönhetően már nemcsak forgácsoló, hanem például képlékenyalakító



szerszámokat is készítenek belőlük, főként a jelentősebb molibdén ötvözésű gyorsacélokból.

A gyorsacélok keménysége, szilárdsága, szívóssága elsősorban az acélban lévő karbidok típusától, mennyiségétől, ezek méretétől, eloszlásától függ. A gyorsacélok C tartalma számottevő ( $C = 0,7-1,4 \%$ ), hiszen a karbidok képződéséhez, az ágyazó szövet kellő szívósságához nélkülözhetetlen. A Mn és Si rontja a gyorsacél hőállóságát, de az acél csillapításához nélkülözhetetlenek, ezért mennyiségüket a S-hez és a P-hoz hasonlóan korlátozzák ( $Mn, Si \leq 0,4 \%$  és  $P, S \leq 0,03 \%$ ).

A gyorsacélok kopásállóságát a szívós alapszövetbe ágyazott karbidok biztosítják. **A gyorsacélok fő ötvözői a volfrám, vanádium, króm és a molibdén.**

A króm jelentősen növeli az átedzhető szelvényvastagságot, a hőkezelés során keletkező króm-karbid ( $Cr_{23}C_6$ ) pedig, a keménységet növeli.

A vanádium ötvözésének eredményeként a gyorsacélok **kiválásosan keményedők** lesznek.

A volfrám és a molibdén a gyorsacélnak *egymást helyettesíthető ötvözői*. Mindkét ötvöző erős karbidképző, s még az edzési hőmérsékleten sem kerül az összes karbid szilárd oldatba. Az *oldatlan karbid*, kedvező hatású, megakadályozza az ausztenit szemcsedurvulását, de egyben csírát képez a lehűléskor képződő karbidszemcséknek. Ennek következtében, különösen a *volfrám-karbidok, nagyobb méretűek, ami a gyorsacél szívósságát csökkenti*. A gyorsacél szívóssága rendkívül finom szemcseszerkezettel biztosítható. A finom szerkezet úgy érhető el, ha az edzést és a megeresztést megelőzően, az acélban a karbidok mérete kicsi és a megeresztés után kiváló karbidok finoman (diszperz módon) oszlanak el a szövetszerkezetben. A gyorsacélok a nagymennyiségű ötvöző miatt, rossz hővezetők. **A gyorsacélok kobalt ötvözésének** a célja a keménység növelésén túl az acél hővezető képességének javítása és a diszperz kiválású karbidok méretének csökkentése.

Néhány példa az MSZ EN szerinti a gyorsacélok szabványos jelölésére: **HS 18-0-1;**  
**HS 6-5-2; HS 6-5-2-5; HS 2-9-1-8; HS 6-5-2-5; HS 6-6-2; HS 5-4; HS 10-4-3-10.**

Az MSZ EN jelölésnél a HS betűk a *high speed* angol szavak kezdőbetűi. A számok közül az első a volfrám, a második szám a molibdén, a harmadik szám a vanádium, a negyedik szám a kobalt ötvöző tömegszázalékának középértékét fejezi ki. A krómtartalom minden gyorsacélban 3,8-4,5%.

A gyorsacélokat elsősorban forgácsolószerszámok, például fúrók, marók, dörzsárak, fogazó-szerszámok, menetvágók, fűrészek és finommechanikai szerszámok gyártásához használják.

A HS 6-5-2-5 és HS 2-9-1-8 jelű gyorsacélokból nagy igénybevételű folyató- és húzóbéllyegeket, finomkivágó, hideg képlékenyalakító szerszámokat is gyártanak.

A nagyobb keménységű anyagok forgácsolásához használatos szerszámokat HS 18-0-1, illetve HS 10-4-3-10 jelű gyorsacélból gyártják.

### 6.3. Acélöntvények

**Az acélöntvény 2,06 %-nál kisebb széntartalmú Fe-C ötvözet, amelyet formába öntenek.** Az acélöntvények *összetétele, hőkezelése és egyéb tulajdonságai* általában azonosak a hengerelt és kovácsolt acélokéval. A jobb önthetőség érdekében az acélöntvényekbe mangánt (kb. 0,3 - 0,8 %) és szilíciumot (kb. 0,2 - 0,5 %) adagolnak.

**A magas öntési hőmérséklet és a hőközben történő kristályosodás miatt az acélöntvény zsugorodása nagy (2-2,5%).** Emiatt a megszilárdult acélöntvényben nagy feszültség, durvaszemcsés szerkezet, szívódási üregek és gázhólyagok alakulnak ki.

**Az acélöntéssel előállítandó munkadaraboknak ezért már a tervezéskor lehetőleg egyszerű alakot kell adni.** Célszerűbb a kinyúló részeket, pl. lábakat vagy tartóbakokat utólag, hegesztéssel felerősíteni az öntvényre.

Az acélöntvény hűlése során keletkező feszültségek miatt, különösen a nagyobb öntvényeknél, szükséges a nyers öntvény **normalizálása** vagy **nemesítése**, hogy a szemcseszerkezetet finomítsuk, és nagyobb szívósságot érjünk el.

#### 5.3.1. Ötvözetlen acélöntvények

Az MSZ 8276 előírásai szerint az ötvözetlen acélöntvényeket három minőségi csoportban gyártják.

Az **első minőségi csoportba** az általános rendeltetésű öntvények tartoznak, és ezeket a **szakítószilárdság** és a **szakadási nyúlás** alapján minősítik.

A **második minőségi csoportba** a statikus terhelésnek kitett gyártmányok anyagául szolgáló öntvények tartoznak. Ezeknek, az öntvényeknek nemcsak a **szakítószilárdsága** és **szakadási nyúlása** garantált, hanem a **folyáshatára** ( $R_{eH}$  vagy  $R_{p0,2}$ ) is. Az ilyen öntvény jelölése betűjellel egészül ki.

A **harmadik minőségi csoportba** tartozó acélöntvényeket ismétlődő vagy dinamikus igénybevételnek kitett gyártmányokhoz alkalmazzák. Az ebbe a csoportba tartozó öntvények **ütőmunkáját** is garantálják 20 C° hőmérsékleten. Ezen acélöntvények jelölése további betűjellel bővül.

Az acélöntvények anyagjele az adott acéljele, de a kezdőjel mindig **G**, pl. **GE280N**, **GE350N**, ahol a **G** az öntészeti felhasználásra, **E** gépgyártási célra utal, számok a garantált minimális folyáshatárt fejezik ki N/mm<sup>2</sup>-ben, **N** a normalizált állapotra utal.

### 6.3.2. Gyengén ötvözött acélöntvény

Az ötvözött acélöntvényeket akkor alkalmazzuk, amikor a nagyobb falvastagsághoz jobb mechanikai vagy különleges tulajdonságokat (pl. kopásállóságot) követelünk meg.

Ilyenek, pl. **G20Mn6; G30MnSi5; G40CrV5.**

Nagy szilárdságot és kopásállóságot igénylő, változó, ütésszerű igénybevételnek kitett alkatrészeket **G35MnCrSi5; G40Cr4; G40Cr5** acélöntvényekből készítik.

### 6.3.3. Közepesen és erősen ötvözött acélöntvények

#### *Korrózióálló acélöntvények*

Felhasználásuk hasonló a korrózióálló acélokhoz. A vegyiparban, a textil-, élelmiszer- és festékiparban, tejüzemekben, gyógyszeriparban stb. előforduló alkatrészeket készítenek belőlük, ahol az alkatrészeknek a légköri hatásokkal, víz, lúgok, és savak által okozott korrózióval szemben kell ellenállónak lenniük. Ebbe a csoportba a legalább 12 % *Cr* tartalmú ferrites, illetve ausztenites acélöntvények tartoznak (bővebb ismertetést a könyv *korrózióálló acélok*kal foglalkozó része tartalmaz).

Ilyen acélok, pl. **GX15Cr13; GX8CrNiTi19-10; GX15CrNiMoTi18-10.**

#### **Hőálló acélöntvények**

Ebbe a csoportba a *Cr*-mal és *Ni*-lél ötvözött, ferrites, perlites és ausztenites szövetszerkezetű acélöntvények tartoznak. Az acélöntvényeket addig a hőmérsékletig nevezzük hőállóknak, ameddig az oxidációs (reverképződési) sebesség az adott közegben 1,0 g/m<sup>2</sup>h értéknél kisebb (bővebb ismertetést a *Hőálló acélok* c. alfejezete tartalmaz).

Ilyen acélok, pl. **GX22CrSi7; GX30CrSi17; GX40CrNiSi25-20.**

#### **Melegszilárd acélöntvények**

Olyan alkatrészekhez, amelyek túlnyomórészt **300-550 °C** közötti hőmérsékleten üzemelnek, melegszilárd acélöntvények alkalmazhatók. Gőzkazánok, gőzturbinák, készülékek és egyéb csövezetékek acélöntvényből készült alkatrészeihez használják.

A melegszilárd acélöntvények anyaga, pl. **G10CrMo9-10; GX10CrMoVNb9-1.**

### **Hidegszívós acélöntvény**

Ebbe a csoportba a **-20** és **-100 °C** között üzemelő berendezések acélöntvényei tartoznak, pl. **G20Mn5**; **G10Ni14**; **G10Ni20**.

A G20Mn5 jelű acélöntvény garantált ütőmunkája **-45 °C**-on 27 J a G10Ni14 minőségű acélöntvényé **-80 °C**-on 27 J és a G10Ni20 jelű acélöntvény garantált ütőmunka értéke **-105 °C**-on 27 J.

### **Nagy mangántartalmú acélöntvények**

A nagy mangántartalmú acélöntvények ütéssel és nagy felületi nyomással párosuló, erős koptatásnak kitett alkatrészekhez használatosak.

Törőpofák, őrlőmalmok béléseinek és lánctalpas gépek (pl. traktorok, földmunkagépek stb.) lánctalpainak, láncgörgőinek anyaga.

Jelölésük, pl. **GMn12**; **GMn10**.

## **6.4 Öntöttvasak**

**Öntöttvasnak nevezük a 3,5-4,5% széntartalmú vas-szén ötvözeteket.**

Ezeknek az olvadáspontja viszonylag alacsony, közel eutektikus összetételű ötvözetek, ezért **kicsi a zsugorodásuk**, jó a formakitöltő képességük. Az öntvények viszonylag kis anyagvesztéssel, olcsón gyárthatók. A vasöntvényeket igen széles körben alkalmazzák a gépészet minden területén. Az öntöttvasak a Fe-C egyensúlyi diagram alapján, kétféle rendszerben kristályosodnak.

A **metstabilis** rendszerben kristályosodott öntöttvasak (vas-vaskarbid állapotára szerint) törete fehér (fémes fényű), mert a hűlés során kiváló szén vegyületet (*cementit* – Fe<sub>3</sub>C) képez a vassal. Ezért ezeket **fehér öntöttvasnak** nevezik. A cementit (vaskarbid) egy rendkívül kemény, rideg szövetelem, ezért maga a fehéröntöttvas is nagyon rideg, kemény, a gyakorlatban nem használják.

A stabilis rendszer (vas-grafit állapotára) szerint kristályosodó öntöttvasak az ún. **szürke öntöttvasak**, mivel töretük szürke a bennük kiváló kristályos szén, a **grafit** miatt. Az ilyen öntvények szilárdsága nem nagy a kivált grafitzárványoknak az ép keresztmetszetet csökkentő, de még inkább a grafitlemezek feszültséggyűjtő hatása miatt. Anyaga viszont ferrites, perlites, mint az acélé, jól meglehet munkálni és kevésbé rideg, mint a fehér öntöttvas. Azt, hogy az öntöttvas stabilisan, grafit kiválással vagy metastabilisan, vaskarbid (cementit) képződésével kristályosodik, a **hűlési sebességen** kívül, főleg a grafitképző ötvöző, a **szilícium** mennyisége határozza meg (lásd Maurer és Greiner-Klingenstein diagramok).

### **6.4.1. Az öntöttvas mechanikai és egyéb tulajdonságai**

Az öntöttvas térfogata a hűlés és kristályosodás közben változik, zsugorodik. A mintakészítésnél az öntöttvas zsugorodásával számolni kell.

A különböző öntöttvasak zsugorodása különböző:

- szürke öntöttvas 0,5 - 1,2 %,
- fehér öntöttvas 1,5 – 2 %; ötvözött öntöttvas 1,2 – 2 %,
- fekete temperöntvény 0 - 1,2 %,
- fehér temperöntvény 0,8 - 2,5 %.

### **Az öntöttvas mechanikai tulajdonságai**

A szürke öntöttvas szövetszerkezete az acél szövetszerkezetétől csak annyiban tér el, hogy a perlit, illetve perlit-ferrit mellett grafitot is tartalmaz. Az öntöttvas szövetszerkezetét grafitlemezekkel „szétszabdalt” acélnak tekinthetjük.

A grafit jelenléte az öntöttvas szilárdsági tulajdonságait jelentősen befolyásolja. A grafit térben elcsavart, össze-vissza görbült, bonyolult alakot vesz fel, ami öntöttvas csiszolaton metszetben, táblás, lemezes formában figyelhető meg. **A grafit nemcsak térfogatával arányos százalékban csökkenti az öntöttvas szilárdságát, hanem a grafitlemezek bemetsző hatására elridegíti az alapszövet szerkezetét.** A grafitlemezek környezetében az átlagos feszültséget 10-20 -szorosán felülmúló *feszültségcsúcsok* keletkeznek. A szürke öntöttvas szívóssága a grafit jelenléte miatt kicsi. A fenti okok miatt **a lemezgrafitos szürke öntöttvas ridegen, lényegében képlékeny alakváltozás nélkül törik.**

A grafit jelenléte azonban több olyan értékes tulajdonságot is biztosít a szürke öntöttvasnak, amelyek szerkezeti anyagként történő felhasználásakor előnyt jelentenek. Ilyen tulajdonságok a következők:

- **A külső bemetszésekkel szembeni kis érzékenység.** A sima és bemetszett próbatestek kifáradási határa közel azonos.
- **Az igen jó rezgéscsillapító képességük.** A szürke öntöttvas egyike a legjobb rezgéscsillapító anyagoknak. A rezgéseket az alapszövetbe ágyazott grafitlemezek csillapítják. Ezért szerszámgép- és műszerállványoknál, motorblokkoknál stb. kiválóan felhasználhatók.
- **A nagy nyomószilárdság.** Nyomó igénybevételnek az öntöttvas jól ellenáll.
- **A jó kopásállóság.** A grafit a csúszófelületeken önkenő és kenőanyag-tároló hatást fejt ki. A kopásállóság szempontjából a perlites szövetszerkezet a legmegfelelőbb. A gyakorlatban bevált súrlódó párok egyik tagja rendszerint öntöttvas. Ennek következtében a szürke öntöttvas igen alkalmas siklócsapágyak, hengerperselyek, féktuskók, dugattyúgyűrűk stb. gyártásához.
- **A szürke öntöttvas forgácsolással jól megmunkálható.**
- **Megfelelő ötvözéssel a szürkeöntvényeknek különleges tulajdonságokat biztosíthatunk.**

A lemezgrafitos vasöntvény (szürkeöntöttvas) szabványos jele, pl. **GJL 100, GJL 200.**

A jelben a **GJ** az öntöttvasra, **L** a lemezgrafitra utal, míg a **szám** a minimális szakítószilárdság értéke N/mm<sup>2</sup>-ben mérve.

Az öntöttvas szilárdságának növelésére több lehetőség van, például az alapszövet perlittartalmának növelése, a szemcsenagyság és a grafit mennyiségének csökkentése, ötvözés, azonban jelentős szívósság növelés csak a grafitlemezek alakjának megváltoztatásával, a lényegesen kisebb bemetsző hatást okozó **gömbgrafit** kialakításával érhető el.

A gömbgrafit a lemezes grafittól eltérően nem egykristály, hanem polikristály, amelyet a csírából több irányban növekedésnek indult kristálynyalábok alkotnak. Az ilyen növekedés a gyors hűtéskor jelentkezik, ami viszont a metastabilis (cementites) átalakulásnak kedvez. A hagyományos összetételű öntöttvasokban ezért csupán a hűlés szabályozásával, a gömbgrafit nem hozható létre. A gömbgrafit kialakulásához az olvadékból kikristályosodó grafit felületi feszültségét kell megnövelni. Ezt a hatást magnéziummal történő ötvözéssel lehet elérni.

Ezért a folyékony öntöttvashoz **Mg**-ot adagolnak, aminek hatására a grafit, gömb vagy ahhoz hasonló alakban kristályosodik. A *Mg*-kezelés után a folyékony öntöttvashoz 0,2 - 0,4 % **FeSi**-ot adagolnak. Ahhoz, hogy a grafit gömbalakban kristályosodjon az öntöttvasban a falvastagságtól függően **0,03 - 0,08 % Mg** kell, hogy visszamaradjon. A *Mg*-ot azonban ennél sokkal nagyobb (0,4 - 0,6 %) mennyiségben kell adagolni, mert jelentős része kiég, illetve kéntelenítő hatása miatt, a kénnel salakba kerül.

A kedvező szilárdsági és szívóssági tulajdonságú gömbgrafitos öntöttvasak **3 – 4% szenet és hasonló mennyiségű Si**-ot tartalmaznak.

A gömbgrafitos öntöttvas kopásállósága igen jó, jobb, mint a lemezgrafitos öntvényeké. Rezgéscsillapító képessége azonban kisebb.

Jelentős előnye a gömbgrafitos öntöttvasnak, hogy az igen tagolt, bonyolult keresztmetszetű és térbeli alakzatú öntvények készíthetők belőlük. Kellő darabszám esetén a gömbgrafitos vasöntvény előállítása gazdaságosabb más alakadó technológiánál, pl. forgácsolásnál, kovácsolásnál. A gömbgrafitos öntöttvasokat legnagyobb mennyiségben a jármű- és az olajipar alkalmazza motorblokkok, főtengelyek, csapágyak, perselyek és nagyméretű szerelvények (pl. szelepházak) gyártásához.

A gömbgrafitos vasöntvény szabványos jele, pl. **GJS 400-18; GJS 500-7; GJS 900-2**.

A jelben a **GJ** az öntöttvasra, **S** a gömbgrafitra utal, míg az *első szám* a minimális **szakítószilárdság** értéke N/mm<sup>2</sup>-ben mérve, a *második szám* a **szakadási nyúlás** százalékban kifejezve.

#### **6.4.2. Kéregvasöntvények**

Mint már szó volt róla a fehéröntöttvas nem használható fel. Ha azonban a szürkeöntvény készítésekor, pl. a homokfoforma valamely részébe fémbetétet tesznek, akkor ugyan szürkeöntvény keletkezik, de a fémbetéttel érintkező felület gyorsabban hűl, ezért a felületi réteg fehéröntvény típusú

(cementites, ledeburitos) lesz. Tehát a szürkeöntvény felületén kemény, kopásálló réteg alakul ki.

Ezeket az öntvényeket, amelyeknek felülete cementites, ledeburitos szerkezetű, a belseje pedig szürketöretű, **kéregöntvényeknek nevezik**. Kéregöntvényből készítik, pl. a vasúti vagonkerekeket, a hengerművi-, gumi-, műanyag- és malomipari hengereket, a törőpofákat, az aprítógépek alkatrészeit stb. Az ilyen kemény öntöttvasak csak köszörüléssel munkálthatók meg.

#### **6.4.2. Különleges vasöntvények**

A különleges öntöttvasak közé tartoznak az **ötvözött hőálló**, a **korrózióálló** és a **kopásálló öntvények**.

##### *6.4.3.1. Hőálló vasöntvények*

A közönséges szürke öntöttvasak 400 °C-nál nagyobb hőmérsékleten könnyen revésednek, a felületükön keletkező oxid leválik, az öntvény tönkremegy. Az öntöttvasak revésedéssel szembeni ellenállása *Al*, *Si*, *Cr* ötvözéssel fokozható.

##### *6.2.3.2. Ausztenites (korrózióálló) öntöttvas*

Az ausztenites **Ni-Cr-Si** és **Ni-Cr** ötvözésű öntöttvasak jól ellenállnak a korróziónak.

Lehetnek lemezgrafitos öntöttvasak és gömbgrafitos öntöttvasak.

##### *6.4.3.3. Ötvözött, kopásálló öntöttvas*

Ebbe a csoportba tartoznak a súrlódva, illetve ütvekoptató igénybevételnek ellenálló ötvözött öntöttvasak. Az öntvényeket az előírt szilárdsági követelmények elérése érdekében általában hőkezelní kell.

A kopásálló vasöntvények általában megmunkálatlan (öntött) állapotukban kerülnek felhasználásra.

A C tartalom növekedésével a kopásállóság fokozódik, ugyanakkor az ütészállóság csökken.

#### 6.4.4. Temperöntvények

A fehér öntöttvasat szándékosan nem állítják elő, mert túl rideg, kemény. A kisméretű, kis tömegű öntött alkatrészek esetében, azonban nehéz megfelelően kis hűtési sebességet elérni, így ezek fehéröntvényként szilárdulnak meg. Ebben az állapotukban ezek nem lennének felhasználhatók, megmunkálhatók, de a kész öntvény utólagos hőkezelésével, **temperálásával** a cementit elbontható, az öntvény grafitossá alakítható.

A cementit bomlása során az ausztenitben már oldhatatlan mennyiségű szén apró „*grafit szemcséket*” ún. temperszén-csomókat hoz létre.

A temperszenet és ferritet, perlitet tartalmazó öntvény töretének színe sötét a grafitzárványok miatt, ezért ezeket, az öntöttvasakat **fekete temperöntvénynek** nevezik.

**A temperálás során a cementit bomlását általában 940-960 °C-on, 10-20 órás hőntartással érik el.**

Amennyiben nem *semleges atmoszférában* történik a temperálás, hanem **oxidáló közegben, 980-1050 °C-on**, úgy a cementit bomlásából keletkező grafit nemcsak kiválik az ötvözetben, de a felületi rétegben (bizonyos mélységig) ki is ég. Ekkor az öntvény töretét a grafitzárványok nem teszik sötétté, hanem fémes fényű marad. Ezért az ilyen öntvényt **fehér temperöntvénynek** nevezik.

A fehér temperöntvény szövete az öntvény falvastagságától függően a következő lehet:

- *vékony öntvényfal* esetén **ferrites**,
- *vastag öntvényfal* esetén a felületi rétegben *ferrit*, a közbenső rétegben **perlit + ferrit + temperszén**, a magrészben *perlit* (+*ferrit*) + *temperszén* lehet.

A fekete temperöntvény szabványos jelölése, pl. **GJMB 350-10; GJMB 550-4; GJMB 800-1.**

A fehér temperöntvény szabványos jelölése, pl. **GJMW 360-12; GJMW 400-5; GJMW 550-4.**

A jelben a **GJ** az öntöttvasra **M** a temperálásra utal, **B** fekete, **W** fehér temperöntvényt, az **első szám** a minimális szakítószilárdság értéke N/mm<sup>2</sup>-ben mérve, a **második** a szakadási nyúlás százalékban kifejezve.



# 7. Nemfémes szerkezeti anyagok

Az eszközkészítés a nemfémes anyagok felhasználásával kezdődött (kővel, fával, bőrrrel, növényi rostokkal), majd a fémek használata hozott minőségi változást az anyagfelhasználás, valamint a történelmi fejlődés területén. A fémek kiterjedt használata napjainkra is érvényes, de a nemfémes anyagok jelentősége egyre nő. A hagyományos, ősidők óta használt anyagok mellett (kő, égetett agyag, fa stb.) olyan, korunkra jellemző, korszerű nemfémes szerkezeti anyagok használata ölt mind nagyobb méreteket, mint a műanyag, a kerámia. Ezek alapvető ismerete nélkül az eszközök, gépek előállítása, használata, javítása elképzelhetetlen.

## 7.1 Műanyagok (polimerek)

A „**műanyag**” elnevezés is mutatja, hogy nem a természetben is megtalálható, hanem mesterségesen előállított anyagról van szó. A műanyag mibenlétét jellemzőivel lehet összefoglalni. A műanyag:

- óriásmolekulákból álló,
- természetes vagy mesterséges alapanyagból,
- mesterségesen, vegyi úton előállított,
- szerves anyag.

A műanyagot **óriásmolekulák** alkotják. Ez azt jelenti, hogy egy molekula akár százezer atomból is állhat. Óriásmolekulák a természetben is vannak (pl. a cellulóz, a kaucsuk, a selyemszál, a szaru stb. anyaga). A mesterséges óriásmolekulákat sok, kis molekula összekapcsolásával állítják elő. Ezeket, a kis molekulákat **monomereknek** nevezik. Ha sok monomert mesterségesen, vegyi úton összekapcsolnak, **polimer** jön létre (**poly-** előtag jelentése sok).

Az alapanyag, a monomer lehet **természetes anyag**, mint a cellulóz, fehérje, kaucsuk, növényolaj, lehet **mesterséges anyag**, mint pl. kőolajszármazékok.

A műanyagok a vegyipar termékei, tehát **mesterséges úton** állítják elő az óriásmolekulákat polimerizációval, polikondenzációval, poliadiciós eljárással.

A műanyagok **szerves anyagok**, szerves monomerekből állnak, amelyeket élő szervezetek termékei, mint a fa-, gyapot-, selyem-, szőr-, szaru anyaga, de lehetnek mesterségesen előállított anyagok is, mint a különféle kőolaj származékok.

A szintetikus anyagféleségek előállítására irányuló kutatások igazán, az 1920-as évekkel kezdődtek. Egyre több új műanyagféleséget hoztak létre, illetve megkezdtek a már előállított anyagok tökéletesítését. Az új anyagok felhasználására újabb és újabb felhasználási területek adódtak. Később a gazdasági válság idején, háborús viszonyok között, egy sor alapanyag a szállítási nehézségek miatt, nehezen hozzáférhetővé vált (pl. a latex, a gumi alapanyaga).

A műanyag kezdetben, mint „pótanyag” szerepelt a szerkezeti anyagok között (pl. a természetes gumit pótolta a szigetelőanyag-, a gumiabroncsgyártásban), ma viszont sok területen nélkülözhetetlen konstrukciós anyag lett.

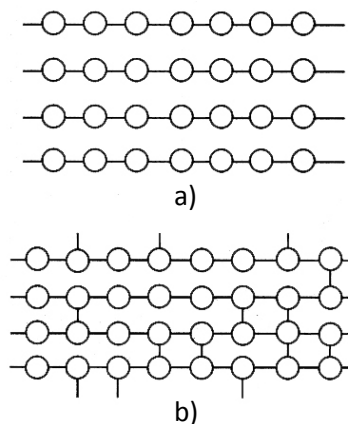
Le kell szögezni, hogy ma már „**a műanyagok nem pótanyagok**”, hanem teljes értékű szerkezeti anyagok. Számos műszaki problémát helyesen vagy optimálisan csak műanyag felhasználásával lehet megoldani.

A korszerű műanyagipar nem egészen száz éves múltra tekint vissza, de főleg az utolsó három évtizedben a fejlődés óriási lendületet vett. A műanyagokkal együtt azok feldolgozási technológiája is egyre fejlődött.

### 7.1.1. A műanyagok molekuláris szerkezete

A műanyag óriásmolekulái (**makromolekulái**), a monomerek kémiai úton történő összekapcsolódása révén jönnek létre. Ezek mintegy láncot képeznek (7.1. ábra). Szerkezetüket tekintve kétfélek lehetnek:

- állhatnak láncmolekulákból,
- lehetnek térhálós szerkezetűek.



7.1. ábra A műanyag molekuláris szerkezete  
a) láncmolekula szerkezet; b) térhálós molekulaszerkezet

Ha a monomerek összekapcsolódása sorban, láncszerűen történik, ún. **láncmolekulák** jönnek létre. Ilyenkor a kis molekulákat erős vegyi kötés kapcsolja egymáshoz, viszont a láncokat csak gyenge **vonzóerő**, ún. van **der Waals erők** tartják össze. A részecskék hőmozgása a kémiai kötések nem, de a láncok közötti gyengébb vonzóerőt le tudják győzni. Ilyenkor a műanyag a hőmérséklet emelkedésével kezd meglágyulni, megolvad. Az ilyen szerkezetű műanyagot **hőre lágyuló műanyag**nak (*termoplastnak*) nevezik.

Ha a műanyagot képező láncmolekulák egymáshoz is vegyi kötéssel kapcsolódnak, a tér minden irányában, akkor ún. **térhálós szerkezet** alakul ki. Ez azt eredményezi, hogy a molekulát hőmozgása ezt az erős kötést nem képes legyőzni, a molekulák egymáson nem tudnak elmozdulni, vagyis a műanyag nem lágyul, nem olvad meg. Ha tovább emelkedik a hőmérséklet, akkor a vegyi kötések is elszakadhatnak, de akkor nemcsak a láncok közötti, hanem egyúttal az egyenértékű, a láncon belüli kötések is tönkremennek, az óriásmolekula degradálódik, maga műanyag tönkremegy. Ezeket a térhálós szerkezetű műanyagokat **hőre nemlágyuló** (*duroplaszt*) műanyagoknak nevezik. Nevezik hőre keményedő műanyagoknak is, bár az előbbi elnevezés jobban kifejezi a folyamat lényegét.

Az előbbiekből látszik, hogy a műanyag szerkezetének alapvető befolyása van az anyag tulajdonságára, hővel szembeni viselkedésére.

## 7.1.2. Műanyagok csoportosítása

Ahhoz, hogy az egyre növekvő számú műanyagféleségek között kiismerjük magunkat, átlássuk széles skálájukat, célszerű csoportosítást végezni.

A csoportosításnak többféle szempontja is lehet. Ezek közül a legfontosabbak:

1. a hővel szembeni viselkedés,
2. a műanyag szerkezete,
3. az alapanyag eredete,
4. az óriásmolekulák előállítási módja szerint.

### 7.1.2.1. Műanyagok csoportosítása hővel szembeni viselkedés alapján

A hővel szembeni viselkedés szerint a műanyagokat a **hőre lágyuló** és a **hőre nem lágyuló** anyagok csoportjába soroljuk.

Az anyag hővel szembeni viselkedése, mint előbb láttuk, szerkezetével áll szoros kapcsolatban. A **hőre lágyuló** (termoplaszt) műanyagok láncmolekulákból épülnek fel, a **hőre nem lágyuló** (duroplaszt) műanyagok térhálós szerkezetűek. A térhálósítás **vissza nem fordítható** (*irreverzibilis*) folyamat.

### A műanyagok szerkezete

A polimerek szerkezetének alapvető hatása van a műanyagok tulajdonságaira, így azok viselkedésére, felhasználhatóságára. A makromolekula alakja, nagysága, elhelyezkedése befolyással van többek között:

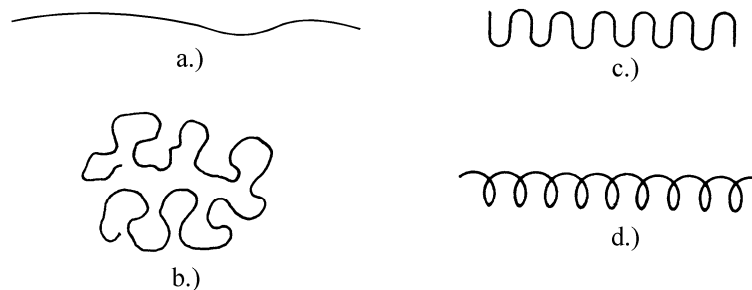
- hővel szembeni viselkedésre,
- a sűrűsége,
- a mechanikus tulajdonságokra, szilárdságra,
- vegyi és elektromos tulajdonságokra,
- duzzadási és oldódási tulajdonságokra.

A lánc, illetve a térhálós szerkezet jelenti a műanyag **elsődleges szerkezetét**. Az elsődleges szerkezetnek a hatására, a hővel szembeni viselkedésre, már utaltunk.

Attól függően, hogy a láncok milyen alakúak, a műanyagok szerkezetük szerint tovább tipizálhatók (7.2. ábra). A molekulalánc lehet:

- nyújtott láncmolekula (pl. cellulóz),
- gombolyag molekula (pl. polisztirol),
- hajtogatott láncmolekula (pl. kaucsuk),
- spirál molekula (pl. izotaktikus polipropilén).

Ezt nevezzük a műanyag **másodlagos szerkezetének**.

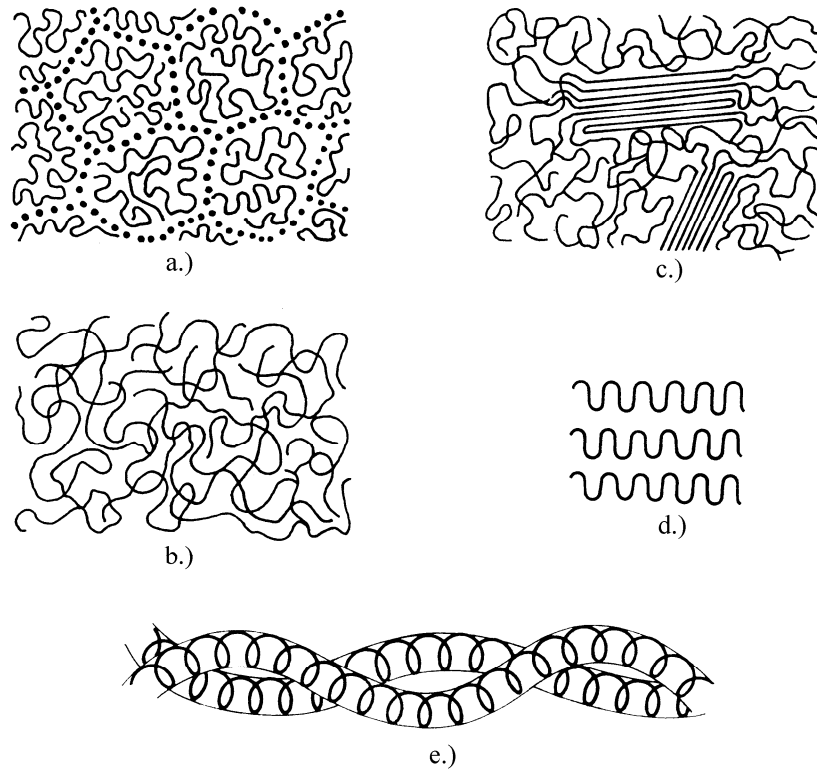


7.2. ábra Másodlagos szerkezetek  
a) nyújtott; b) gombolyag; c) hajtogatott; d) spirál lánc

Attól függően, hogy a különféle alakú makromolekulák egymáshoz képest hogyan helyezkednek el, beszélünk a **harmadlagos szerkezetről** (7.3. ábra). Ezek fajtái a következők:

- a) gombolyag-sejt szerkezet (cella),
- b) filc-szerkezet (tisztán amorf),
- c) rostos micellák és amorf részek (kristályos-amorf szerkezet),
- d) polimer kristály hajtogatott láncokból,
- e) szuperspirál szerkezet.

A **kristályos műanyag** szerkezet nem azonos a kristályos fémszerkezettel. A kristályos műanyag szerkezeten azt értjük, hogy a láncokat alkotó monomerek egymáshoz képest is szabályos ismétlődéssel helyezkednek el. Ez a szabályosan ismétlődő elemi cella általában sokkal bonyolultabb, mint a fémek elemi cellái.



7.3. ábra Harmadlagos szerkezetek  
 a) cella; b) filc; c) részben kristályos; d) kristályos lánc; e) szuperhélix szerkezet

### 7.1.2.2 *Műanyagok eredet szerinti csoportosítása*

Eredet szerint megkülönböztetünk **természetes** alapú és **mesterséges** alapú műanyagokat.

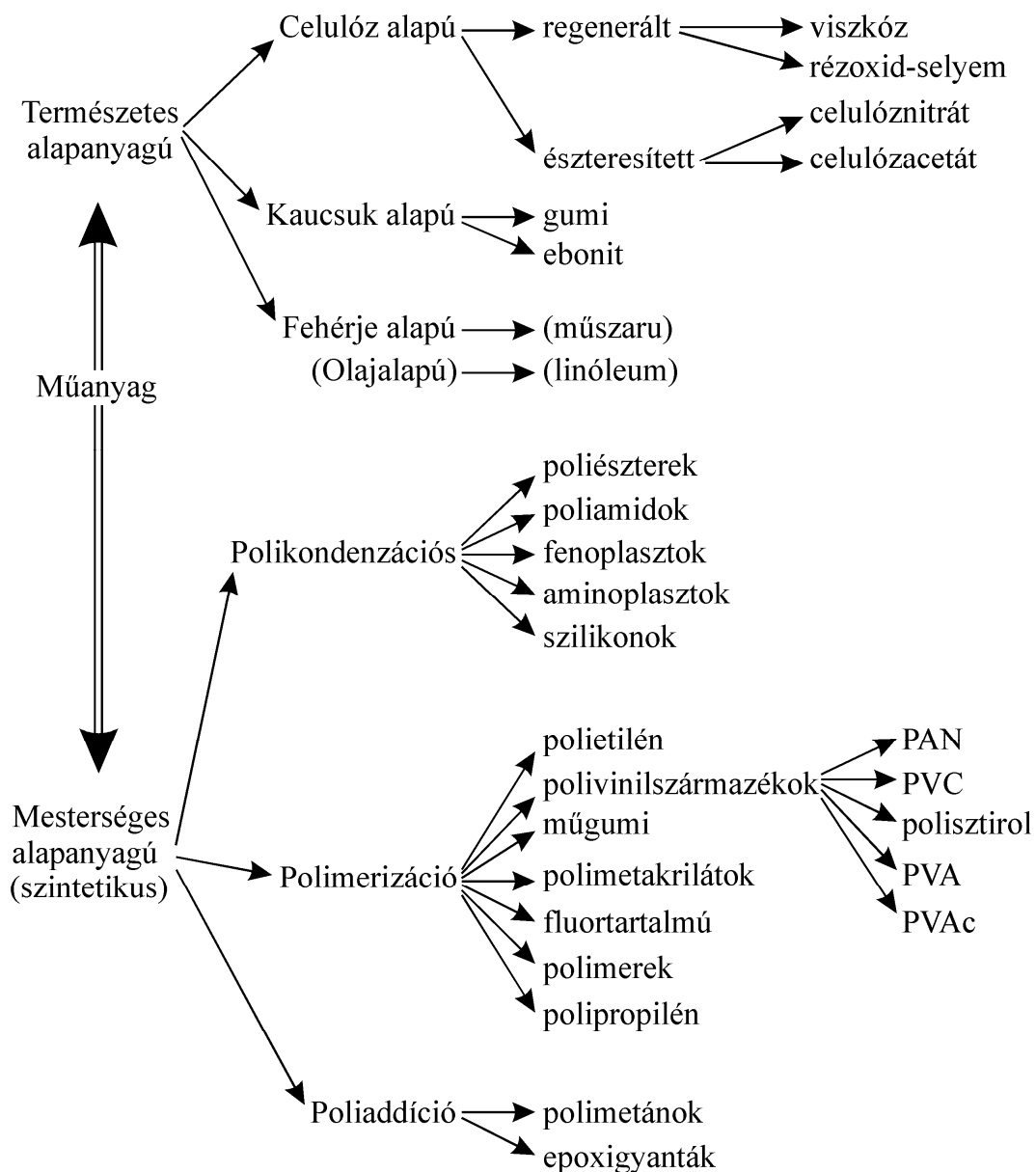
**Természetes alapú műanyagok** azok, amelyeket a természetben található makromolekulákból (pl. cellulózból, fehérjéből, a tej kazein tartalmából, kaucsukból, növényi olajból stb.) állítanak elő.

A **szintetikus alapú műanyagok** azok, amelyeknél a monomereket is szintetikus úton állítják elő (pl. kőolajból). (7.4. ábra)

### 7.1.2.3 *Műanyag csoportosítása a makromolekulák előállításának módja szerint*

A műanyaggyártás lényege, hogy kis molekulákat (monomereket) óriásmolekulákká (polimerré) kapcsolnak össze. A molekulák összekapcsolásának három módja van:

1. polimerizáció,
2. polikondenzáció,
3. poliaddíció.



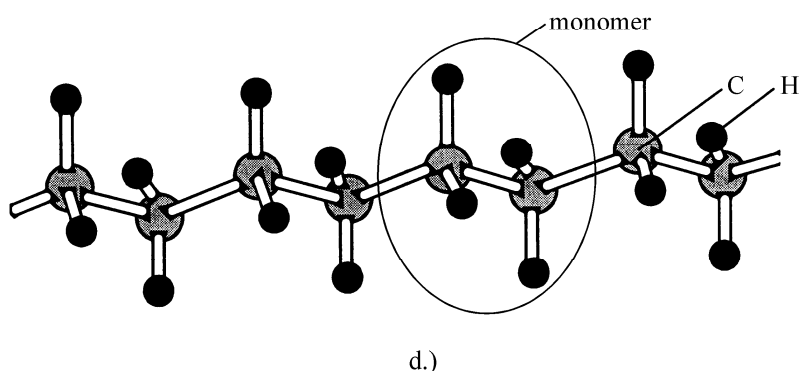
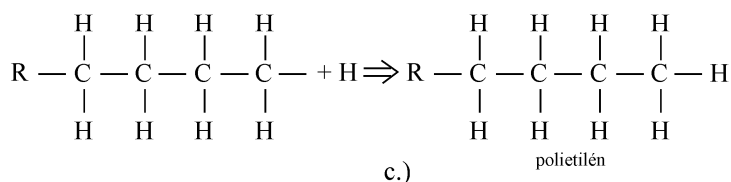
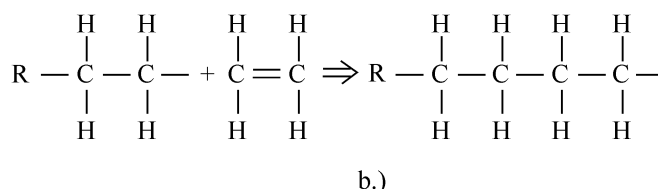
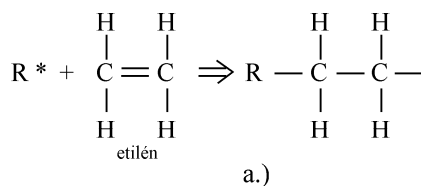
7.4. ábra A műanyagok eredet szerinti csoportosítása

A **polimerizáció** lényegét részletesebben is bemutatjuk a polietilén példáján (7.5. ábra). Kiinduló anyag az etilén, aminek a képlete  $C_2H_4$ .

Szerkezeti képlete alapján látható, hogy a szénatomok kettőskötéssel kapcsolódnak egymáshoz.

Ha a kettőskötést felnyitják, akkor a molekula egy szabad vegyértékkel rendelkezik, amellyel egy ilyen másik monomerhez kapcsolódhat, és így tovább. Ezen a módon egy láncmolekula jön létre, amelyet egy bizonyos

atomszám után le kell zárni. Így lesz az etilénből **polietilén**. A folyamatot **polimerizációnak** nevezik.



7.5 ábra Az etilén polimerizációs fázisai és a polimer láncszerkezete  
a) kezdő reakció; b) növekedési reakció; c) megszakító reakció; d) polimer láncszerkezete

Van más, bonyolultabb kapcsolódási mód is. **Polikondenzációs** folyamat során a kapcsolódó, különböző monomerekről atomok válnak le (pl. oxigén és hidrogén atom), és ezeken a szabad (7.6. ábra) helyeken kapcsolódnak a monomerek (. A levált atomokból, pl. víz keletkezik, mint kondenzációs termék. Mind a két kapcsolódási mód esetén a szénatomok képeznek láncot. Polikondenzációval állítják elő az ismertebb műanyagok közül a fenoplasztokat, az aminoplasztokat, poliésztereket, poliamidokat.



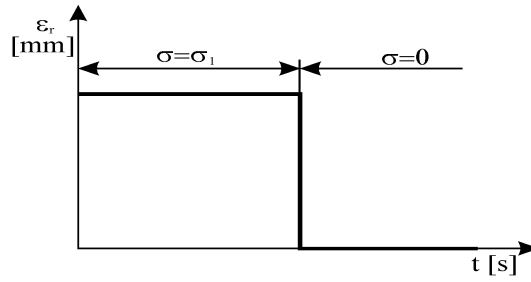
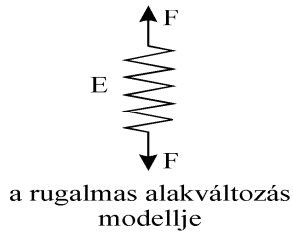


eltérnek a fémek anyagokétól. A következőkben röviden áttekintjük a felhasználás szempontjából legjellemzőbb sajátosságokat.

- **Kis sűrűség** jellemzi a műanyagokat. Értéke csupán 1/4-e, sőt 1/7 része a fémek sűrűségének. Nagyságát a műanyag fajtája, valamint az esetleg felhasznált társítóanyag határozza meg. A sűrűség a gépek, szerkezetek, eszközök tömege, valamint forgó alkatrészeknél az ébredő tömegerők szempontjából nagyjelentőségű. A kis súly különösen járműszerkezeteknél, szállítóberendezéseknél, egyéni védőeszközöknél, csomagolástechnikai anyagok felhasználása területén nagy jelentőséggel bír, de minden felhasználási területen előnyös.
- **Szakítószilárdságuk** a fémekéhez képest, általában jóval kisebb. Ha azonban figyelembe vesszük kis sűrűségüket is, vagyis a „szakítóhosszúságnak” is nevezett szilárdság és sűrűség arányt ( $R_m/\rho$ ), akkor ennek értéke még jobb is az acélokénál.
- **Kúszási hajlam** jellemző tulajdonsága a műanyagoknak, ami azt jelenti, hogy állandó, tartós terhelés hatására, deformációjuk az idő függvényében, már szobahőmérsékleten is, jelentősen és folyamatosan növekszik. A kúszási hajlam miatt a műanyag alkatrészeket nem szilárdságra, hanem megengedhető maximális alakváltozásra kell méretezni. Ezért a megengedett terhelés értéke jóval alatta van a szerkezet teherbírásának.
- **Feszültségrelaxáció**, más szóval *elernyedés* szintén jellemzi a műanyagokat. Ez azt jelenti, hogy a terhelés hatására létrejött feszültség az anyagban, idővel csökken, anélkül, hogy a megnyúlás változna. Ezért nem készíteneek csavarkötést műanyagból. Ezt a tulajdonságot is figyelembe kell venni anyagválasztásnál. Egyébként ez a tulajdonság nem mindig hátrányos. Ha például műanyagba fémet ágyaznak, akkor a különböző hőtágulás hatására, benne nagy feszültségek ébrednek, aminek a következtében a műanyag megrepedhetne. A relaxáció következtében viszont a feszültségcsúcsok oldódnak, és így a repedésveszély csökken.
- Az ún. **viszko-elasztikus** tulajdonság, más néven késleltetett nyúlás fontos mechanikai sajátossága a műanyagoknak. A fémek anyagvizsgálatánál szó volt róla, hogy rugalmassági határ feletti terheléseknél a fellépő alakváltozás részben rugalmas, résyben maradó alakváltozás. Ez a műanyagoknál is így van, azzal a kiegészítéssel, hogy itt fellép az alakváltozásnak egy harmadik fajtája, a **késleltetett (viszko-elasztikus) alakváltozás** (7.8. ábra). Ez azt jelenti, hogy a rugalmas alakváltozást követően, időben elnyújtva tovább nyúlik a műanyag. A terhelés megszüntetése után ugyan visszaalakul a

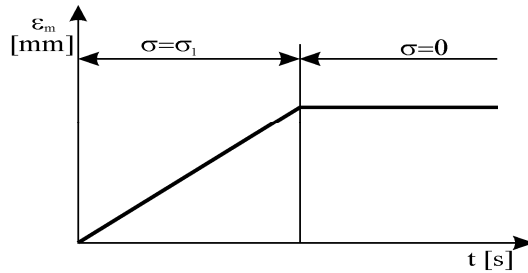
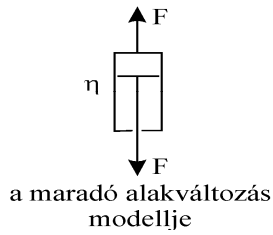
deformáció, de nem egyszerre, hanem bizonyos idő alatt. Természetesen itt is felléphet, egy terhelési szint felett, a maradó alakváltozás is.

- **Rugalmassági tényezője** a műanyagoknak, csupán tizede, sőt százada az acélok rugalmassági tényezőjének. Ez viszonylag nagy deformációs képességet kölcsönöz az anyagnak. Bizonyos esetekben ez előnyös lehet, pl. megkönnyítheti a szerelést kisebb méretpontatlanság esetén (pl. csővezetékeknél, csapágyaknál stb.). Hátrányos tulajdonság ez olyan szerkezeteknél, amelyeknek merevnek kell lenni (pl. tartóknál, elválasztó lemezeknél). A merevséget, pl. szendvicsszerkezet kialakításával javítani lehet.
- **Rezgéscsillapító hatás** a műanyagok kedvező sajátossága, amelyet számos műszaki területen felhasználnak (alátétek, ütközők, gumirugók, gumiabroncsok stb. esetén).
- **Elektromos szigetelő** képesség nagyon jellemző tulajdonsága a műanyagoknak. Egyes műanyagféleségek létrejöttében nagy szerepe volt éppen az elektromos ipar igényeinek.

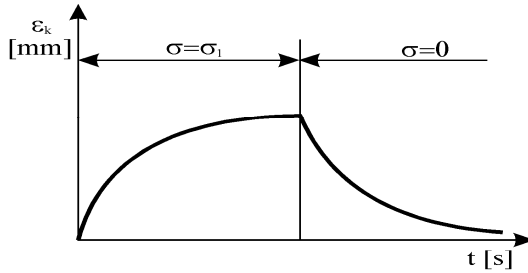
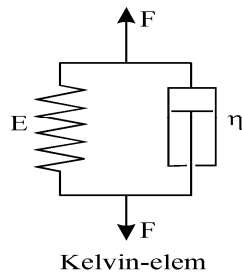


A pillanatnyi rugalmas nyúlás ( $\epsilon_r$ ) alakulása a terhelés, illetve a tehermentesítés során ( $E$  rugóalmassági modulus)

a.)

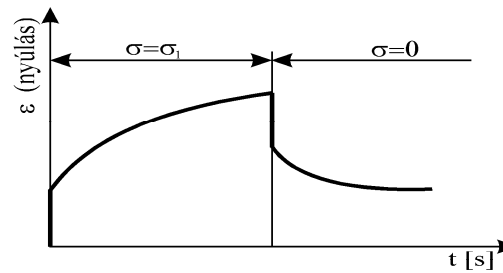
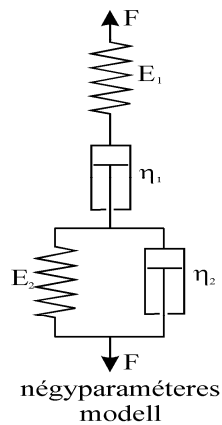


A maradó nyúlás ( $\epsilon_m$ ) alakulása a terhelés, illetve a tehermentesítés során ( $\eta$  viszkozitás)



A késleltetett rugalmas nyúlás ( $\epsilon_k$ ) alakulása a terhelés, illetve a tehermentesítés során

c.)



A különféle deformációk alakulása a terhelés, illetve a tehermentesítés során

d.)

7.8. ábra Nagymolekulájú polimerek feszültség-alakváltozás mechanizmusa

- **Statikus feltöltődésre** való hajlam jellemző, a szigetelőképességükkel összefüggő tulajdonság, mivel a felületükön felhalmozódó töltések nem tudnak elvezetődni. Feltöltődésük a megmunkálás, tárolás, felhasználás során egyaránt bekövetkezhet, és zavarokat okozhat. Egyrészt a feltöltődött anyag a felületéhez vonzza a port, ezért nehezen lehet tisztítani, másrészt a feltöltődést kisülés követheti, ami bizonyos körülmények között robbanás forrása lehet. Az elektrosztatikus feltöltődés csökkentésének, illetve elkerülésének (antisztatikussá tételének) több módja is van:
  - a levegő nedvességtartalmának növelése,
  - a levegő ionizálása,
  - a műanyag vezetőképességének növelése (pl. grafit adalékolással).
- **Hőszigetelő képessége** a műanyagoknak igen jó. *Habosítással* ez a tulajdonság tovább fokozható. Szigetelő anyagoknál a hőszigetelő képesség rendkívül kedvező tulajdonság, de súrlódó alkatrészeknél, pl. műanyag csapágyaknál hátrányos, mert túlmelegedéshez vezethet. **Hangszigetelő képességük** hasonlóan kiváló.

**Hőtágulási tényezőjük** nagyságrenddel nagyobb, mint a fémeké. Ez együttes alkalmazásukat gyakran megnehezíti, valamint megnehezíti a melegmegmunkálásoknál az előírt méretpontosság betartását.

- **Hővel szembeni érzékenység**, illetve a csekély hőállóság nagy hátránya a műanyagoknak. Magasabb hőmérséklet hatására a mechanikai tulajdonságaik jelentősen romlanak és már egy viszonylag alacsony hőmérsékleti határ felett, használhatatlanná válhatnak. Általános szabályként elfogadható, hogy a hőre lágyuló műanyagok 100 °C-ig, a hőre nem lágyuló műanyagok 200 °C-ig vehetők igénybe. A speciális műanyagok legfeljebb 300 °C-ig. Ezek csupán jól megjegyezhető átlagértékek és mind a három csoportban vannak ettől eltérő értékek mind lefelé, mind felfelé, műanyagfajtától függően.
- **Nedvességfelvétel képessége** a műanyagok sajátossága, a fémektől eltérő jellemzője a műanyagoknak. A polimerek nagy része higroszkópos tulajdonságú. A nedvességfelvételt elősegítik az ún. *hidrofil csoportok* (-OH, -COOH, -NH<sub>2</sub>). Ezek egyrészt közvetlenül, másrészt közvetve lekötik a vízmolekulákat. A vízmolekulák az amorf részek hézagaiba is képesek beépülni. A nedvességfelvételt a hőmérséklet is befolyásolja, általában a hőmérséklet növekedésével csökken. Sok esetben figyelembe kell venni, hogy a nedvességfelvétel során az anyag *duzzad*. Csapágyaknál részben előnyös tulajdonság, hogy a műanyag képes kenőanyagot magában tárolni (önkenő), de hátrányos tulajdonság, amit számításba kell venni, hogy ennek hatására

duzzad.

- **Vegyszerállóság** és **korrózióállóság** előnyös tulajdonsága a műanyagoknak. Nincs szükség felületvédelemre, sőt a műanyag képezhet fémek felületén korrózióálló bevonatot.
- **Öregedési hajlam** hátrányos tulajdonsága a műanyagoknak. Az öregedés a környezeti körülmények között végbemenő, olyan fizikai és kémiai változások összessége, amelyek következtében az anyag rideggé, törékennyé válik, tönkremegy. Az öregedés során a molekulák elszakadnak, tönkremennek, leépülnek (degradálódnak). A folyamat létrejöttében több tényezőnek van szerepe, pl. a nap UV sugarainak, hőnek, oxigénnek, valamint biológiai tényezőknek. Biológiai tényezők például a penészgombák, mikroorganizmusok termelte anyagok, természetes, rágcsálók kártételei.

#### 7.1.4 Műanyagok tulajdonságainak megváltoztatása

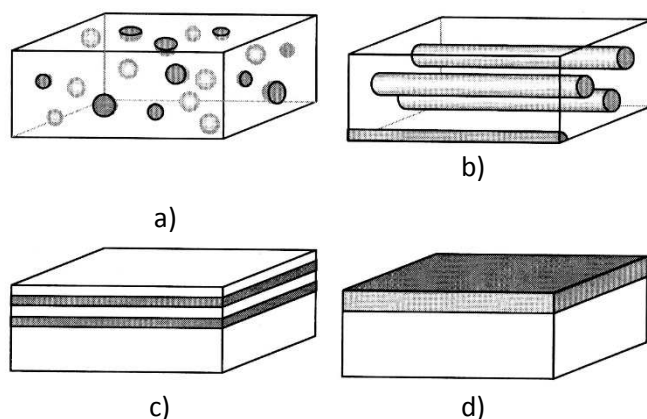
A műanyagok tulajdonságai viszonylag tág határok között változtathatók. Például a PVC lehet kemény, csövek, lemezek előállítására alkalmas. Lággyá tehető, és így pl. padozatok borítására használható, sőt lehet bőrszerű is, mint a műbőrök esetében. Jobb szigetelő képesség érdekében ezek habosíthatók is. A műanyagok lágyítása lehet **külső** vagy **belső** lágyítás.

A **belső lágyításról** akkor beszélünk, ha a gyártás során a makromolekulába más monomert is beépítenek, vagyis ún. **kopolimert** hoznak létre. Például az üvegszerű polisztirol butadiénnel kopolimerizálva szívós anyaggá alakul.

A **külső lágyítás** során a kész műanyaghoz adagolt lágyítószer a makromolekulák közé hatolnak, és azokat eltávolítják egymástól, így gyengítve a másodlagos kötéseket. A kemény PVC-hez adagolva a lágyítószer, kaucsukszerű anyagot nyernek.

**A műanyagok társítása** további lehetőséget biztosít a műanyagok tulajdonságainak megváltoztatására, kedvezőbb szilárdsági és egyéb tulajdonságok biztosítására. Főleg hőre nemlágyuló műanyagokat társítanak olyan anyagokkal, amelyek növelik szilárdságukat, szívósságukat, hőállóságukat, csökkentik alakváltozásukat, kúszásukat, elektromos szigetelő képességüket. Vannak olyan adalékok is, amelyek vezetővé tehetik a műanyagokat.

A társító vázanyagok lehetnek szemcsések, szálal anyagok, szövetek, rétegek vagy bevonatok (7.9. ábra). A társított anyagok, az ún. **kompozitok**, nemcsak műanyagok lehetnek, más szerkezeti anyagoknál is alkalmazzák a társítás módszerét.



7.9. ábra A társító anyagok különböző formái kompozitokban  
a) szemcsés; b) szálás; c) réteges; d) bevonatos

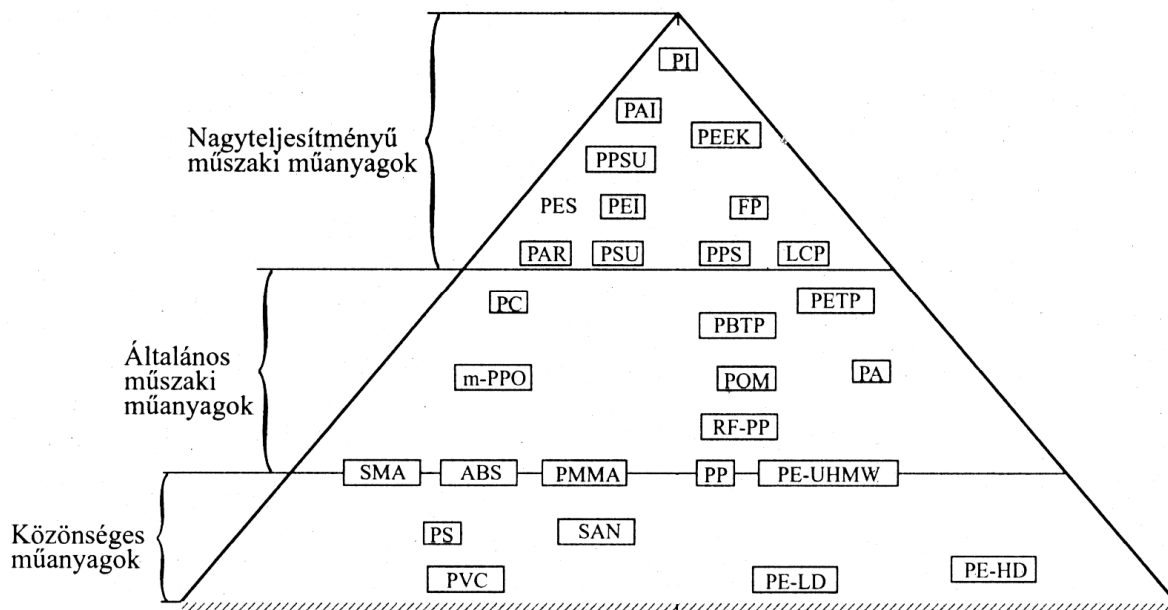
A vázanyagok nagyon sokfélék lehetnek, pl. ilyen a fa, papír, textilszövet, természetes és mesterséges szálás anyagok, üvegszál, szénaszál stb. Például a telítetlen poliészter szakítószilárdsága, ha 60 % üvegselyem vázanyaggal társítják, eléri a 700 - 1000 N/mm<sup>2</sup> szilárdsági értéket. A szervesetlen eredetű vázanyagok a műanyag hőállóságát is növelik.

### 7.1.5 Műanyagok főbb fajtái, típusai

A műanyagoknak nagyon sok fajtáját, típusát gyártják, ezért felhasználásuk igen széles körben lehetséges. Az ipari felhasználásukat tekintve, vannak olyanok, amelyeket **közönséges műanyagokként** szokás emlegetni, és tömegcikkre előállítására alkalmasak, áruk viszonylag alacsony. Ide tartoznak a mindennapi gyakorlatban, a háztartásokban, csomagolótechnikában alkalmazott műanyagok, amelyekkel leggyakrabban találkozhatunk a mindennapi életben (7.10. ábra).

Másik, az előzőnél szűkebb csoportja a műanyagoknak az **általános műszaki műanyagok** csoportja. A műszaki műanyag kifejezés a technikai, gépészeti felhasználhatóságra, tehát a jobb mechanikai-szilárdsági tulajdonságokra, jó kopásállóságra, kúszásállóságra, ütésállóságra, nagyobb kifáradási szilárdságra utal.

A műanyagok harmadik szintjének tekinthetjük az ún. **nagyteljesítményű műszaki műanyagokat (HPM High Performance Materials)**, amelyek speciális sajátosságokkal, nagy hőállósággal, szilárdsággal, igényes műszaki megoldásokhoz szükséges tulajdonságokkal rendelkeznek.



7.10. ábra A műanyagok csoportosítása a műszaki követelmények szerint

### Az anyagpiramis jelei és magyarázatuk

PI	poliimid		
PAI	poliamidimid		
PEEK	poliéter (éterketon)	POM	poliacetálok
PPSU	polifenilénszulfid	RF-PP	erősített polipropilén
PES	poliéterszulfon	SMA	stírol metekrilát
PEI	poliéterimid	ABS	akrilnitril-butadién-sztirol
FP	fluorpolimer (főleg PTFE)		kopolimer
PUR	poliuretán	PMMA	poli(metil-metakrilát)
PSU	poliszulfon	PS	polisztirol
PPS	polifenilszulfid	SAN	sztirol-akril kopolimer
LPC	folyadék-kristályos polimer	PVC	polivinilklorid
PC	polikarbonát	PP	polipropilén
mPPO	módosított poli(fenil-oxid)	PBI	polibenzinidazol
PETP	polietiléntereftalát	PE-UHMW	ultra nagy molekulatömegű
PBTP	poli(butilén-tereftalát)		polietilén
PA	poliamid	PE-LD	kis sűrűségű polietilén
		PE-HD	nagy sűrűségű polietilén

A műanyagokat *por*, *granulátum* vagy *féltermék* (rúd, cső, lemez, tömb) formájában állítják elő. A granulátumból vagy készterméket állítanak elő különböző technológiával (fröccsöntéssel, extrudálással stb.), vagy ún. **féltermékekké** (rúd, cső, tömb stb.) dolgozzák fel, majd további alakadó technológiával, pl. forgácsolással, alakítják gépelemékké, egyéb termékekké.

A műszaki gyakorlatban leggyakrabban előforduló műanyagfajták a hővel szembeni viselkedés szerint a következők.

**Hőre nem lágyuló műanyagok:**

- fenoplasztok,
- aminoplasztok,
- telítetlen poliészterek,
- epoxigyanták,
- szilikongyanták.

**Hőre lágyuló műanyagok fajtái:**

- poliamidok,
- poliuretán,
- poli (vinil-klorid),
- poliolefinok (polietilénnek, poli(izo-butilén), polipropilén)
- polikarbonátok,
- fluoroplasztok,
- normál polisztirol,
- poli(metil-metakrilát)-ok,
- poliformaldehid,
- cellulózészterek,
- szilikonolajok és zsírok.

**7.1.5.1. Hőre nem lágyuló műanyagok**

A **fenoplasztot** fenolok és aldehidek kopolimerizációjával állítják elő. Sötét színű, jellegzetes szagú műanyag. Ez befolyásolja felhasználhatóságának területét. Törékeny, rideg anyag, ezért leginkább társított műanyagként használják.

Így már jó szilárdsági tulajdonságokkal rendelkeznek, vegyszerállósági, hőállósági, elektromos tulajdonságai jók, öregedésálló és viszonylag olcsó. Felhasználják csapágyakhoz, perselyekhez, járművek karosszériaelemeihez, kapcsolókhöz, elektromos szigetelőkhöz, tengelykapcsolókhöz és fékbetétekhez, gyártanak belőle fogaskereket, szendvicselemezeket.

Az **aminoplasztot** aminocsoportot tartalmazó vegyületekből és formaldehidből állítják elő polikondenzációval (karbamid- és melanin gyanták). Tulajdonságai hasonlóak a fenoplasztokéhoz, de világos színű és nincs jellegzetes szaga. Felhasználják, mint faipari ragasztót vagy társított



sajtolóanyagként dolgozzák fel. Gyártanak belőle közszükségleti cikkeket, borítanak vele bútorlapokat. Szigetelő hab is készül belőle, de nedvszívó tulajdonsága miatt polietilén fóliával szigetelni kell.

A **telítetlen poliésztereket** többértékű alkoholoknak, többértékű savakkal történő polikondenzációjával állítják elő. A reakcióterméket polimerizálható monomerben oldják, majd a formázás során katalizátor hozzáadásával térhálósítják (szobahőmérsékleten vagy magasabb hőmérsékleten). A formázás nyomás nélkül is végezhető.

A poliészterek vegyszer- és korrózióállóságukkal, hőállóságukkal, valamint jó elektromos és mechanikai tulajdonságaikkal tűnnek ki. Önmagukban is felhasználásra kerülnek. Szilárdságuk, sűrűségüket is figyelembe véve, rendkívül kedvező. Üvegvázzal erősítve szakítószilárdságuk elérheti, vagy túllépheti az ötvözetlen acélok szilárdságát ( $R_m = 1000-1200 \text{ N/mm}^2$ ). Az üvegvázazás erősítés jóformán valamennyi mechanikai tulajdonságot jelentősen megjavítja.

Üvegszövet vázanyaggal nagyméretű lemezalakító szerszámok, személykocsik karosszériája, csónakok, vitorlások, motoros hajótestek, szállítóberendezések tartozékai, nagyméretű szállító- és tárolótartályok, vasúti- és közúti tartálykocsik készülnek belőle. Egyes poliésztergyanta típusok felületi bevonatok készítésére is alkalmasak. Készítenek telítetlen poliészterkitt anyagot fémek (pl. vasöntvények) felületi hibáinak javítására.

Az üvegszál erősítésű poliészter lemezeket jelentős mennyiségben használja fel az építőipar.

Az **epoxigyanták** (vagy etoxilingyanták) szobahőmérsékleten lehetnek folyékonyak vagy szilárdak. A folyékonyak hidegen, a szilárdak melegen térhálósíthatók, megfelelő edzőanyag hozzáadásával. Térhálósodásuk során melléktermék nem képződik, ezért csak igen csekély mértékű zsugorodás lép fel.

Az epoxigyanták vegyszerállósága, hőállósága, elektromos és mechanikai tulajdonságai műszaki felhasználás szempontjából igen kedvezőek.

Előnyös tulajdonságuk, hogy tapadó képességük fémekhez, fához, porcelánhoz, üveghez, kerámiához, vagyis a legtöbb szerkezeti anyaghoz igen jó.

Rétegelő vagy öntési eljárással lemezalakító szerszámok, homokformázó szerszámok (öntőminták és magszekrények), kisméretű mesterminták, a megmunkáláshoz szükséges rögzítő elemek és készülékek, sablonok, műanyag feldolgozó szerszámok (pl. vákuumformázó szerszámok) készülnek epoxigyantából.

Edzett acélból készült szerszámdarabok beágyazására, egymáshoz erősítésére az epoxigyanta kiválóan alkalmas. Üvegszövettel erősítve szendvicsszerkezetek, hajótestek, autókarosszériák, repülővázak és csövek gyártására alkalmas.

A **szilikongyanták** legértékesebb tulajdonsága a jó hőállóság. Ezek az anyagok 200 °C-ot tartósan, 300 °C-ot rövid ideig kibírnak anélkül, hogy szilárdsági jellemzőik megengedett mérték alá csökkennének. Elektromos tulajdonságaik is kedvezőek.

Feldolgozásuknál figyelembe kell venni, hogy a szilikon típusok legnagyobb részének keményítési ideje elég hosszú. Felhasználásuk különösen a villamosipar területén jelentős.

### **7.1.5.2. Hőre lágyuló műanyagok**

A **poliamidok** csoportjának több tagja van, ezek legfontosabb képviselői a Poliamid 6 (pl. a Danamid), Poliamid 66, Poliamid 7, Poliamid 11 és Poliamid 610.

A poliamidok elsősorban nagy kopásállóságukkal, hajlítoszilárdságukkal és szívósságukkal tűnnek ki. Kopásállóságuk és ún. *karcállóságuk* valamennyi műanyag között a legkedvezőbb.

Súrlódási tényezőjük igen kicsi. Ez a tulajdonság elsősorban a csapágygyártás területén jól hasznosítható. Jellegzetességük, hogy nedvszívó képességük viszonylag nagy, levegőn 2-5% nedvességet vesznek fel, vízbe mártva nedvességtartalmuk elérheti a 10 - 15%-ot is. Ez a tulajdonság önkendő csapágyak készítéséhez teszi alkalmassá őket.

Hőállóságuk 120 °C-ig terjed. Vegyszerállóságuk jó, olajoknak, alifás szénhidrogéneknek, valamint kisebb koncentrációjú lúgoknak jól ellenállnak. Gördülő csapágyak kosárszerkezete, siklócsapágyak és kis erőátvitelre alkalmas fogaskerek készülnek poliamidból. A gépgyártás területén igen széles körben alkalmazzák.

Mechanikai igénybevételnek kitett korrózióálló bevonatok előállítására a poliamidok kiválóan alkalmasak. Kopott gépkatrészek javítására a ráolvasztott poliamid bevonatok alkalmazása sokszor gazdaságosabb, mint a hagyományos javítási technológiák.

A **poliuretán** tulajdonságai közel állnak a poliamidok tulajdonságaihoz, csak nedvszívó képességük jóval kisebb. Kopásállóságuk igen jó. A poliuretán elasztomerek nagy előnye a kaucsukkal szemben, hogy a hőre lágyuló műanyagok valamennyi feldolgozási eljárásával formázhatók. Rugalmassági modulusok 500 és 50 000 N/mm<sup>2</sup> között változtatható. Értékes tulajdonságuk, hogy rugalmassági modulusok 120-130 °C-ig gyakorlatilag nem változik, továbbá hogy maradó alakváltozásuk igen kicsi. (Ennek következtében, pl. a horonygyűrűs karmantyúk, tömítések, spirálrugó nélkül is megtartják rugalmasságukat és hosszú időn át, jól tömítenek.)

Egy érdekes alkalmazási lehetőség, amikor a lemezsajtoló, kivágó szerszám egyik felét (a vágólapot) poliuretánból készült „műanyagpárnával” helyettesítik. A sajtólószerszám nyomására a párna benyomódik a vágóbélyeg éle mentén, és a lemez elnyíródik, illetve felhajlik.

Nagy mennyiségben használják fel habanyagként, kemény és lágy formában. A poliuretán hab kiváló hő- és hangszigetelő, valamint jó rezgéscsillapító. A kemény poliuretán hab  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  és  $+130\text{ }^{\circ}\text{C}$  között, a lágy hab pedig  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  és  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$  hőmérséklet-tartományban használható fel szigetelési célokra.

A **poli (vinil-klorid)**, röviden **PVC**, elektromos tulajdonságai kiválóak. Tisztán feldolgozva kemény, merev anyag, elsősorban csövek és lemezek készülnek belőle. Legnagyobb mennyiségben azonban kopolimerizálva vagy lágyítva dolgozzák fel. Ezek a termékek rugalmasak, szívósak vagy lágyak. Vegyszerállóságuk kiváló, savaknak, lúgoknak jól ellenállnak. Önállóan és bevonatként egyaránt felhasználják.

A lágyított poli(vinil-klorid)-hoz poliamidot keverve olyan, jó kopásállóságú és mechanikai tulajdonságú termékeket kapnak, amely színesfém tömítőanyagok pótlására alkalmas (pl. autoklávok tömítésére). Habosítva hő- és hangszigetelők.

A poli(vinil-klorid) fóliákat elsősorban csomagolásra és borítóanyagként használják. Jelentős a villamos ipari felhasználása is, a kábelszigetelés egyik legfontosabb anyaga.

Műbőrök, padlóburkolatok is nagy választékban készülnek poli(vinil-klorid)-ból, könnyen moshatók és tisztíthatók.

A **poliolefin**ek (kőolajból előállított műanyagok) csoportjának képviselői a polietilén, a polipropilén és a poli(izo-butilén).

A **polietilén**nek sűrűség szerint három változata van:

- kis sűrűségű (PE-LD), ( $\rho = 0,918 - 0,925 [10^3 \text{ kg/m}^3]$ ),
- közepes sűrűségű (PE-HD), ( $\rho = 0,926 - 0,938 [10^3 \text{ kg/m}^3]$ ),
- nagy sűrűségű (PEUHMW), ( $\rho = 0,940 - 0,960 [10^3 \text{ kg/m}^3]$ ).

A nagyobb sűrűség, nagyobb kristályosodottságot és egyben kedvezőbb mechanikai tulajdonságokat, jobb hőállóságot jelent.

A polietilén kiváló vegyszerállóságával és kedvező elektromos tulajdonságaival tűnik ki a műanyagok közül. Alkalmazásának korlátja a viszonylag alacsony lágyulás- és olvadáspontja.

A polietilén hőállósága térhálósítással növelhető. A térhálósítás vegyi úton (pl. peroxidok hozzáadásával) vagy nagy energiájú besugárzással történhet. Az utóbbi a használatosabb módszer, mivel emellett a polietilén megőrzi kiváló elektromos tulajdonságait. A térhálósított polietilén nem olvad, hanem nagyobb hő hatására gumyszerűen rugalmassá és alakíthatóvá válik.

Csövek, csőcsatlakozások, csőelzáró szerkezetek, korrózióálló bevonatok, saválló szivattyú alkatrészek készülnek polietilénből.

Alkalmasak továbbá csomagolóanyagok, háztartási és közszükségleti cikkek, gyümölcszedő rekeszek, háztartási készülékek egyes alkatrészeinek előállítására.

Az elektromosipar egyik értékes szigetelőanyaga, főleg nagyfeszültségű kábelek szigetelésére, valamint huzalok, kondenzátorok, motortekercsek szigetelésére használják. Habosítva hő- és hangszigetelésre alkalmas.

A **polipropilén** (PP) tulajdonságai hasonlóak a polietilén tulajdonságaihoz, de hőállósága és szilárdsága nagyobb. Felhasználási területe azonos a polietilénével de a polipropilén csővezetékek 100 - 120 °C-ig is igénybe vehetők.

Széles körben felhasználják egészségügyi berendezések, valamint különböző orvosi és kórházi felszerelések gyártására. Az utóbbi területen a jó sterilizálhatósága igen előnyös.

A **poli(izo-butilén)** (PB) előnyös tulajdonsága a jó vízállóság és vegyszerállóság. Vegyszerállósága a poliolefinek között a legkedvezőbb, oxidáló szereknek is ellenáll. Hátránya, hogy tartós igénybevétel esetén igen jelentős hidegfolyást mutat. Alkalmazásának hőmérsékletarára 80-90 °C.

A **polikarbonátok** (PC) mechanikai tulajdonságai, mérettartása, elektromos szigetelőképesége igen jó, hidegfolyásra nem hajlamosak. Értékes tulajdonságuk a jó hő- és hidegállóság, -100 °C és +125 °C hőmérséklet-tartományban mechanikai tulajdonságai számottevő romlást nem mutatnak.

Mechanikai tulajdonságai és hőállósága üvegszál erősítéssel tovább javíthatók. Az 1-2 mm hosszú és néhány mikron vastag üvegszállal erősített anyag előnyös tulajdonsága még, hogy fröccsöntő gépen is jól feldolgozható. (Az üvegszál erősítés a zsugorodását és a hőtágulását is csökkenti.)

Fogaskerekek, csapágyak, különféle gépalkatrészek, finommechanikai precíziós alkatrészek, műszerdobozok és házak, háztartási gépek alkatrészei, szivattyúalkatrészek stb. készülnek polikarbonátokból.

A fluortartalmú polimerek, az ún. **fluoroplasztok** (FP) nagy kémiai ellenállásukkal és különösen magas hőállóságukkal tűnnek ki. Elektromos szigetelőképeségük is nagyon jó.

A csoport legjelentősebb képviselője a poli(tetrafluor-etilén) az ún. Teflon, amely 250-300 °C-ig is felhasználható.

A poli(tetrafluor-etilén) különleges tulajdonságai miatt a hőre lágyuló műanyagok szokványos megmunkálási eljárásaival nem dolgozható fel. Elsősorban a fém- és keramikus poroknál alkalmazott zsugorítási eljárással alakítják. A kiindulási műanyagporból sajtolásra megfelelő előformát készítenek, majd azt általában 380 °C hőmérsékleten hőkezelik. Az előformázás hőmérséklete jelentős befolyást gyakorol az anyag tulajdonságaira.

A hőkezelést lassú lehűtés követi. Az elkészült előforma 310-320 °C-ra felmelegítve meglágyul, így nyomással a kívánt, végleges formára alakítható. *Porózus bronz-vázanyagú poli(tetrafluor-etilén)-ből kenés nélkül is üzemeltethető, vegyszereknek, hőhatásnak ellenálló siklócsapágyak készülnek. Teflonból – kiváló siklósi tulajdonságaik következtében – közúti járművekhez, repülőgépekhez siklócsapágyak készülnek olyan helyekre, ahol kis kerületi sebesség mellett a fajlagos terhelés nagy. Tolózárak,*

tömítések, szivattyúalkatrészek gyártására is felhasználják. Az elektromosipar részére hőálló szigetelések készülnek belőle.

Bevonatként alkalmazzák korrózió elleni védelemre olyan területeken, ahol a hőállóság is fontos (pl. csövek, egyes vegyipari berendezések bélésére.)

A poli(trifluor-monoklor-etilén) vegyszerállósága és korrózióállósága szintén kiváló. Hőállósága azonban csak 180 °C-ig terjed.

A **normál polisztirol (PS)** elége rideg, törékeny anyag. Hőállósága viszonylag gyenge, 80 °C-on már lágyul. Hőállóságának növelésére és ridegségének csökkentésére kopolimerizációt alkalmaznak. A kopolimerizációhoz elsősorban akril-nitrilt és butadiént használnak. A butadiéntartalmú polisztirol fajták hátránya a fokozottabb öregedési hajlam.

A polisztirol vegyszereknek ellenáll, elektromos szigetelőképességük kiváló. A hőálló és ütésálló polisztirol igen szívós. Lemezek, csövek, bélésanyagok, kisméretű fogaskerekek, villamosipari formadarabok, szigetelőanyagok, háztartási- és villamoskészülékek dobozai, valamint tartozékai és műanyag tömegcikkék készülnek elsősorban polisztirolból.

A polisztirol fóliát kondenzátorok készítésére használják. A mind szélesebb területen felhasznált akril-nitril-butadién-sztirol kopolimerizátum, az ún. ABS gyanta nagy szívósságával, kedvező szilárdságával és kopásállóságával, jó vegyszerállóságával, valamint jó önthetőségével tűnik ki.

A **poli(metil-metakrilát)-ok (PMMA) (plexiüveg)** üvegszerűen átlátszó, jó mechanikai és elektromos tulajdonságokkal rendelkező műanyagok. Különösen jó az ütésállóságuk. Védőablakok, különböző védőlemezek, átlátszó modellek, tartályok és laboratóriumi berendezések készülnek elsősorban belőlük. Járműveken, repülőgépeken biztonsági üveggként használják, újabban, hullámosított kivitelben, az építőipar is felhasználja.

A **poliformaldehid** fizikai tulajdonságai némileg hasonlóak a sárgarézhez, olvadáspontja természetesen jóval alacsonyabb (165 °C). Előnyös tulajdonsága a jó siklóképesség, amely megközelíti a poli(tetrafluor-etilén)-ét. Savakra érzékeny, alifás és aromás szénhidrogének nem támadják meg.

Elsősorban sárgaréz helyettesítésére szolgál. Fogaskerekek, siklócsapágyak (önkenő csapágyak), centrifugálszivattyú-házak, lapátkerekek, benzin- és olajszivattyú alkatrészek, csövek, elektromos ipari jelzőberendezések, porlasztók, fékberendezések, golyóscsapágy-kosarak készülnek elsősorban a poliformaldehidből. Az élelmiszeripar különböző területein a rozsdamentes acél helyettesítésére alkalmas.

A **cellulózészterek (POM)** természetes alapú műanyagok, amelyeket a természetben található cellulóz makromolekulák vegyi átalakításával állítanak elő.

Ide tartozik a cellulóz-nitrát, a cellulóz-acetát és a cellulóz-aceto-butirát. A cellulóz-nitrátot, amelyből a celluloidot állítják elő, gyúlékonysága miatt, a

többi cellulózészter háttérbe szorította (jelenleg elsősorban a lakkipar területén van jelentősége.)

A cellulózészterek sajátossága a szívós, szaruszerű jelleg, a jó fényállóság, valamint a benzin- és olajállóság. Lágyító alkalmazásával lágyabb, illetve ütésállóbb típusok is előállíthatók. Hátrányos tulajdonsága, hogy hővel szemben érzékeny (különösen nagyobb lágyítóanyag-tartalom esetén).

Hő hatására szilárdsága, folyási határa és rugalmassági modulusa rohamosan csökken. Felhasználásuk különösen ott elterjedt, ahol fémrészeket kell beágyazni (díszítőlécek, kormánykerekek, kilincsek, fogantyúk). Szép felületük és fényük miatt burkolatok, készülékdobozok gyártására is alkalmasak. Elektromosipari felhasználásuk is jelentős.

A **szilikonolajok** és **zsírok** hideg-, hő- és vegyszerállósága jóval nagyobb, mint a többi műanyagé (szilíciumtartalmuk következtében). Viszkozitásuk  $-60$  és  $+300$  °C között alig változik. Csapágykenéshez alkalmazva előnyös tulajdonságuk, hogy a nyomás növekedésével a sűrűlődség értéke alig nő.

Elsősorban kenőanyagként, hőközlő folyadékként és rezgéscsillapítóként használják nagy mennyiségben.

### 7.1.5.3. *Kaucsuk, gumi*

A brazil Amazonas-menti őserdőkben őshonos a kaucsukfa (*Hevea Brasiliensis*). Ma már azonban Indiában, Vietnámban, általában Kelet-Ázsiában, ültetvényeken termesztik. Ennek a fának a megsértett kérgéből tejszerű nedv folyik, amit *latexnek* neveznek. A **latex** 30-40 % **kaucsukot** tartalmaz, ami poli-izoprén óriásmolekulákból áll. A latexet kis edényekbe gyűjtik, szűrés után hangyasavval, ecetsavval kicsapatják a kaucsukot, amit mosnak, szárítanak, majd tömbökké feldolgozzák. Ha a szárítás melegelevegővel történik, *krepp*-kaucsukról, ha füstöléssel, akkor *smoked*-kaucsukról beszélünk. Ez a kaucsuk lesz a gumi alapanyaga.

Európába az 1700-as években jutott el a kaucsuk, de ilyen állapotában nem volt különösebb gyakorlati jelentősége. Alakváltozó képessége igen nagy (szakadási nyúlása 1200 %). Műszaki célra felhasználhatóvá akkor vált, amikor 1839-ben **Ch. Goodyear** térhálósította a kaucsukot. Az eljárást **vulkanizálásnak** nevezték el, mivel a kaucsukot kénnel keverték, majd hevítették  $140-170$  °C-ra. A vulkanizálás hatására a kénatomok a láncmolekulákat vegyi kötéssel összekapcsolták (térhálósították). A láncok között ún. „kénhidak” jöttek létre. Így egy stabil, kisebb alakváltozásra képes anyagot kaptak. Attól függően, hogy milyen mértékű volt a térhálósítás (több vagy kevesebb kénhid jött létre), a gumi tulajdonságai, állaga is változott (az egészen **lágym gumitól** a csontkemény **ebonit-ig**).

A vulkanizálás eredményeképpen olyan kiváló tulajdonságú gumitermékek voltak előállíthatók, amelyeknek műszaki és egyéb célú felhasználása rohamosan elterjedt, sőt egyes területeken (pl. közlekedésben) jóformán nélkülözhetetlenné váltak.

A gumitermékek előállításának menete röviden a következőkben foglalható össze. A gumigyárba érkező, bálázott kaucsuktömböket a könnyebb kezelhetőség és a megmunkálhatóság érdekében először kisebb méretű darabokra aprítják, majd mosó hengerszéken mossák, továbbá szükség esetén szűréssel is tisztítják. (Szűrésnél a képlékenyített kaucsukot szítán préselek át.)

A tisztítási műveleteket a **puhítás** (masztikálás) követi, amelynek során a nyers kaucsukot hengerszéken vagy keverőgépen „gyúrnak”. Ennek hatására a nyers kaucsuk meglágyul, képlékenyvé válik. Így a gumigyártáshoz szükséges nyersanyagok könnyen hozzákeverhetők.

Az ún. **keverékkészítés** során kénport (esetleg más vulkanizálószer) adagolnak a kaucsukhoz.

A térhálósodás, azaz vulkanizálódás folyamatának időtartama **gyorsítók** hozzáadásával csökkenthető. A késleltetők a vulkanizálás sebességét csökkentik anélkül, hogy befolyásolnák a végtermék vulkanizálódásának mértékét.

A keverékekhez adagolnak még **öregedésgátló anyagokat**, valamint **töltőanyagokat** (pl. kormot a kopásállóság fokozására), **színezőanyagokat** és **lágysítókat**.

A keverék bekerül a megfelelő „gumisütő” szerszám üregébe és felveszi a kívánt alakot. A szerszámban megy végbe 140-170 °C-on, megfelelő idő alatt, a vulkanizálódás (térehálósodás).

A gumigyártás termékei vagy kész gumialkatrészek, vagy félkész termékek (lemezek, szalagok, szálak stb.).

*A természetes gumi néhány fontosabb tulajdonságát a 7.1. táblázat foglalja össze.*

7.1. táblázat A természetes gumi főbb tulajdonságai

Sor-Sz.	Tulajdonság	Mértékegység	Töltetlen keverék esetén	50 % korommal töltött keverék esetén
1.	Szakítószilárdság	N/mm <sup>2</sup>	28	32
2.	Szakadási nyúlás	%	800	600
3.	300 %-os nyúláshoz tartozó feszültség	N/mm <sup>2</sup>	3	15
4.	Shore-keménység	Sh °	40	55
5.	Fajlagos ellenállás	Ω · cm	10 <sup>14</sup>	10 <sup>2</sup> - 10 <sup>8</sup>
6.	Hővezetés	J/m·°C·s	544	667

A gumi rugalmas alakváltozása során a deformációhoz felhasznált munka egy része, a belső súrlódás következtében, hővé alakul. A természetes gumi esetében ez kevesebb, mint az ún. műgumik esetében. A természetes gumi

hátrányos tulajdonságai közé tartozik az *öregedési* hajlam, valamint az a tény, hogy szerves oldószerek, szénhidrogének *oldják*.

#### 7.1.5.4 **Műkaucsuk-féleségek**

Az a törekvés, hogy a gumiipar rohamosan fokozódó - és a természetes kaucsuk termelésével nem fedezhető - nyersanyagszükségletét kielégítsék, továbbá hogy egyes országok gumiiparát függetlenítsék a kaucsuk behozataltól, vezetett elsősorban a műanyagipart a műkaucsuk-féleségek fejlesztésére, előállítására. A fejlődésben természetesen jelentős szerepet játszott az a törekvés is, hogy olyan új anyagokat állítsanak elő, amelyek részben rendelkeznek a természetes kaucsukból előállított gumik kiváló tulajdonságaival, másrészt viszont a hiányosságaikat (öregedési hajlamot, vegyszer- és olajérzékenységet, alacsony hőállóságot stb.) kiküszöbölik. Ma már viszonylag nagy számban állítanak elő gumyszerű műanyagokat, ún. **elasztomereket**. *A műkaucsukok csoportjába azokat az anyagokat sorolják, amelyek vulkanizálhatók.*

A műkaucsukokhoz, a természetes gumi előállításánál megismert módon, a térhálósító anyagon (pl. kénen) kívül, töltőanyagot is használnak (kormot, kvarcsemcséket), ami növeli a polimer sűrűségét, kopásállóságát, sőt szilárdságát is. A műkaucsukok tulajdonságaikat alacsony hőfokon is megőrzik, mivel az ún. üvegesedési hőmérsékletük negatív hőfoktartományba esik. Az elasztomerek nem olvadnak meg hevítéskor, rugalmas viselkedésüket megtartják egészen a bomlási hőmérsékletükig. Legnagyobb mennyiségben a műgumik közül, a **sztirol-butadien gumit** gyártják és használják. Bár a természetes guminál kevésbé nyúlékony, nagyobb a belső súrlódása, de annak hő- és időjárásállóságát, savállóságát felülmúlja. Gumiabroncsokat, tömlőket, tömítéseket, szállító szalagokat gyártanak belőle.

A **butadien-akril-nitril gumi** a szénhidrogénekkal szembeni ellenálló képességével tűnik ki társai közül. Ezért főleg olajálló padlóburkolatokat, tömítéseket, tömlőket gyártanak belőlük.

A **szilikon gumik**, mint általában a szilikonok, taszítják a vizet, így kültéri burkolatokhoz kiválóan alkalmasak. Kiváló szigetelő anyagok, még extrém hőmérsékleti körülmények között is.

A **poliuretán** jellemző tulajdonságai a viszonylag nagy szilárdság, kopásállóság, kiváló rezgéscsillapítás. Ellenáll a benne lévő repedések terjedésének. Mintegy 80 °C-ig víznek, olaj hatásának ellenáll. Habosított változatát, elterjedten használják csővezetékek szigetelésére. Kiváló tömítéseket, tömítő karmantyúkat gyártanak belőlük. A legjelentősebb műkaucsuk-féleségek legfontosabb tulajdonságait a 7.2. táblázat foglalja össze.



## 7.2. táblázat Műgumik tulajdonságai

Sor-sz.	Az elasztomer fajtája	Szakítószilárdság $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Szakadási nyúlás A [%]	Az alkalmazás hőmérséklet-határai [°C]
1.	Sztirol-butadien-gumi (SBR)	1 - 2	500 - 2500	-30 - +70
2.	Butadien-akril-nitril gumi (NBR)	4 - 5	400 - 500	-30 - +70
3.	Szilikon gumi (SIL)	3 - 5	500 - 600	-80 - 180
4.	Poliuretán (PUR)	30 - 35	400 - 600	-40 - +80

## 7.2. Kerámiák

Az anyagtudomány újabb kutatásai eredményei alapján kifejlesztett anyagok, mint a műanyagok, kerámiák bizonyos területeken kiszorítják a hagyományos szerkezeti anyagokat, illetve kielégítik az újonnan jelentkező, sajátos igényeket.

A kerámia szó hallatán még ma is, elsősorban a hagyományos szilikát alapú (agyag és porcelán) kerámiákra gondolunk, pedig ma már kerámiából készülnek, pl. forgácsoló lapkák, speciális szigetelők és hőálló anyagok, félvezetők, szövetbarát (biokompatibilis) anyagok stb.

A korszerű ipari kerámiák fogalma jóval kiterjedtebb, mint a hagyományos értelmezés.

Mai felfogásunk szerint kerámiának tekintünk **minden anyagot, ami nem fém és nem szerves anyag.**

A kerámiák felhasználásának előnyei a következőkben foglalható össze röviden:

- élettartam növekedés,
- drágább anyagok helyettesítése, kiváltása,
- energiafelhasználás csökkentése,
- anyagtakarékos gyártás,
- környezetbarát anyagok felhasználása.

A korszerű ipari kerámiák fő felhasználási területei:

- elektronika, félvezetők, szupravezetők, piezoelektromos eszközök előállítás,
- vegyipari berendezések gyártása,
- motor- és turbinagyártás,
- egészségügyi, optikai eszközök gyártása,
- rakétatechnika, űrhajózás.

A kerámiák jórészt szigetelők, vagy félvezetők. Ridegek, kemények, olvadáspontjuk magas. Ridegségük miatt bennük a repedések hangsebességgel terjednek, és felléphet az ún. **katasztrofális törés**. A kerámiakutatás egyik fő iránya és fontos feladata a kerámiák szívósságának fokozása oly módon, hogy előnyös tulajdonságaikat megőrizték. A kerámiában a repedések terjedésének akadályozására, a ridegség csökkentésére különféle módszereket dolgoztak ki. Ezek alapján a korszerű ipari kerámiáknak különböző, egymást követő generációjáról beszélnek. Kezdetben a szilárdságot úgy fokozták, és a repedés terjedését úgy gátolták, hogy minél finomabb és **egyenletesebb eloszlású** szemcséket állítottak elő alapanyagként.

Később **cirkónium-oxidott** adagoltak a kerámia anyagába. Ezeknek, a molekuláknak az a tulajdonsága, hogyha az anyagban nő a mechanikai feszültség, allotrop átalakulás következtében növekszik térfogatuk. A repedések csúcsánál ébred az anyagban a legnagyobb feszültség, így itt a növekvő cirkónium-oxid molekulák összenyomják a repedés csúcsát, gátolva a repedés terjedését.

A repedések terjedése úgy is gátolható, ha a kerámia anyagába **kis kristályokat** hoznak létre, amelyek úgy viselkednek, mint a társított műanyagban az üvegszál.

Bizonyos esetekben, a kerámiákban apró, **buborékszerű kis üregeket** hoznak létre. A repedés egy ilyet elérve megáll, mivel a repedés csúcsánál a felület hirtelen megnő, tehát a feszültség lecsökken, a repedés terjedése megáll.

A kerámiákban általában nincsenek jól elkülöníthető molekulák. Szerkezetüket úgy lehet jellemezni, hogy részecskéik hosszabb távon is szabályos (kristályos) vagy szabálytalan térbeli elrendeződésűek.

A kerámiákat aszerint is csoportosíthatják, hogy **egyatomos szerkezetűek** vagy **vegyületek**. Kerámiának tekintjük az egykristályokat (pl. C; Si; Ge), de a kerámiák döntő többsége **vegyületkerámia** ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ , karbidok boridok, nitridek stb.).

A vegyületkerámiákat tovább lehet csoportosítani **oxidkerámiákra** és **oxidmentes kerámiákra**.

### 7.2.1 Egyatomos kerámiák

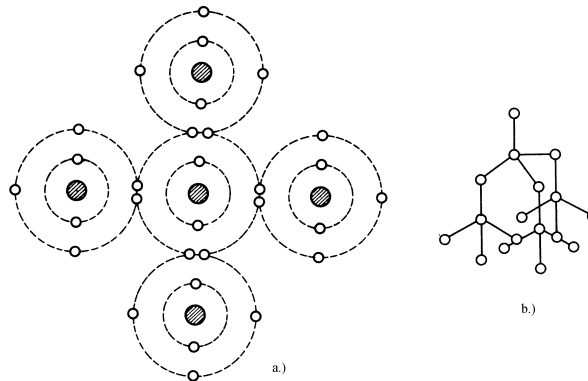
A gépipari gyakorlatban jelentőséggel bíró, széles körben alkalmazott egyatomos keramikus anyag a szilícium, a szén és a germánium kristálya. Közülük is a gépipari gyakorlatban legelterjedtebben alkalmazott a szén alkotta egyatomos kerámia, a grafit és a gyémánt.

A **gyémánt** kristályát kovalens kötéssel kapcsolódó szénatomok alkotják, rácsszerkezete rendkívül szabályos, minden szénatom a másiktól  $120^\circ$ -ra és egyenlő távolságra helyezkedik el (7.11. ábra). A gyémánt a legkeményebb

ismert anyag, keménysége 10 000 HV. Tulajdonságai rendkívüliek, az alábbiakban foglalhatók össze:

- nagyon kemény, de egyúttal rendkívül rideg anyag,
- jól vezeti a hőt, de az áramot nem, jó elektromos szigetelő,
- nem oxidáló vegyi hatásnak kiválóan ellenáll,
- általános oldószerekben nem oldódik,
- nagy az optikai törésmutatója,
- normál nyomáson, rövid ideig a 4 000 °C-ot is elviseli,
- a grafittá átkristályosodás 1 500 °C felett indul meg lassan (több év alatt).

A gyémánt alkalmas kemény, rideg anyagok megmunkálására, csiszolására, polírozására, húzószerszámokhoz, keménységmérőkbe benyomó testként (7.12. ábra).



7.11. ábra A szénatomok kovalens kapcsolódása (a), a gyémántrács felépítése (b).



7.12. ábra Természetes nyers gyémánt

Mivel az ipar évente jóval nagyobb mennyiségű gyémántot igényel, mint amennyit a természetes források biztosítanak, a hiány pótlására fejlesztették ki a mesterséges gyémánt előállítására alkalmas technológiákat. Az első mesterséges (szintetikus) gyémántokat az 1950-es években állították elő, de napjainkban már drágakő minőségű kövek is előállíthatók.

A világ gyémánttermelése meghaladja az évi 6 tonnát. Ebből 4 tonna ipari felhasználásra kerül. Ma az ipar nagyjából mesterséges gyémántot használ.

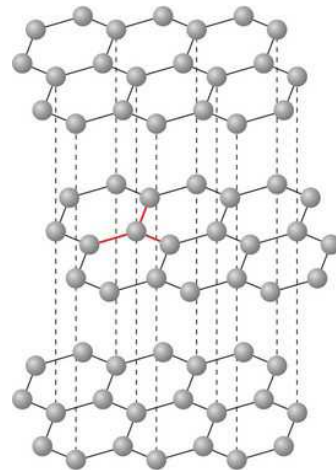
A szénatomok gyémánttá kristályosodásának alapvető feltétele az igen nagy, minimálisan 55 GPa nyomás, valamint magas, 2000 °C feletti hőmérséklet. Ha nem egykristályokat növesztenek, hanem ún. **polikristályos gyémántot** állítanak elő, az eljáráshoz elegendő csupán 1000 °C és néhány GPa nyomás. Újabban gőzfázisból csapják ki a gyémántszemcséket (CVD módszer alapján), pl. elektronikai célra Si-lapkára kb. 0,5 mm vastagságban. A polikristályos gyémánt alkalmasabb szerszámanyagként, mint az egykristály, mivel a kristallitban keletkező repedés nem vezet a szerszám töréséhez, a repedés a szomszédos gyémánt kristálynál nem terjed tovább. Ipari felhasználásra mind elterjedtebben használják a mesterségesen előállított gyémántot.

A **grafit** a szénnek hexagonális rácsszerkezetű kristálymódosulata (7.13. ábra). A kristálysíkok hatszögeiben a szénatomok kovalens kötéssel, szorosan kapcsolódnak egymáshoz, míg a síkok között lényegesen gyengébb, másodlagos (ún. van der Waals) erők hatnak. Az alapsíkok irányában elektromos vezetőképesség a rézéhez hasonló. A grafit olvadáspontja igen magas, így kohászatban *bélés* és *szigetelőanyagként*, *elektrodok* anyagának használják. A *szürke öntöttvasban* a szén, ami nem oldódik, hanem kiválik, szintén grafit formájában jelenik meg (7.14. ábra).

A társítóanyagként használt *szénszál* is grafit ( $R_m = 1700-3200 \text{ N/mm}^2$ ), amit szerves szálak (pl. cellulóz) semleges gázban történő elszenesítésével állítanak elő. A porózus szerkezetű grafitot (aktív szén) gázok, folyadékok szűrésére használják. A szénnek egy másik módosulata, a *kormot* társítóanyagként, pl. a gumi kopásállóságának fokozására használják fel. A korom gömb alakú szemcséi a grafitnak, mérete 10-500 nm. Újabban ismerték fel a koromban a szén további módosulatait, molekuláris változatait, a **fullerént** és a **nanocsövet**. Az előbbi esetében 60 szénatom öt- és hatszögekből képez gömbalakzatot. A nanocsövek tekinthetők úgy, mintha a hatszögekből álló grafit egyik síkja felhajolna csővé. Ezek vizsgálata ma még az anyagtudomány új kutatási területét képezik.



a)



b)

7.13. ábra Grafít és a grafít rácsszerkezete  
a) termés grafít b) a grafít hexagonális rácsszerkezete



7.14. ábra Lemezes grafít a szürke öntöttvasban

Összefoglalva, a grafít legjellemzőbb tulajdonságai:

- a rácssíkon belül igen erős kovalens kötés,
- a síkok között csak jóval kisebb *Van der Waals* erők,
- a síkok irányába rézhez hasonló jó vezetőképesség,
- a síkokra merőlegesen mintegy a fele a vezetőképesség,
- hőszigetelő anyag,
- zsíros tapintású,
- kitűnően hasad, hajlítható, eléggé lágy anyag,
- olvadáspontja igen magas, 3 500 °C,
- a természetes előfordulása kőszenes üledékben, mészkő és gránit réteg határán,
- valamint hidrotermális folyamatban jön létre,
- pikkelyes formában alakul ki,
- mesterségesen *antracitból*, *kokszból*, *petrokokszból* állítják elő,
- villamos-ellenállás kemencében, 2 700 °C-on.

A grafit néhány jellemző felhasználási területe:

- tűzálló téglékhez, kohók alapjaként, bélésanyagként,
- elektródákhoz (anód), ívkemencékhez,
- nemvezető anyagok vezetővé tételéhez (pl. műanyagoknál),
- ceruzabélként,
- kenőanyagba adalékként,
- társító anyagként (szénszál – cellulóz),
- polyakril szál pirolízisével (elszenesítésével) 1500 °C-on nagy szilárdságú ( $R_{eH} = 1\,700 - 3\,200 \text{ N/mm}^2$ ) szénszállá dolgozható fel,
- szűrők anyagaként, az aktív szén víz, bor, gázok szűrésére, cukor tisztítására ( $1\,000 \text{ m}^2/\text{g}$  a fajlagos felület),
- A *korom* gömb alakú szemcséi a grafitnak, mérete 10 – 500 nm, és a gumi kopásgátló társító anyaga.

Újabban ismerték fel a koromban a szén további módosulatait, molekuláris változatait, a **fullerént** és a nanocsövet. Az előbbi esetében 60 szénatom öt- és hatszögekből képez gömbalakzatot. A **nanocsövek** tekinthetők úgy, mintha a hatszögekből álló grafit egyik síkja felhajolna csővé. Ha a hatszögek önálló síkot képeznek, ezt nevezik **grafénnek** (7.15. ábra). Ezek vizsgálata ma még az anyagtudomány új kutatási területét képezik. Ezeknek várhatóan még óriási jelentőségük lesz a mikroelektronikában, de a szerkezeti anyagok területén is.

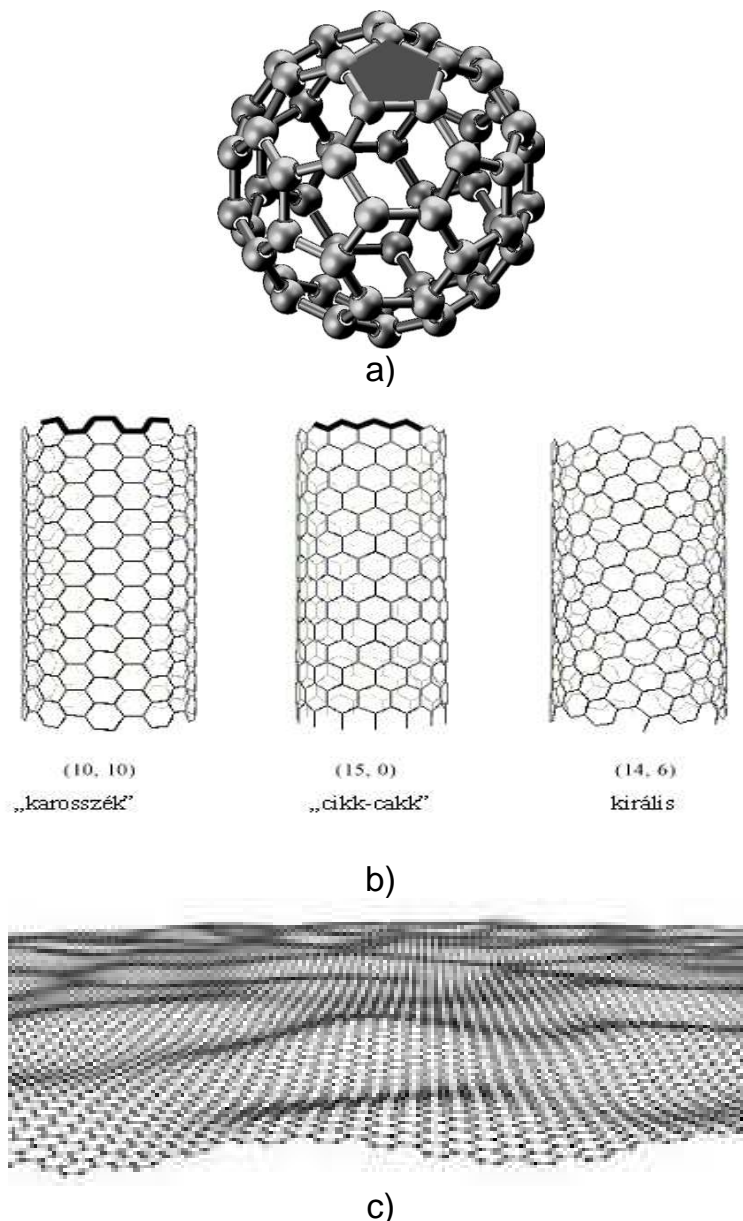
A **szilícium** (Si) a természetben az oxigén után a második legelterjedtebb elem. Neve a kovakő latin nevéből (silex) származik. A szilícium egykristálynak a mikroelektronikában van fontos szerepe.

A szilícium főbb fizikai tulajdonságai:

- sötétszürke, fémes fényű, eléggé kemény, rideg anyag,
- gyémánthoz hasonló rácsszerkezetű,
- félvezető,
- olvadáspontja 1410 °C,
- sűrűsége  $\rho = 2,32 \text{ [kg/m}^3 \cdot 10^3]$ ,
- a földkéreg második leggyakoribb eleme (több mint 25%), de mindig az oxigénnel együtt fordul elő.
- leggyakoribb ásványa a kvarc –  $\text{SiO}_2$ ,
- előállítása vegyületeiből redukcióval,
- kvarcból Mg-mal redukálható.

Amorf szilícium barna por formájában keletkezik, ami könnyen olvasztható, majd elpárologtatható (üveglapra gőzölögtetés, pl. napelemekhez). A félvezető ipar számára egykristályokat növesztenek belőle integrált áramkörökhöz. Ha bizonyos mennyiségű alumíniummal, foszforral elegyítik (ötvözik), változik a fajlagos vezetőképessége.

Ötöttvasban segíti a grafitkiválást, az ötöttvasat savakkal szemben ellenállóvá teszi. Acélok ömledékéből az oxigén eltávolítását segíti elő (acélok csillapítás).



7.15. ábra Újabb szénrács típusok  
a) fullerén, b) szén-nanocső típusok, c) grafén

Transzformátorok vasmagját szilíciumtartalmú acéllemezekből készítik, mert kicsi az átmágnesezési vesztesége.

Egyenirányítókhoz használják a nagy tisztaságú szilíciumot. Az amorf szilíciumnak fontos szerepe van az olcsó napelemek gyártásában.

A szilícium-karbid fontos csiszolóanyag (karborundum).

Az építőiparban a szilícium ásványainak fontos szerepe van, a legtöbb téglá, kő, cement, üveg szilikátokból áll. A szilícium por belélegezve súlyos tüdőkárosodást, szilikózist okoz.

A **germánium** (Ge) ún. félfém. Fontosabb tulajdonságai:

- gyémánthoz hasonló rácsszerkezetű, rideg, szürkés fényű anyag,
- elektromosságot kevésbé vezet (félvezető),
- olvadáspontja 937 °C,
- sűrűsége  $\rho = 5,32 \text{ [kg/m}^3 \cdot 10^3]$ ,
- halogének megtámadják (Cl – 100 °C-on),
- ritka fém, de a cink érce tized százalékban tartalmazza,
- a félvezető technikában alkalmazzák az igen tiszta germániumot,
- szerepe van ötvöző anyagként, valamint fluoreszcens lámpákban,
- egyes germánium vegyületek emlősökre nem mérgezőek, de a baktériumokkal szemben rendkívül aktívak.

## 7.2.2. Vegyületkerámiák

A vegyületkerámiák két nagy csoportot alkotnak:

1. oxidmentes kerámiák,
2. oxidkerámiák csoportját.

### 7.2.2.1. Oxidmentes vegyületkerámiák

Ebbe a csoportba tartozó legfontosabb kerámiák a *karbidok*, *nitridek*, *boridok*, *szilicidek* és ezek *komplex* intersztíciós vegyületei. Jellemző tulajdonságuk a nagy keménység és ezzel együtt jár a nagy ridegség, törékenység. Ezeket, a vegyületeket használják fel **szerszámacélokban szívós acélba ágyazva** vagy **kéregötözött réteggént**. A porkohászati eljárásoknál ismertetett **keményfémek** is az oxidmentes kerámiák csoportjába sorolhatók.

Főbb jellemzőik:

1. kovalens kötés,
2. magas olvadáspont,
3. nagy keménység (magas hőfokon is).

Készülnek belőle nagy élettartamú, nagy teljesítményű szerszámanyagok és szerszámbevonatok:

- Ti, Ta, W karbidjaiból, karbonitridjeiből diszperziós kerámiák (CM),
- Si-nitrid kerámiák (CN),
- Bór-nitrid kerámiák (BN) – szerkezete a gyémántéhoz hasonló, szuperkemény anyag, 1 200 °C-ig megtartja keménységét és alkalmas simító megmunkáláshoz.



**Kerámia bevonatok** a kerámia keménységét, kopásállóságát egyesítik a fém szívósságával. Vékony réteget kell képezni a rossz hővezető képesség miatt. A rétegeképzés egyik módja, pl. *rágózölögtetés* (az elektromos ívben elgőzölögtetett anyagot az 500-800 °C-os munkadarab felületére, kicsapatják néhány  $\mu\text{m}$  vastagságban).

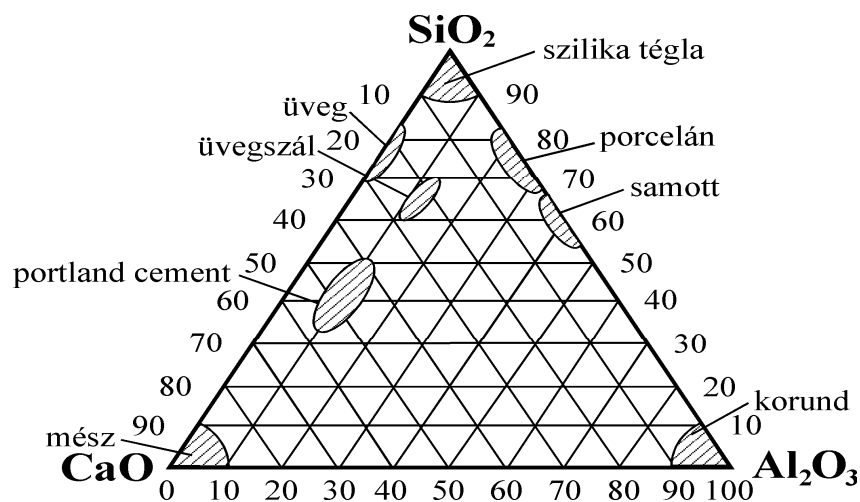
Lehet **ionbombázással** is bevonati réteget képezni igen vékony, interstíciós vegyületi réteg formájában. A kéregben nagy lesz a nyomófeszültség.

### 7.2.2.2. Oxidkerámiák

Az oxidkerámiákhoz a nyersanyagot ásványok biztosítják. Két legfontosabb alapanyaga a szilíciumdioxid (kvarchomok –  $\text{SiO}_2$ ) és az alumíniumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). A szilícium és az alumínium fémek a földkéregben, a legnagyobb mennyiségben megtalálható elemek közé tartoznak (az első öt elem sorrendje: oxigén, szilícium, alumínium, vas és kalcium). A szilícium és az alumínium a földkéreg 56%-át adják. A napjainkban ipari célokra felhasznált anyagok többségét ezen anyagok adják.

Az  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -hoz és a  $\text{SiO}_2$ -hoz **bázikus** anyagot (pl. égetett meszet –  $\text{CaCO}$ -ot vagy  $\text{K}_2\text{O}$ -ot,  $\text{Na}_2\text{O}$ -ot,  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ -ot,  $\text{MgO}$ -ot) adagolva különböző tulajdonságú oxidkerámiákhoz jutunk. A 7.16. ábra ennek a háromalkotós rendszernek a diagramját mutatja be. Az oxidkerámiák nyersanyagai legtöbbször bányászott ásványok, mint az *agyag*, *kaolin*, *márga*, *kvarc*, *homokkő*, *bórax*, *hamuzsír*, *földpát*. Ezek vagy aprószemcsés szerkezetűek vagy aprítani, tisztítani kell őket. Az oxidkerámiák fő sajátosságai:

- nagyon stabil vegyületek,
- magas az olvadáspontjuk,
- kemények,
- nagy a nyomószilárdságuk.



7.16. ábra Kerámiák háromalkotós rendszere

Az oxidkerámiák közül csak az üveget olvasztják, a többit inkább nedves állapotban formázzák, majd szárítják, kiégetik (szinterelik).

Vannak oxidkerámiák, amelyek víz hozzáadásával hidrátokká, tömör anyaggá alakulnak, mint a **cementek**.

A korszerű ipari oxidkerámiáknak sokféle fajtája, sokféle felhasználási területe van. Az **üvegkerámiák** igen hőállóak, szemben az üveggel nem érzékenyek a *hősokkra*. Az üvegkerámiát úgy állítják elő, hogy az üvegben igen kicsi, egyenletesen eloszló, úgynevezett *nano-kristályokat* hoznak létre. Hőállósága felülmúlja a hőálló üveg tulajdonságait (ilyen, pl. a korszerű villanyfőzőlap izzó fűtőfelülete) (7.17. ábra).



7.17. ábra Elektromos főzőlap üvegkerámiából (izzó állapotban sem törik el)

A **piezoelektromos** kerámiák hasonlóan a kvarckristályhoz piezoelektromos tulajdonsággal rendelkeznek. Nyomás hatására felületén töltés halmozódik fel (mint, pl. gázgyújtókban), ha viszont feszültséget kapcsolnak rá, rezgésbe jön (mit ultrahangos vizsgálófejekben). Ilyen kerámiaanyag, pl. az *ólom-cirkon-titanát* (PZT). Felhasználási területe széleskörű.

Nagy mágneses permeabilitású, rossz vezetőképességű anyagok a **lágyszeritek**, anyaguk  $M^{II} \cdot Fe_2O_3$ , (ahol  $M^{II} \Rightarrow Zn, Cd, Co, Mn, Ni, Cu, Mg, Ba$  lehet). Vasmagként használják elektromos tekercsekben.

**Keményferritek:**  $M^{II} / Fe_2O_3$  arány 1:1-től 1:6. Igen kopásálló – leginkább  $BaO \cdot Fe_2O_3$  típusúak és magnófejekben használják, élettartamuk nagy, de felhasználják a drága AlNiCo állandó mágnes helyett is.

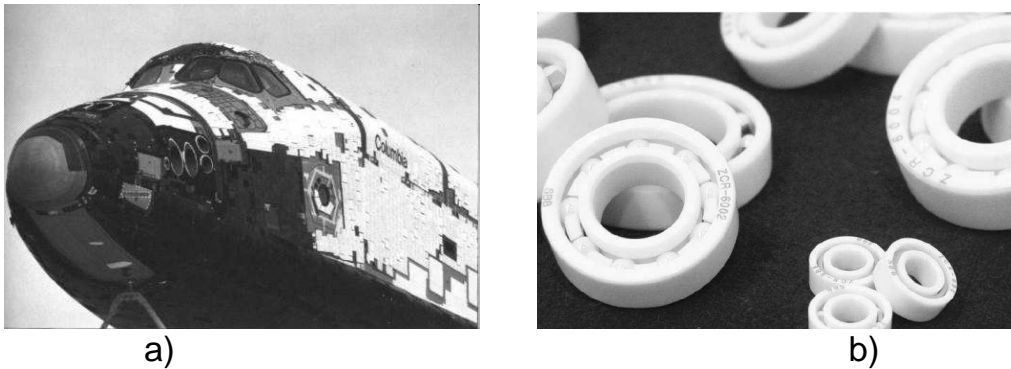
A **mikrokristályos** kerámiákat kisméretű, kis kapacitású, kisveszteségű kondenzátorok dielektrikumaként használják. Anyaguk  $2MgO \cdot TiO_2$ ;  $BaO \cdot TiO_2$ ;  $CaO \cdot TiO_2$ .

A **nagy hőkitevőjű ellenállások, termisztorok** ellenállása a hőmérséklet növekedésével csökken. A hőmérsékletváltozást  $0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$  pontosan lehet velük mérni. Anyaguk  $MgO \cdot CrO_3$ ;  $ZnO \cdot TiO_2$ .

A **feszültségfüggő** (VDR) **ellenállásoknak** a rákapcsolt feszültség növekedésével jelentősen csökken az ellenállása. Anyagukat keramikus anyaggal kevert SiC szemcsék képezik.

Az űrrepülőgép védelmére, pl. kis sűrűségű, nagy tisztaságú szilíciumdioxidból készült, *alumínium-boroszilikát* rostokkal erősített kerámialapokat használtak (7.18. ábra).

Az alumínium-oxid kerámia csapágyak készítésére is alkalmas.



7.18. ábra Korszerű kerámiák felhasználása

a) űrrepülőgép kerámia hővédő burkolata

b) kerámia görgőscsapágyak

### Kompozitok

A kompozitok *két vagy többféle anyag előnyös tulajdonságainak egyesítésére létrehozott társított anyagok.*

Napjainkban egyre több ilyen „összetett” anyagból előállított termékkel találkozhatunk (pl. gumiabroncs, üvegszállal erősített műanyagtartály, gépjármű karosszériák, repülőgépek anyaga, fogpótló anyagok stb.), bár az ötlet nem új, hiszen ősidők óta használunk e fogalomkörbe tartozó anyagot (a vályog, pl. agyag és szalmatörek kompozitja vagy ilyen anyag a vasbeton is).

Az **alapanyag** (mátrix) körül fogja az **erősítő anyagot**, elosztja a terhelést, az erősítőanyag (szénszál, üvegszál) viseli a terhelés jelentős részét, javítja, pl. a húzószilárdságot. Általában van egy **átmeneti réteg** (interfész), ami kapcsolatot biztosít az alapanyag és az erősítőanyag között.

**Fémek, kerámiák, polimerek**, vagy a **karbon** egyaránt lehet alapanyag (mátrixanyag) vagy erősítőanyagok. Anyagukat tekintve beszélhetünk fém-fém, fém-kerámia, kerámia-kerámia, fém-polimer stb. kompozitokról.

A kompozit **szerkezete szerint** lehet szemcse-, szálerősítésű, rétegelt vagy bevonat jellegű.

### Hagyományos kerámiák

Bár a korszerű ipari kerámiáknak egyre nagyobb az ipari jelentősége és elterjedtsége, azért a hagyományos kerámiákat sem lehet említés nélkül hagyni, mert igaz, hogy ősidők óta használjuk őket, de még ma is megvan a

maguk jelentősége, felhasználási területe. A hagyományos kerámiák csoportjának öt jelentősebb tagja van:

1. agyagkerámiák,
2. kristályos tűzálló kerámiák (pl. samott),
3. porcelán,
4. kristályos hidrátok (cement),
5. szilikátüvegek.

### Az agyagkerámia

Előállításához szükséges alapanyag az **agyag**, ami főleg  $\text{Al}_2\text{O}_3$  és  $\text{SiO}_2$ -ből létrejött *alumínium-hidroszilikát* apró, pikkelyszerű részecskéiből áll. *Optimális nedvességtartalom* mellett a finom szemcsék egymáson elcsúsznak, az agyag jól alakítható, formázható (ha túl nedves, szétfolyik, ha a kelleténél kevésbé, akkor nem jól alakítható). Belőle tömegtermékeket, téglát, cserepet állíthatnak elő, pl. extrudálással, sajtolással. Száradáskor, a víz távozásával, a szemcsék „összeakadnak”, közöttük alakzáró kötés jön létre. Ekkor a termék megtartja alakját, de nem rendelkezik megfelelő szilárdsággal, a szemcsék még könnyen szétválnak.

A kellő szilárdságot csak kiégetéssel lehet elérni, amikor a szemcsék **összehegednek**. A kiégetés  $700\text{-}900\text{ }^\circ\text{C}$ -on történik. Megfelelő terméket, csak megfelelő tisztaságú alapanyagból lehet előállítani, mert a szennyezők (főleg szerves szennyező anyagok) visszatartják a vizet szárításkor, ami égetéskor gőzzé alakul és megrepesztí a kerámiát. Az agyag barnás, vöröses színét a benne lévő vasoxidtól kapja. A kiégetéskor a kerámiában **pórusok** maradnak vissza, ami jó hő- és hangszigetelő tulajdonságot biztosít az agyagkerámiának, viszont nem víz- és gázzáró.

### Kristályos tűzálló kerámiák

A **kristályos oxidkerámiából** készülnek a **tűzálló téglák**. Összetételüket, alkalmazhatóságuk hőmérsékletének felső határértékeit a 7.3. táblázat foglalja össze.

7.3. táblázat Tűzálló téglák anyagának összetétele és alkalmazási hőmérsékletének felső határa

Sor-sz.	A kerámia fajtája	Összetétel [%]			Hőmérséklet felső határa [°C]
		$\text{SiO}_2$	CaO	$\text{Al}_2\text{O}_3$	
1.	szilikatégla	95	3	2	1700
2.	samott-tégla	60		40	1670
3.	szilimanit-tégla	36	1	63	1900

## Porcelán

A porcelán az oxidkerámiák egy másik jelentős fajtája. Alapanyaga a **kaolin**, ami a *kaolinit* nevű ásvány mállásából jött létre. Anyaga szintén alumínium-hidroszilikát ( $\text{Al}_2(\text{OH})_4\text{Si}_2\text{O}_5$ ). Igen nagy tisztaságú, apró, mintegy 0,02 mm méretű, fehér színű, kis kristálpikkelyekből áll.

Vízzel elegyítve képlékennyé válik, ilyen állapotában jól formázható. A kizárólag, vagy jórészt kaolinból készített kerámiát az agyagkerámiánál magasabb hőmérsékleten égetik ki. A 900-1300 °C-on kiégetett alapanyagban új fázisok is kialakulnak. Szilárdsága jóval nagyobb az agyagkerámiánál és kevésbé törékeny, **nem porózus**. Jó a vegyszerállósága, kiváló elektromos szigetelő.

A klasszikus porcelán előállításához, a kaolinon kívül, *kvarchomokot* és *földpátot* is felhasználnak. A kaolin képlékennyé teszi az alapanyagot, a kvarc ún. *soványító* anyag, a földpát az ömlesztést segíti elő. A porcelán tömör, tiszta fehér anyag. Magas hőfokon égetik ki, de általában ezt megelőzi egy 800 – 900 °C-os előégetés.

Az alapanyaggal szemben alapvető követelmény a tisztaság, mivel a szennyeződések az égetéskor repedéseket okoznak. Az egyes alkotók aránya szabja meg a porcelán tulajdonságát. A hagyományos kemény porcelán összetétele:

- 50% kaolin,
- 25% kvarc,
- 25% földpát.

Ha a kaolintartalmat növelik, nő a porcelán **hőállósága**, ha a kvarc mennyiségét növelik, akkor nő a **szilárdsága**. A földpát mennyiségének növelése a **szigetelőképességet** fokozza.

A porcelán műszaki célú felhasználási területei elsősorban:

- az elektromos szigetelők,
- laborfelszerelések, egészségügyi eszközök,
- építészet területe.

Vannak **kristályos oxidkerámiák** is. Ezek kemények, ridegek, de közülük is kiemelkedik a keménység tekintetében a kristályos alumínium-oxid, a **korund**. Csiszoló- és köszörűszemcsék anyagként nagy mennyiségben használja fel az ipar. Ide sorolhatók még az  $\text{Al}_2\text{O}_3$  más kristályos módosulata is, mint a **rubin**, a **zafír**. A rubin vérvörös színét a kristályrácsba épült Cr atomok, mint „szennyezők” adják, a zafír rácsába Ti atomok épültek be. Ezek a kristályok is rendkívül kemények, órákban, műszerekben csapágykőként, mérőgépek tapintóiként stb. használják.

A **kristályos hidrátok csoportja** főleg építőipari szempontból fontos kerámiafélésegeket foglal magába. A hidrátok képződése időigényes folyamat, néhány órától akár több hónapig is eltarthat. A keletkező kristályok igen kisméretűek, nagyságuk nem haladja meg az 1  $\mu\text{m}$ -t. A hidrátképző

porok vizes elegye a hidrátok kialakulásáig jól alakíthatóak. Ilyen hidrátképző anyag például az építőiparban nélkülözhetetlen **portland cement**.

## Üveg

Az üveg fogalmát különféle módon definiálják. Ezek a meghatározások az üvegnek valamely tulajdonságát emelik ki:

- átlátszóságát,
- keménységét,
- szerkezetét stb.

*Üvegnek tekintünk, tudományos értelemben, minden amorf, fizikailag homogén anyagot, amely olvadt állapotból túlhűtés következtében, a belső sűrűlódás folytonos növekedése közben nyerte el szilárd halmazállapotát. Ebben az értelemben az „üveg fogalma” állapotot jelent: az „**üvegállapotot**”. Ha a fémeket olyan gyorsan hűtjük, hogy mielőtt ionjai kristályrácsba rendeződnének, a fém megszilárdul, szerkezete rendezetlen (amorf) marad, kialakul a **fémüveg**. Az „üveg állapotú” fémnek jelentősen eltér a tulajdonsága a normál, kristályos fémétől, pl. az ötvözetlen acél anyagú fémüveg saválló, nagyszilárdságú, kiváló mágneses tulajdonságú stb. Gondot csak az okoz, hogy a szükséges igen gyors hűtést ( $V_h > 105$  K/s), csak nagyon vékony ( $s < 10-100$   $\mu\text{m}$ ) fóliák esetében sikerül megvalósítani, valamint hőhatására a fémüveg átkristályosodik és így visszanyeri a normál acél tulajdonságait.*

Hagyományos értelemben azonban, üvegnek azt a mesterséges terméket nevezzük, amely:

- izzó állapotra hevítve savak, bázisok vagy sók egyesüléséből keletkezik,
- túlhűtéssel átlátszó vagy áttetsző szilárd, amorf testé merevedik,
- amelynek kémiai, fizikai tulajdonságai a gyakorlat által megszabott határok között mozog.

Ilyenek a szilikát üvegek, amelyeknek fizikai tulajdonságai, viszonylag tág határok között változhatnak:

- sűrűség 2,2-6,3 [ $\text{kg}/\text{m}^3 \cdot 10^3$ ],
- húzószilárdság 3,3-8,1 [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ],
- nyomószilárdság 60-126 [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ],
- fénytörés 1,47-1,96.

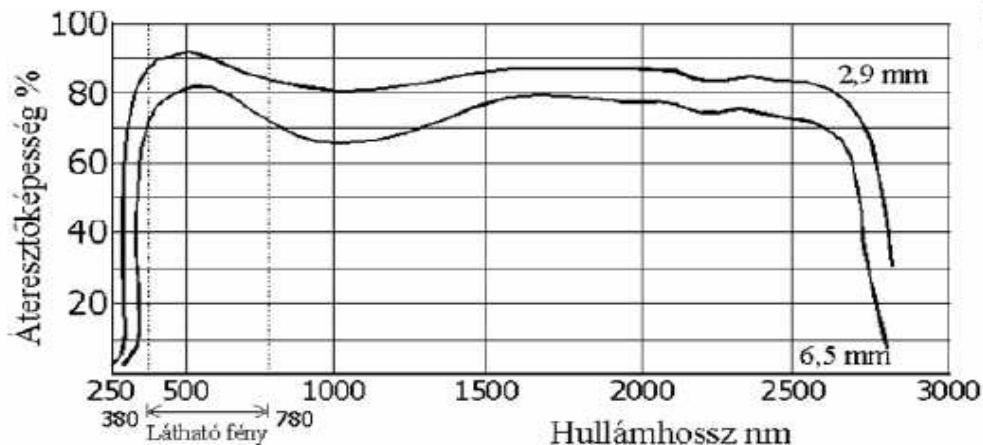
A szilikátüveg tulajdonságai:

1. fényátbocsátó képesség 60-90% ( 90°-os beesési szög mellett),
2. hőátbocsátás 40-50%,
3. ultrabolya sugarak át bocsátása 0-0,5%,
4. víz- és gázzáró,
5. nagy vegyi ellenállás (de a fluorsav megtámadja - hidrogén-fluorid [HF]),
6. hosszabb idő alatt lúgok, fém sók is megtámadják (pl. talajba került üveg „megvakul”),
7. az üveg jó elektromos szigetelő.

Az üveg **nagyon erős** anyag. A közönséges üveg húzószilárdsága nem nagy a felületi hibák (karcok) miatt, de a hibátlan üvegszál ötször olyan ellenálló, mint az acél.

Az üveg egyik nevezetes tulajdonsága az **átlátszóság**. Az elektromágneses hullámokat eltérő mértékben bocsátja át (7.19. ábra).

A látható fénytartományt átengedi, de az ultrabolya sugarakat kiszűri, csupán 0-0,5% -ban engedi át. A **kvarcüveg** az ultrabolya sugarakat viszont átengedi.



7.19. ábra Az üveg áteresztő képessége a hullámhossz függvényében

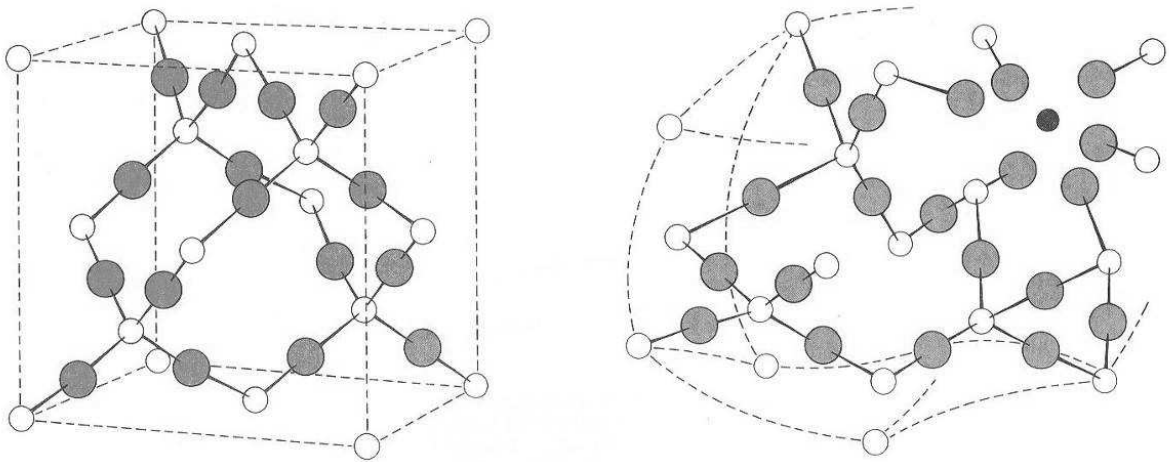
A különféle üvegtípus fényáteresztő képessége is különböző. 90°-os beesési szög mellett a hagyományos ablaküveg 90%-ban, a matt üveg 75%-ban, a huzalbetétes üveg 55%-ban engedi át a fényt.

A **szilikátüveg** is általános értelemben kerámia, mégpedig az oxidkerámiák egy jelentős csoportját képezi. Az ember több ezer év óta használja. Szerkezetére sajátos „üvegállapot” jellemző. Nem kristályos és nem amorf anyag. Szerkezete az „idő előtt megdermedt folyadék” szerkezetéhez hasonló. Szilárdulásakor kialakulnak atomcsoportok, amelyek szilárdan kapcsolódnak egymáshoz, de nem kristályosak, mert ezek nem ismétlődnek ciklikusan, szigorú szabályok szerint (7.20. ábra), mint a kristályokban (még

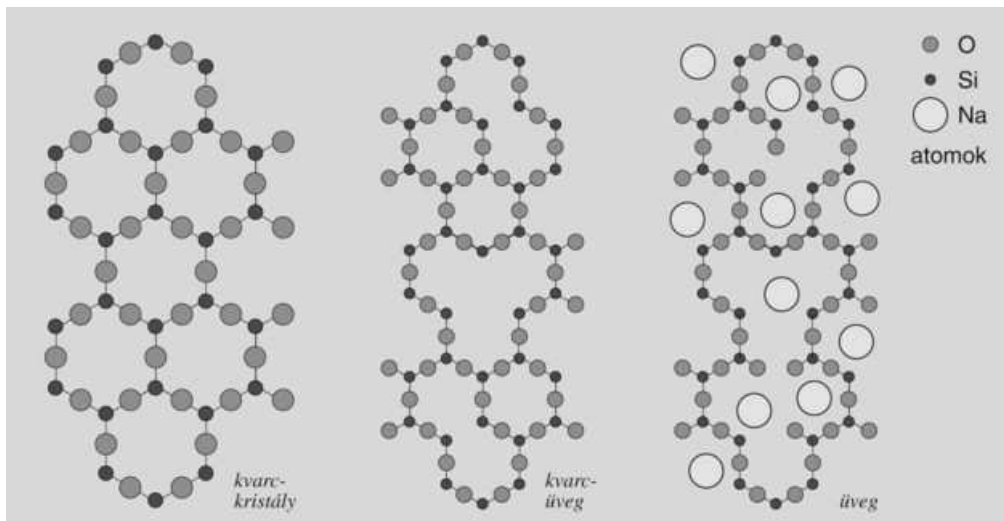
mielőtt kialakulhatott volna a szerkezet szabályossága, az üveg megdermedt).

Az üveg jellemzője a tökéletes egyeneműség, a tömör, gázzáró, hézagmentes szerkezet. Összetétele többféle lehet. Fő alkotó eleme a **kvarchomok** ( $\text{SiO}_2$ ). A tisztán kvarchomokból előállított ún. **kvarcüveg** a többi üvegfélénél keményebb, karcállóbb, átengedi az UV sugarakat, olvadáspontja igen magas,  $1750^\circ\text{C}$ .

Ha a kvarchomokhoz nátrium-oxidot, kalcium-oxidot adagolnak, és vele együtt hevítik, akkor a Ca, illetve Na ionok felbontják a  $\text{SiO}_2$  zárt szerkezetét (7.21. ábra), és így az olvadáspont jelentősen lecsökken ( $780\text{-}1000^\circ\text{C}$ ).



7.20. ábra Kristályos és üvegállapot



7.21. ábra A  $\text{SiO}_2$ -hoz adott **Na** hatása az üveg szerkezetére



Többféle összetételű üveget gyártanak. A leelterjedtebben használt üvegféle a nátronüveg (pl. ilyen az ablaküveg). Ennek alapanyaga a **kvarchomok, mészkő, nátrium-karbonát** (szóda), **fémoxidok**, mint színezékek (a réz rubint piros, a kobalt kék, a vas zöld, barna, az antimon sárga, a mangán, pedig lila színt eredményez).

Az alapanyagokhoz **üvegcserép** is adagolható **újrahasznosítás céljából**.

Az üvegfajták alkotói szerint is csoportosíthatóak. Így megkülönböztetünk:

- kvarcüveget,
- nátronüveget;
- káliüveget;
- ólomüveget;
- jénai üveget (bór-elem sóját tartalmazza) (Durán, Pyrex üveg),
- optikai üveget (korona, flintüveg) stb.

Az üveget **öblösüveg** vagy **síküveg** formában dolgozzák fel, esetleg **üvegszalat, optikai eszközöket, lencsét** készítenek belőle. Az üvegféleségek tulajdonságai összetételüktől függenek. Néhány üvegféle összetételét és fontosabb tulajdonságát a 7.5. táblázat foglalja össze.

7.4. táblázat Üvegfajták összetétele és jellemző tulajdonságaik

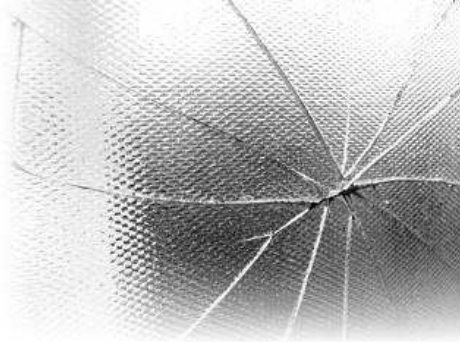
Sor - Sz.	Az üveg típusa	Összetétel [%]						Jellemző tulajdonság
		SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Egyéb anyag	
1.	kvarcüveg	>99,5						nagy olvadáspont, kis hőtágulás
2.	vycor	96				4		kis hőtágulás
3.	pyrex	81	3,5		2,5	13		hősokkal szemben ellenálló
4.	nátronüveg	74	16	5	1		4 % MgO	alacsony olvadáspont
5.	üvegszál	55		16	15	10	4 % MgO	könnyen alakítható
6.	ólomkristály	54	1		4		37 % PbO, 4 % K <sub>2</sub> O	nagy sűrűség, nagy törési mutató

Az öblös üveget fúvással, sajtolással állítják elő, míg a síküveget húzzák, hengerlik. A síküveg táblák felülete ezért mindig kissé hullámos.

Ablaküveggént ez általában nem zavaró. Szemből áttekintve az üvegen nem, de oldalvást nézve látszik, hogy kissé torzít. Ha az üvegből tükör készül, akkor a torzítás erősen zavaró, ezért a tükörüveg nem lehet hullámos. A **tükörüveget** úgy készítik, hogy a megolvadt üveget folyékony ónfürdő

felületére engedik és így szilárdul meg, vagy pedig az üvegtábla felületét síkra csiszolják.

Az üveg, mivel rideg, kemény anyag, törékeny, és úgy mondjuk „kardosan” törik (7.22. ábra). A törött üvegdarabok, szilánkok rendkívül élesek, életveszélyes sérüléseket okozhatnak. Mindenütt, ahol a balesetveszély fennáll, ott (pl. gépjárművek szélvédőjéhez, üzletek üvegajtóihoz, kirakataihoz, más, üveg berendezési tárgyakhoz stb.) biztonsági üveget kell használni.



7.22. ábra Az üveg veszélyes „kardos” törése

A biztonsági üvegek különféle típusúak lehetnek:

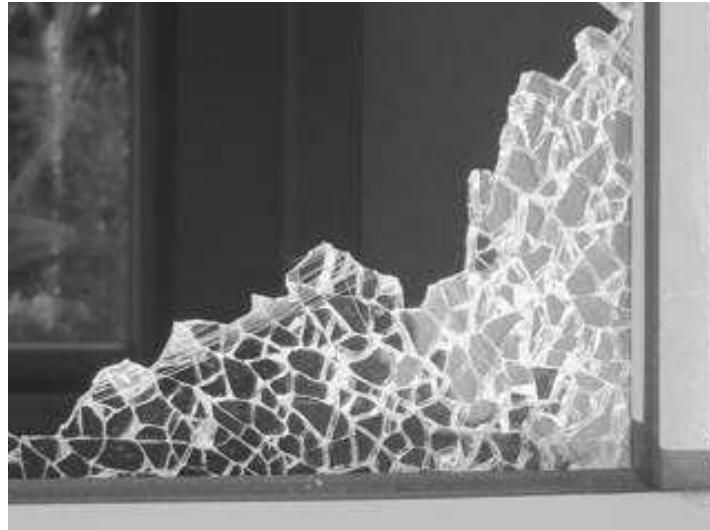
1. hőkezelt (edzett) üvegek,
2. ragasztott üvegek,
3. edzett és ragasztott üvegek

Az **edzett biztonsági üvegben** a hőkezelés hatására belső feszültség jön létre. Az üveget az ún. átalakulási hőmérséklet fölé kb. 650 °C-ra hevítve, majd légárammal egyenletesen, de gyorsan hűtve „edzik”. A hőkezelés hatására az üveg bizonyos fizikai tulajdonságai akár 2-3 szoros mértékben is javulnak (pl. hajlító-, törőszilárdság, felületi hőmérséklet-különbséggel szembeni ellenálló képesség) (7.23. ábra).



7.23. ábra Edzett üveg szilárdsága

Edzés után az edzett biztonsági üveg nem munkálható meg. Ha a felület folytonossága megbomlik, vagy túl nagy a terhelés, akkor a belső feszültség hatására apró és nem éles darabokra esik szét (7.24. ábra), amelyek nem okoznak komoly fizikai sérülést.



7.24. ábra Az edzett biztonsági üveg törése

A biztonsági üvegek másik típusa a *ragasztott biztonsági üveg*. Itt üvegrétegeket ragasztanak egymáshoz műanyaggal, pl. vinil-típusú, átlátszó műanyag fóliával. A páros számú üvegréteget és a páratlan számú műanyag réteget magas hőmérsékleten és nyomáson összepréselik. Sérülés, törés esetén a műanyag egyben tartja a szilánkokat, így nem okozhatnak sérülést (7.25. ábra).



7.25. ábra A ragasztott biztonsági üveg törése

A repülőgépek ablakainak nagy nyomást, szélsőséges hőmérsékleteket és a repülő madarak becsapódását is kell kibírniuk, ezért három vagy négy réteg üvegből állnak.

A biztonsági üveg egy harmadik típusa az előző két típus előnyeit egyesíti: apró szilánkokra törik, de a műanyagréteg összetartja, nem esik szét (7.26. ábra).



Edzett-ragasztott üveg



Csak ragasztott üveg

7.26. ábra Biztonsági üveg jellemző törési módja

Az üveg nagyon sokoldalúan felhasználható anyag, sokféle üveget gyártanak, különféle egyéb fajtái is vannak.

A **homályos üveget** homokfúvással, fluorsavas maratással állítják elő. Ott használják, hol nem kell az üveg átlátszósága, elegendő, ha áttetsző, a fény egy részét átengedi. Esetleg ilyen módon alakíthatnak ki a felületén dekoratív mintát.

**Mintás üveget** hozhatnak létre az előbbi módon, bizonyos részek takarásával.

„**Jégvirág**”-mintás üveget a felületről szilánkok lepattintásával érhetnek el. Dekoratív, plasztikus felület hozható így létre.

A **kertészüveg** nem más, mint a 2 mm vastag húzott üveg selejtes hulladéka, amit régebben kertészetekben „hollandiágyak”, melegágyak üvegezéséhez tudtak felhasználni.

A **hengerelt** vagy **öntött** síküveg nem átlátszó csak áttetsző az egyenetlen felület miatt. Leggyakoribb a *katedrál*- vagy a *recésüveg*, egyéb fajtáinak elnevezése még az „*ornaments*” üveg.

A **színes üvegek** átlátszóak, lehetnek anyagukban színesek a fénoxidok által, de lehetnek utólag festettek.

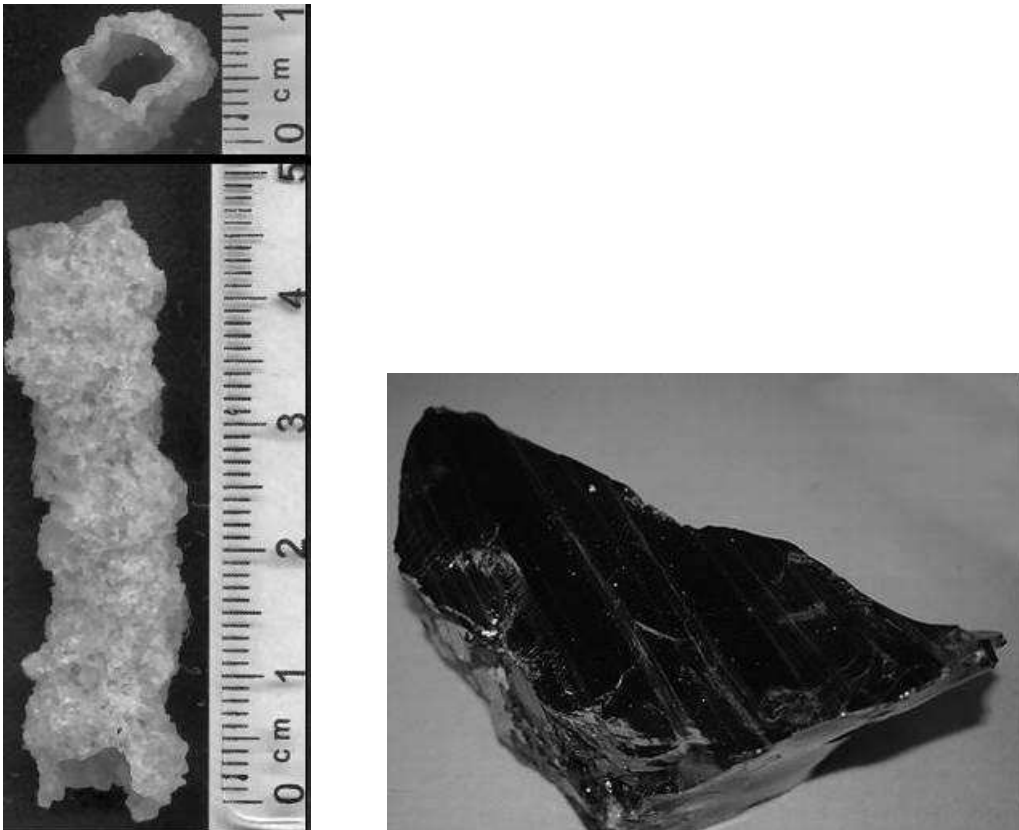
A **borított üvegek** esetében színtelen, átlátszó üvegre színes réteget olvasztanak. A borító réteg szerint lehet átlátszó vagy átlátszatlan. Fehér üveggel borított üveg az „*opálüveg*”. Lámpa búrákhoz, izzókhoz használják többek között, mert így szórt fényt ad, nem vakít.

A **tükörüveg** nem lehet hullámos, ezért ónfüdő felületén hagyják megszilárdulni (úsztatott üveg), vagy a húzott, hengerelt üveget utólag síkra csiszolják.

A **fénytani lencsék** előállítására erősen fénytörő *ólomüveget* (flintüveg) és kevésbé fénytörő káliüveget (koronaüveg és cseh kristályüveg) használnak, mert csak e két üveg összeillesztésekor nyerhetnek *akromatikus* lencséket (ezek nem bontják a fényt alkotó színeire).

*Üveg a természetben is létrejöhet*, bár inkább érdekességnek számít, különösebb gyakorlati jelentőség nélkül. A **kova** lényegében  $\text{SiO}_2$ , ami kemény rideg kőzet, élesen, kagylósan törik, ősidőkben pattintott szerszámok készítésére igen alkalmas volt.

Mivel a talaj fő alkotója kvarc, ott, ahol nagy hőhatás éri (vulkanikus tevékenység, villámcsapás), szintén üvegszerű anyagok jöhetnek létre. Villámcsapás hatására a homokban ún. „**fulgurit**” alakulhat ki, vulkáni tevékenység során keletkezik az „**obszidián**” (7.27. ábra). Az utóbbi szintén alkalmas éles törete alapján nyílhegyek, pengék készítésére.



7.27. ábra Fulgurit és obszidián, mint természetes üveg

### Hagyományos szerves műszaki anyagok

A hagyományos kerámia anyagok mellett, ma is elterjedten használunk szerves, hagyományos szerkezeti anyagféleségeket. Műszaki szempontból nagy jelentőséggel bír még ma is, pl. a fa, a bőr.

## 7.3. Fa

A fa ősi anyaga az embernek, amit nagyon sokcélúan fel tudott használni élete során. Elkíséri bölcsőtől a sírig. Szerkezeti anyagként, nyersanyagként, tüzelőanyagként egyaránt jól hasznosítható természetes anyag. Elérhetősége, könnyű megmunkálhatósága, szilárdsága, kis sűrűsége, vegyi ellenállása, hőszigetelő képessége és még számos előnyös tulajdonsága széles körű felhasználásra teszi alkalmassá. Hazánk erdőállománya, az ipari célra kitermelhető fa mennyisége nem elégíti ki a hazai gömbfa és fűrészáru igényt, ezért ezt behozatallal kell pótolni. Az erdők megóvása, a faimport mérséklése indokolja a korszerű, kevés hulladékképződéssel járó technológiák alkalmazását, a fahulladék korszerű feldolgozását.

### 7.3.1. A fa szerkezeti felépítése

A fa anyaga nem egynemű anyag. Különböző anyagrészek építik fel, szerkezete részben szabad szemmel is megfigyelhető (kéreg, háncs, bél, évgyűrűk). Ezek adják a fa **makroszerkezetét**. A sejtjeinek felépítése csak mikroszkóppal figyelhető meg. Ez adja a fa **mikroszerkezetét**.

A fa makroszkópos felépítése

A fa természetes **kompozit anyagnak** tekinthető. Húzó, hajlító igénybevétellel szembeni ellenállását a **cellulóz rostok** biztosítják, míg nyomószilárdságát a rostok között kitöltő **lignin** nagy nyomószilárdsága adja. Szerkezetéből adódik, hogy a fa tulajdonságai különbözőek szálirányban, és rá merőleges irányban, vagyis a fa **anizotrop** anyag.

A fa, különböző fajtájú sejtekből és rostokból álló szövetrendszer. A fa sejtjei három különböző feladatot látnak el:

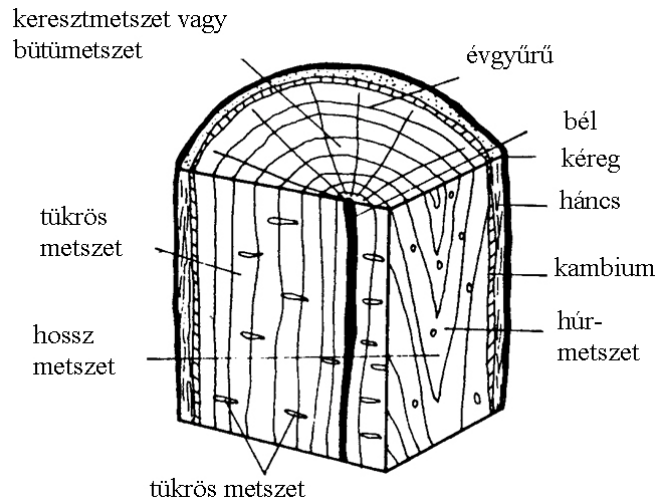
- a víz- és tápanyagszállítást,
- raktározást,
- szilárdítását.

E feladatok ellátására más és más felépítésű sejtek szolgálnak.

Az ipari felhasználásra kerülő fatörzs lényegében egy csonka kúp. A fatörzsnek alapvetően három fő metszetét különböztetjük meg (7.28. ábra):

1. A **bütümmetszet** a törzsre merőleges metszet. Jellemző rá a körkörös rajzolat, vagyis az évgyűrűk.
2. A **tükrösmetszet** a törzs tengelyén át felvett metszet (nevezik sugármetszetnek is). Jellemzője a párhuzamos rajzolat.
3. A **húrmetszet** a tengellyel párhuzamosan felvett metszet. Parabolyszerű mintázat jellemzi.

A fatörzs felépítését tekintve, kívülről befelé haladva, a következő részeket különböztetjük meg: külső kéreg, belső kéreg vagy háncs, kambium, fatest, bél.



7.28. ábra A fa szerkezete és jellegzetes metszetei

A **külső kéreg** vagy fakéreg szerepe fontos. Ez védi meg a belső részeket, az érzékeny kambium réteget a külső mechanikai behatásoktól, hőtől. A kéreg a fa növekedése folytán előálló feszültség következtében berepedezik. A **belső kéregnek** vagy **háncssejteknek** a tápanyagszállításban van nagy szerepe, a kambium sejtek hozzák létre. A háncssejtek később **kéreggé** alakulnak át.

A **kambium** élő, osztódni képes sejtek vékony rétege, amely a fatörzs vastagodását biztosítja. A kambium sejtjeinek osztódása befelé a fasejteket, kifelé a háncssejteket hozza létre.

A keresztmetszet középpontjában található a **bél**, normális növekedésű fáknál, pár mm átmérőjű kör, vagy sokszög. A bélnek csak az egészen fiatal fáknál van szerepe. A bétől kifelé haladva a **bütümmetszeten** koncentrikus körgyűrűket, az **évgyűrűket** találjuk. Ezek vastagsága néhány mm-től 1-2 cm-ig változhat. Kialakulásuk a fa növekedése során bekövetkező évszakváltozással, a vegetációs periódusokkal van összefüggésben.

Sok fajtánál a törzs belső része, barnás színe következtében megkülönböztethető a körülvevő világosabb színű résztől. A külső, világosabb rész, a növekvő évgyűrű öve, amelyet **szijácsnak** neveznek, ez szállítja a vizet, a tápanyagot, míg a belső sötétebb, idősebb rész a **geszt**, ami már nem vesz részt a tápanyagok szállításában.

### 7.3.2. A fa fizikai tulajdonságai

A fa viselkedését bizonyos környezeti feltételek mellett, alkalmasságát bizonyos felhasználásra, főleg fizikai tulajdonságai döntik el:

1. sűrűsége (térfogatsúlya),
2. nedvességtartalma,
3. szorpciója,
4. dagadása, zsugorodása,
5. hő okozta méretváltozása,
6. vezetőképessége (elektromos-, akusztikus-, hővezető képesség).
7. szilárdsági tulajdonsága.

A fa **sűrűsége**  $\text{kg/m}^3$ -ben adható meg. Ez a tulajdonság általában összefügg a fa szilárdságával. Mivel mértékét a víztartalom befolyásolja, mindig azonos módon  $0\%$  vagy  $15\%$ -os víztartalmú fára kell megadni. Faszerkezeteknél az a kedvező, ha kisebb sűrűséghez, nagyobb szilárdság tartozik.

A fának a **nedvességtartalma** változó, képes a fa vizet leadni (száradni) és vizet felvenni. A nedvességtartalom változásával, változik a fa szilárdsága, megmunkálhatósága, fűtőértéke stb. A nedvességtartalom változás térfogatváltozást, ez pedig, alakváltozást (vetemedést) idéz elő.

A száraz fa **szorpcióra** képes. Ez azt jelenti, hogy a fa, képes a levegőből, gőz formájában, vizet felvenni egy bizonyos egyensúlyi állapot eléréséig. A vízgőz a sejtfalak kapilláris rendszerének felületén halmozódik fel (a kapilláris rendszer felülete igen nagy  $20\text{-}280 \text{ m}^2/\text{cm}^3$ ).

Tehát a fa vízfelvételekor **dagad**, száradáskor **zsugorodik**. A fa anizotrop anyag, vagyis tulajdonságai, így a méretváltozása is, az anyag különböző irányában, különböző. A legnagyobb méretű alakváltozás tangenciális (érintőleges) irányban figyelhető meg, míg legkisebb az alakváltozás szálirányban. Az alakváltozási arányok a három különböző irányban:

$$a : b : c = 0,60 : 0,35 : 0,03 ,$$

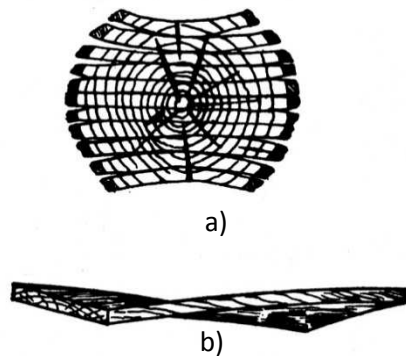
ahol **a** tangenciális irány, **b** sugárirány, **c** szálirány.

Az eltérő méretváltozások miatt a fában feszültség ébred, domborodások, homorodások lépnek fel. Ha a belső feszültségek meghaladják a szövetszerkezetét összetartó kohéziós erőket, akkor a fában *repedések* keletkeznek.

A *felfűrészelt rönkből* készült deszkák jellemző alakváltozását mutatja be a 7.29. ábra. A középső (a bél-részt tartalmazó) deszka nem vetemedik. A legnagyobb alakváltozás a széleken következik be. Az ábra bemutatja egy helytelenül tárolt deszka eltorzult alakját is. Ezért nagyon fontos a faáru



gondos és szabályos tárolása. Egyébként a hőhatás is létrehoz alakváltozást (ami szintén összefügg a nedvességváltozással).



7.29. ábra A deszka jellemző alakváltozásai  
a) alakváltozás a rönk különböző részén; b) a deszka vetemedése

A fa **rossz hővezető** (hőszigetelő). Hővezető képessége összefügg a nedvességtartalommal, térfogatsúllyal, száliránnyal. A fa szálirányban mintegy kétszer jobban vezeti a hőt, mint tangenciális irányban vagy sugárirányban.

Jó **elektromos szigetelő**, de ezt a tulajdonságát is a nedvességtartalom döntően befolyásolja. A telítettségi állapot közelében a fa vezetőképessége a víz vezetőképességi értékéhez tart. Száraz állapothoz képest a nedves fa ohmikus ellenállása egy milliomodára csökken. A fa ellenállása függ az anatómiai iránytól is. Szálirányban, pl. fele akkora az ellenállás, min rá merőleges irányban. Az abszolút száraz fának az ellenállása szálirányban  $1, - 1,5 \cdot 10^{12}$  ohm.

A fa **akusztikai tulajdonságai** is függnnek a száliránytól. A fa a hangot szálirányban olyan jól vezeti, mint a fémek. Vezetőképessége a merőleges irányban 30-40%-kal kisebb. Ezért használható a faburkolat a falak hangelnyelő burkolataként (visszhang jelenségének megszüntetésére).

A mechanikai tulajdonság tekintetében a fa, fajtájára, a terhelés irányára, erősen változó értékeket mutat.

Szálirányban jó a fa szilárdsága, de a **húzó igénybevételt** mégis célszerű kerülni, a rejtett csomók, repedések, az inhomogenitás miatt.

A fa **nyomószilárdsága** is érdekesen alakul. Más szálirányban és más rá merőleges irányban, valamint jelentősen függ a nedvességtartalomtól is. Szálirányban a nyomó igénybevétel hatásra a fa széthasad. Szálirányban terhelve nem mutatkozik általában látható repedés, csak belső roncsolódás. Szálirányban a nyomószilárdság csupán fele, az ilyen irányú húzószilárdságnak.

A fa **hajlításakor** az egyik oldalon nyomó a másik oldalon húzó igénybevétel ébred. Az előbbieket szerint a szakítószilárdság kétszerese a nyomószilárdságnak, ezért nem lineáris a feszültségeloszlás a hajlított farúdban. Ezen okok, valamint az anizotropia miatt nehéz megnyugtató

módon hajlítószilárdság értékeket megadni. Ezért a szabványok a megengedett feszültségértékeket nagybiztonsággal, óvatosan állapítják meg. Vizsgálható a fa viselkedése dinamikus hatással szemben. Az ütőmunka vizsgálattal eltört minták törete alapján megállapítható a törés jellege is. A szálkás töret szívós fásra utal. A töret minél szálkamentesebb, esetleg „lépcsős”, a fa annál ridegebb.

A fa keménysége is jellemző, összefügg a szívósságával, ridegségével és így a felhasználhatósággal. A keménység mérésére a Brinell-elvhez hasonló módszert használnak. Golyót nyomnak a bütüfelületbe a szálak irányában (ún. Janka-keménység) vagy a szálakra merőlegesen (Brinell-keménység). A benyomó erőnek és a benyomat felszínének a hányadosa adja a keménység értékét.

A fa szilárdságát a fa állapota betegségei, hibái jelentősen befolyásolják.

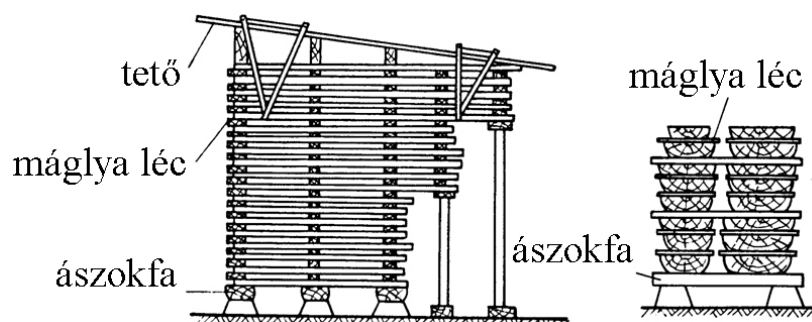
### 7.3.3. A fa szárítása

A fa rostjainak falaiban számtalan pórus és kapilláris van és így a rostok óriási belső felülettel rendelkeznek. E belső felületen a víz részben *adszorpció* útján, másrészt, a kapillárisokban *kondenzáció* folytán kötődik.

A levegő és a fa, illetve a rostok nedvességtartalma között állandó hőfokon egyensúlyi állapot áll elő. Ha tehát a levegő nedvességtartalma állandó hőfok mellett nő, úgy a fa a levegőből nedvességet vesz fel. A levegő relatív nedvességtartalmának csökkenésekor a fa nedvességet ad át a levegőnek, tehát szárad. A fa **nedvességtartalmának változását** természetesen a **fa méretének változása** követi.

A **fa természetes szárításakor** a faanyag helyes tárolása a fő szempont. A rönköket, illetve a fűrészárut nem szabad egymásra fektetve tárolni, hanem alátét lécekkel gondoskodni kell a megfelelő hézagokról, hogy a levegő minden oldalon érintkezve a fa felületével, egyenletesen fejtsse ki szárító hatását. Tekintettel arra, hogy a száradás a szálirányban a nagyobb, a bütü bemázolásáról, vagy lefedéséről gondoskodni kell.

A természetes szárítás igen hosszú időt, éveket, és nagy helyet vesz igénybe. A 7.30. ábra puha- és keményfa **máglyázását** mutatja.



7.30. *ábra* A fűrészáru szabályos tárolása (máglyázás)  
a) puhafához; b) keményfához

A mesterséges szárítási módok közül leggyakrabban az elpárologtatásos szárítást alkalmazzák. Itt szárító közeg a forró levegő (80 °C hőmérséklet alatt) és a levegőben lévő nedvességnek megfelelő vízgőz keveréke.

A folytonos működésű csatornaszáritók egyes szakaszaiban különböző léghőmérsékletek és légnedvesség tartalmak állíthatók be. A kocsira máglyázott faanyag meghatározott ütemben kerül az egyes szakaszokba.

A nagyfrekvenciájú elektromos, valamint infrasugaras szárítás csak korlátozott méretekig alkalmazható gazdaságosan.

#### A fa hibái és betegségei

A fa hibái közül elsősorban az **ággöcsöket**, vagy **csomókat** kell megemlíteni. Ezek az ágképződmények maradványai. Ha a fa döntésekor az ág élő volt, úgy az ággöcs a fa törzsével összenőtt és így a fa mechanikai tulajdonságait kevésbé befolyásolja.

Régebbi, elhalt ágak görcsei a fa testével már nincsenek szerves összeköttetésben, a fa túlnövi azokat, úgy hogy ezek a kieső görcsök felületük arányában csökkentik a fa keresztmetszetét, és feszültségtorlódást is okoznak.

A fa anizotróp tulajdonsága következtében a nedvességtartalom változások hatására fellépő méretváltozások a fa különböző részein jelentősen eltérőek. Ennek következtében akkora feszültségek állhatnak elő, amelyek a fa **repedését** okozhatják. A szijacs jobban zsugorodik, mint a geszt, ugyancsak jobban zsugorodik a rönknek és a fűrészelt árunak a bütühöz közel eső része. Így gyakoriak a hosszirányú, felületi és az évgyűrűk mentén jelentkező gyűrűs repedések.

A fa betegségeit **baktériumok** és **gombák** okozzák. Az ún. farontó gombák a fa anyagából táplálkoznak. Az általuk megtámadott fa többé-kevésbé elveszti szilárdságát. A gombák által megtámadott fa megvörösödik, majd megbarnul, végül szétesik. Ez az ún. **vörös korhadás**.

A gombák másik része a lignint támadja meg. Az ilyen fák megfehérednek, ez az ún. **fehér korhadás**.

A fa kémiai hatásoknak igen jól ellenáll, ezért élettartama, amennyiben állati és növényi kártevők ellen megvédjük, igen hosszú, különösen, ha állandóan száraz állapotban, vagy állandóan víz alatt tartjuk.

A gombás, baktériumos és állati kártevők elleni **védekezés** történhet a faanyag felületének védőszerekkel való bevonása (mázolás, fúvatás), a fa részleges-, vagy teljes telítése útján.

### 7.3.4. Fatermékek

A faféléket és a belőle készült termékeket különféle szempontok szerint lehet csoportosítani. Felhasználásuk területe szerint lehetnek **szerkezeti vagy épületfák**, lehetnek **egyéb célra használt** termékek (papírgyártásra, faszesz, faszén előállításra használt fafélék).

Az előbbi csoportból legfontosabbak a **fűrészárúk**. Ezeket a fatörzs hosszirányú fűrészelésével állítják elő oly módon, hogy legalább két lapjuk párhuzamos. Ezek felhasználása még hosszú ideig nélkülözhetetlen lesz az építőiparban, vagon és közlekedőeszközök gyártásakor, sportszeriparban, bútorigarban, mezőgazdaságban stb.

A fűrészeltáru megnevezése mérettől függően:

- |   |                           |
|---|---------------------------|
| - 18-38 mm vastagságig                  | <b>deszka,</b>            |
| - 40- 118 mm-ig                         | <b>palló,</b>             |
| - 12x12 mm-től 38x48 mm szelvényméretig | <b>léc,</b>               |
| - 48x48 mm-től 100x100 mm-ig            | <b>záróléc (heveder),</b> |
| - 98x120 mm-től 300x600 mm-ig           | <b>fűrészelt gerenda.</b> |

Ipari féltermék még a **faragott gerenda** és a **furnér**. A **furnérlapokat** 0,2-5 mm vastagságban, gyalulással, illetve ún. *hámozással* állítják elő.

**Szélezett a fűrészáru**, ha nemcsak a két lapja és a bütüje, de a szélei is fűrészelték.

**Rétegelt lemez** gyártásakor a „telefát” vékony lapokra vágják fel, és a lapokat úgy ragasztják össze, hogy a szálirány a szomszédos lapokon egymásra merőleges legyen.

Az **enyvezett lemezt** 3, 5, 7 vagy több, de mindig páratlan számú furnérlapból ragasztják össze úgy, hogy az egymásra ragasztott furnérok száliránya egymásra merőleges legyen.

**Rétegelt lemezek** készítésére elsősorban a nyírfa alkalmas, de a nyár-, bükk-, dió-, kőris- és a hársfát is használják erre a célra.

Ha a **furnér** rétegeket nem szálirányra merőlegesen, hanem mindig 45°-kal elfordítva ragasztják össze, akkor az ún. **csillag alakú lemezt** kapjuk, amelynek szilárdsági szempontból a kiegyenlítetttsége minden irányban igen jó.

Amennyiben a faforgácsból, vagy farostokból ragasztás és sajtolás útján lemezeket állítanak elő, úgy tulajdonképpen a fától egészen különböző anyagot kapunk. A **faforgácslemezt** szintetikus kötőanyaggal, megfelelő hőfok és nyomás mellett állítják elő. Felhasználási területe a bútorigar és az építőipar.

A **farostlemezt** vizes szuszpenzióból, műgyanta ragasztóanyag adagolásával állítják elő.

### **7.3.5. A faanyag telítése és felületi kezelése**

A fa telítése **védő** és **élettartam növelő** hatású. A telítésre használható anyagok lehetnek:

- vízben nem oldódók,
- vízben oldódók.

A használatos **vízben oldódó telítő szerek** a rézszulfát (rézgalic), higanyklorid (sublimát), különféle fluor, arzén, króm vegyületek keverékei, továbbá egyes gombaölő hatású szerves vegyületek.

A **vízben nem oldhatók** a kőszén-kátrányolaj és a barnaszén-kátrányolaj 22, 33, 78 és 67%-os arányú, vagy a kőszénkátrány és az ásványolaj hasonló arányú keveréke.

Az olajjal telített faanyag nem használható **tűzveszélyes helyeken**. Az így telített fa, az emberi testtel érintkezve **bőrfertőzést** okozhat. Szaga **kellemetlen**.

A **fa felületének kezelése** a fa „nemesítésének” egyik módja. A helyesen kiszárított fa sem érzéketlen a nedvességfelvétellel szemben. A felületi kezelés célja a nedvességváltozás és ennek következtében előálló **méretváltozás csökkentése**, továbbá a felület **keményiségének fokozása**, valamint a felület **színezése, fényezése**.

## **7.4. Természetes bőr**

Az állati bőroket az ember ősidők óta felhasználja, bár szerepe, jelentősége változott a történelem során. Bár a műbőrök megjelenése egyre inkább háttérbe szorítja használatukat, a természetes bőr rendelkezik olyan tulajdonságokkal, amelyekkel más anyagok, pl. a műbőrök sem. A bőroket a műszaki gyakorlat még ma is számos területen felhasználja, pl. géphajtó szíjakat, köt- és varrószíjakat, tömítéseket, bőrmembránokat, bútorbevonatokat, törloket, súrlódó felületek borítását, hő elleni védőruházatot stb. készítenek belőlük.

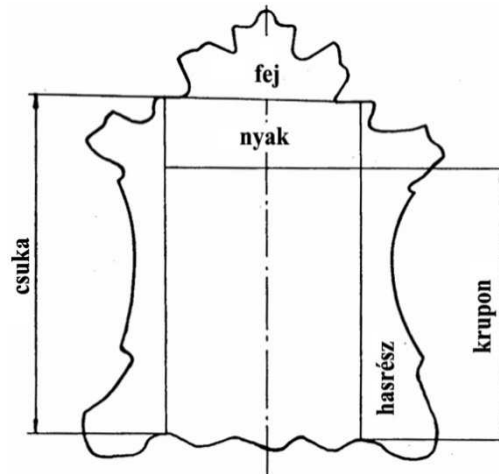
A bőr tulajdonságai, felhasználhatósága többféle tényezőtől függ:

- a bőrt adó állat fajtájától,
- a bőr a bőrteríték melyik részéről származik,
- a kikészítési módtól stb.

Többféle állat bőrért felhasználják ipari célokra, pl. a szarvasmarha, bivaly, ló, sertés, juh, kecske stb. bőrért, felhasználási céltól függően.

A bőr az állat különböző testrészein nem azonos minőségű. Az egyes részek elnevezését a 7.31. ábra szemlélteti. Legértékesebb rész a hátdarab (krupon). A bőr ezen a részen a legszilárdabb, legrugalmasabb, legtömörebb, vastagsága itt egyenletes. Ez a rész az egész terítéknek, mintegy 43-45 %-át adja.

A további részeket, mint a nyak, a homlok és pofa, a has és a láb. Ezek a részek alárendeltebb felhasználási területeken hasznosíthatók.



7.31. ábra A bőr terítése

A bőr feldolgozása

Amíg a lenyúzott bőrből termékké feldolgozható bőr lesz, addig különféle feldolgozási folyamaton kell keresztülmenni, amelyek a következők:

1. tartósítás,
2. előkészítés,
3. cserzés,
4. kiáztatás, szárítás,
5. kikészítés.

A lenyúzott bőroket általában nem azonnal dolgozzák fel, ezért ezeket azonnal (24 órán belül) **tartósítani kell**. A tartósítás célja a baktériumok, gombák károsító hatásának megakadályozása. A tartósítás történhet sózással, szárítással, savas kezeléssel. A szárítással tartósított bőr rostjai jobban összetapadnak, ezért ebből merevebb bőr lesz.

A tartósított bőrt **előkészítik**. Az előkészítés feladata egyrészt a tartósítószer, szennyeződések eltávolítása, az elvont víz pótlása, másrészt eltávolítják a bőr felületéről a hájas rétegtől, a szőrzettől, a felhámtól. Az így nyert, és már csak irhából álló nyersbőr a **pöre**.

A nyersbőr végleges tartósítása, a felhasználásnak megfelelő tulajdonságok kialakítása a **cserzéssel** történik meg.

A cserzőanyag a bőrre víztelenítő hatást gyakorol, miközben a bőr molekulaszervezetében olyan kötésekkel létesít, amelyek erősítik a bőr

szövetét, a rostokat pedig elszigetelik egymástól. A cserzőanyag és a cserzési eljárás nagymértékben befolyásolja a készbőr tulajdonságát, jellemzőit.

A **növényi eredetű** cserzősavak általában nagy molekulású, fenol jellegű anyagok. Különböző fafajták kérgéből (tölgy fenyő fűz nyír stb.), magából a faanyagból (tölgy, gesztenye stb.), levélfélékből, termésekből, gyökerekből vonják ki őket. Ezeket, az anyagokat általában olyan nehéz bőröknél alkalmazzák, amelyekből talpbőrt, gépszíjat vagy más műszaki bőrt készítenek. A cserzés eredményeként erős, szívós, tömött, sárgás vagy vörösesbarna színű bőrt kapunk. Ezzel a módszerrel készül a műszaki bőrök legnagyobb része.

Az **ásványi eredetű** cserzőanyagok különböző fémsók. Komolyabb jelentősége egyes króm sóknak és kisebb mértékben a timsónak (kálium-alumíniumsulfát) van. A króm sós cserzésű bőr, szívós, nagy szilárdságú, kis nyúlású, a forró víz hatásának is jól ellenáll, vágási felülete fehér színű. A timsó azonban hideg vízzel részben, forró vízzel teljesen kimosódhat, így ezt a módszert csak olyan bőröknél lehet alkalmazni, amelyek nedvességgel nemigen érintkeznek (pl. bélésbőr, kesztyű). A vízállóság faggyúval történő telítéssel javítható.

Felhasználnak cserzésre állati, növényi és ásványi **zsiradékokat** is. Az állati zsiradékok közül a halak, fókák; bálnák zsírja, valamint a tojás sárgája a növényiek közül a repce- és lenolaj, az ásványi eredetűek közül a petróleum egyes lepárlási termékei (világító- és kenőolajok vazelin, paraffin) alkalmas erre a célra.

A zsiradékokkal cserzett bőr halványsárga színű, igen lágy és simulékony, vízzel és szappannal mosható, száradás után eredeti lágyságát visszanyeri. Használják még **szintetikus** (mesterségesen előállított) szerves cserzőanyagokat. Ezek egy részét valamely természetes cserzőanyag kíséretében használják a hatás javítására, más részük önállóan is alkalmazható.

**Cserzés után a bőroket kiáztatják**, hogy a felesleges cserzőanyagot eltávolítsák belőlük. E művelet nélkül a bőrt később sötétebbé, foltossá válhat. A műveletet **szárítás** követi.

A cserzést követő **kikészítő** műveletek során kapja meg a bőr végleges, tulajdonságait. Esztétikai szempontból fontos a bőr **színezése** vagy **festése**.

A bőrök felhasználhatóságát befolyásoló fontosabb tulajdonságok a sűrűség, porozitás, szilárdság, kopásállóság, vízzel szembeni viselkedés, légáteresztő képesség, öregedési hajlam.

# Ábrajegyzék

## 1. fejezet ábrái

- 1.1. ábra A köbös kristályrácsban rendezetten elhelyezkedő részecskék
- 1.2. ábra A kristályok hétféle tengelyrendszere
- 1.3. ábra Kristályos szilárd testek atomjai között működő erők
- 1.4. ábra Kovalens kötés
- 1.5. ábra Az ionos kötés kialakulása a NaCl kristályrácsban
- 1.6. ábra A molekula kötésben résztvevő atomokban pozitív és negatív töltés súlypontja nem esik egybe
- 1.7. ábra Vázlat a Miller-index fogalmának értelmezéséhez
- 1.8. ábra Egyszerű köbös térrács jellemzői
- 1.9. ábra Térközepes köbös rács jellemzői
- 1.10. ábra Lapközepes köbös térrács jellemzői
- 1.11. ábra A hexagonális rács felépítése
- 1.12. ábra Szubsztitúciós rácshiba
- 1.13. ábra Intersztíciós rácshiba
- 1.14. ábra Frenkel féle rácshiba
- 1.15. ábra Schottky-féle rácshiba
- 1.16. ábra Éldiszlokáció
- 1.17. ábra Csavardiszlokáció modellje
- 1.18. ábra A rácshiba megállapítása Burgers-körrel
- 1.19. ábra Éldiszlokáció csúszó mozgása, egyszerű köbös rácsban (a csúszás fázisai)
- 1.20. ábra Éldiszlokáció kúszása, üres rácshely közvetítésével
- 1.21. ábra Éldiszlokáció kúszása a diszlokáció alá beépülő atom (atomsor) közvetítésével
- 1.22. ábra Két diszlokáció egyesülése és megsemmisülése
- 1.23. ábra Üres rácshely keletkezése két éldiszlokáció találkozásakor
- 1.24. ábra A Frank-Read diszlokáció forrás működése
- 1.25. ábra A diszlokációk vándorlása és felsorakozása az akadály előtt
- 1.26. ábra *A kiválások hatása a diszlokációk mozgására*
- 1.27. ábra Felületi rácshibák
- 1.28. ábra Kristályrács kialakulása
- 1.29. ábra A krisztallitok kialakulása
- 1.30. ábra A szemcseméret kialakulását befolyásoló tényezők
- 1.31. ábra Berendezés a hűlési görbék felvételéhez
- 1.32. ábra Hűlési görbék
- 1.33. ábra A színvas hűlési görbéje
- 1.34. ábra Állapotábra szerkesztése hűlési görbékből
- 1.35. ábra Kétalkotós ideális egyensúlyi diagramok (Thamman-görbék)
- 1.36. ábra Két, egymást korlátlanul oldó fém állapotábrája
- 1.37. ábra A kétalkotós egyensúlyi diagram olvasása, emelőszabály
- 1.38. ábra Két, egymást csak folyékony állapotban oldó fém állapotábrája



- 1.39. ábra Két, egymást szilárd állapotban csak korlátozottan oldó fém állapotábrája
- 1.40. ábra Két, egymást szilárd állapotban nem oldó fém állapotábrája
- 1.41. ábra Két egymást szilárd állapotban nem oldó fém állapotábrája
- 1.42. ábra Vas-szén ikerdiagram
- 1.43. ábra Vas-vaskarbid állapotábra (hipereutektikus öntöttvas átalakulása)
- 1.44. ábra Hipoeutektikus öntöttvas átalakulása
- 1.45. ábra Ausztenit-perlit átalakulás
- 1.46. ábra Hipereutektoidos acél metastabilis átalakulása
- 1.47. ábra Hipoeutektoidos acél metastabilis átalakulása
- 1.48. ábra Hipereutektikus öntöttvas stabilis átalakulása
- 1.49. ábra Hipoeutektikus öntöttvas stabilis átalakulása
- 1.50. ábra Maurer-diagram
- 1.51. ábra Greiner-Klingenstein diagram
- 1.52. ábra Alumínium hülési görbéje
- 1.53. ábra Al-Cu ötvözetek egyensúlyi diagramja
- 1.54. ábra Al-Si ötvözetek egyensúlyi diagramja
- 1.55. ábra Cu-Zn ötvözetek egyensúlyi diagramja
- 1.56. ábra Cu-Sn ötvözetek egyensúlyi diagramja

## **2. fejezet ábrái**

- 2.1. ábra A szabványos próbatest betűjelzése
- 2.2. ábra Öntöttvas próbatest
- 2.3. ábra Szakítógépek ingás mechanikus erőméréssel és mechanikus nyúlásméréssel
- 2.4. ábra Kis szénttartalmú acél szakítódiagramja
- 2.5. ábra A próbatest alakváltozása a szakítás folyamán
- 2.6. ábra Különböző fémek jellegzetes szakítódiagramja
- 2.7. ábra Terhelt állapotban mért egyezményes folyáshatár meghatározása
- 2.8. ábra Egyezményes (mérnöki) rugalmassági határ meghatározása
- 2.9. ábra Valódi feszültség változása a valódi nyúlás függvényében
- 2.10. ábra Kúszás és relaxáció vizsgálat
- 2.11. ábra Nyomóvizsgálat
- 2.12. ábra Nyomódiagramok a) öntöttvas, b) nemesített acél, c) lágyacél, d) ólom
- 2.13. ábra Csavaróvizsgálat a) elvi vázlat, b) próbatest
- 2.14. ábra Nyíróvizsgálat
- 2.15. ábra Vázlat a Brinell- keménység kiszámításához, a keménységmérő berendezés
- 2.16. ábra Poldi-kalapács
- 2.17. ábra Vickers-vizsgálat
- 2.18. ábra A Rockwell-keménységmérés elvi vázlata

- 2.19. ábra Bemetszett próbatest ütővizsgálata
- 2.20. ábra Az átmeneti hőmérséklet meghatározása
- 2.21. ábra A törésmechanikában előforduló három jellegzetes igénybevétel
- 2.22. ábra Szabványos próbatestek: hajlítópróba a  $K_{IC}$  meghatározásához; C-T próba a  $K_{IC}$  meghatározásához
- 2.23. ábra Diagram a próbatest vastagságának megválasztásához
- 3.24. ábra Elmozdulásérzékelő kialakítása
- 2.25. ábra Jellegzetes terhelés-elmozdulási diagramok
- 2.26. ábra A törési szívóssági vizsgálat próbatestjeinek geometriai tényezői
- 2.27. ábra A képlékeny alakváltozás zónája a repedés csúcsa előtt
- 2.28. ábra A törésmechanikai méretezés elve
- 2.29. ábra Elmozdulásmérés helyének kialakítása
- 2.30. ábra Jellegzetes terhelés-elmozdulás diagram
- 2.31. ábra Terhelési spektrumok
- 2.32. ábra Terhelési módok
- 2.33. ábra Fárasztási elvek
- 2.34. ábra Forgó-hajtogató fárasztások
- 2.35. ábra Hiszterézis-hurok keletkezése
- 2.36. ábra A fáradt törés keletkezése
- 2.37. ábra A Wöhler-görbék felvétele
- 2.38. ábra Ciklus szám törésig
- 2.39. ábra Technológiai próbák
- 2.40. ábra A hajlítóvizsgálat jelei
- 3.41. ábra A peremezővizsgálat jelei
- 2.42. ábra A vizsgálat elrendezése
- 2.43. ábra Jominy-véglapedző próba
- 2.44. ábra A tömegvesztéssel kifejezett korróziósebesség
- 2.45. ábra Korrózió mérési módja
- 2.46. ábra A *Le Chatelier* rendszerű fémmikroszkóp
- 2.47. ábra A tárgylencse apertúrája
- 2.48. ábra Szemcsenagyság vizsgálat
- 2.49. ábra A röntgensugaras szerkezetvizsgálatok elve
- 2.50. ábra A röntgen szerkezetvizsgálatok elvi vázlata
- 2.51. ábra A mágneses repedésvizsgálat elve
- 2.52. ábra Repedés kimutatása örvényárammal
- 2.53. ábra A jelzőfolyadékos repedésvizsgálat elve
- 2.54. ábra A röntgenvizsgálat vázlata
- 2.55. ábra Ultrahangvizsgálat
- 2.66. ábra Ferdén besugárzott ultrahang útja párhuzamos oldalakkal határolt tárgyban
- 2.57. ábra Akusztikus emissziós eseményeket mérő elrendezés
- 2.58. ábra Szerszámtörésből származó aktivitásváltozás forgácsoló megmunkálásnál

### 3. fejezet ábrái

- 3.1. ábra A timföldgyártás folyamata

- 3.2. ábra *A réz kohósításának folyamata*
- 3.3. ábra *A vasérc kohósításának folyamata*
- 3.4. ábra *A nagyolvasztó felépítése*
- 3.5. ábra *A nagyolvasztó metszetének vázlat képe és a hőmérsékletzónák*
- 3.6. ábra *A Bessemer-konverter vázlata*
- 3.7. ábra *A Siemens-Martin kemence vázlata*
- 3.8. ábra *Az LD konverter vázlata*
- 3.9. ábra *Indukciós kemence vázlata*
- 3.10. ábra *Ívkemence vázlata*
- 3.11. ábra *Tusköntés a) felső öntésű; b.) alsó öntésű*
- 3.12. ábra *Különböző csillapítású acéltuskók keresztmetszete*
- 3.13. ábra *Folyamatos acélöntés*
- 3.14. ábra *Öntvehengerlés elve*
- 3.16. ábra *A porkohászati gépalkatrészgyártás folyamatábrája*
- 3.17. ábra *Forgácsoló szerszámanyagok keménységének változása a hőmérséklet függvényében*
- 3.15. ábra *A por sajtolása a.) töltőállás; b.) sajtoló állás; c.) kilökő állás*
- 3.18. ábra *Bevonatolt keményfém lapka szerkezete*

#### **4. fejezet ábrái**

- 4.1. ábra *Az átalakulási hőmérsékletek változása az egyensúlyi diagramban*
- 4.2. ábra *Az ausztenit-perlit átalakulás időszükséglete a hőmérséklet (túlhűtés) függvényében*
- 4.3. ábra *Az eutektoidos összetételű acél IHÁ diagramja*
- 4.4. ábra *Az ausztenit bainitté alakulása*
- 4.5. ábra *Az ausztenit martenzitté alakulásának vázlata*
- 4.6. ábra *A szénttartalom hatása a  $\gamma$ - $\alpha$  átalakulás során*
- 4.7. ábra *Izotermikus átalakulási diagramok*
- 4.8. ábra *Átalakulási diagramok folyamatos hűtés esetén*
- 4.9. ábra *Normalizálás*
- 4.10. ábra *Krisztallitok alakváltozása képlékeny alakítás hatására*
- 4.11. ábra *Újrakristályosítás*
- 4.12. ábra *Diffúziós hőkezelés*
- 4.13. ábra *Feszültségcsökkentő izzítás*
- 4.14. ábra *Teljes kilágyítás*
- 4.15. ábra *Normalizáló lágyítás*
- 4.16. ábra *Izotermális lágyítás*
- 4.17. ábra *Ausztenitre lágyítás*
- 4.17. ábra *Ausztenitre lágyítás*
- 4.18. ábra *Közönséges edzés*
- 4.19. ábra *Indukciós hevítés*
- 4.20. ábra *A közvetlen hevítés módja*
- 4.21. ábra *Impulzusosan edzett szalagfűrészes*
- 4.22. ábra *Lézersugaras edzés*
- 4.23. ábra *Síkfelület haladó folyamatos lángedzése*
- 4.24. ábra *Kombinált edzés*

- 4.25. ábra *Lépcsős edzés*
- 4.26. ábra *Mélyhűtés*
- 4.27. ábra *Mesterséges öregítés*
- 4.28. ábra *Izotermális edzés*
- 4.29. ábra *Patentírozás*
- 4.30. ábra *Huzalpatentírozó berendezés*
- 4.31. ábra *Nemesítés*
- 4.31. ábra *Nemesítés*
- 4.32. ábra *A megeresztés hatása az ötvözetlen acél tulajdonságaira*
- 4.33. ábra *A "k" tényező meghatározása nemesítéshez*
- 4.34. ábra *Cementálás*
- 4.35. ábra *Dobozba csomagolás cementáláskor*
- 4.36. ábra *Betétedzések fajtái*
- 4.37. ábra *Nitridálás*
- 4.38. ábra *A nitridált kéreg vastagsága*
- 4.39. ábra *Nitrocementálás, karbonitrálás*
- 4.40. ábra *Alitálás*
- 4.41. ábra *Kromálás*
- 4.42. ábra *Szilikálás*

## **6. fejezet ábrái**

- 6.1. ábra *Vas-szén ötvözetek széntartalom, felhasználás és technológiai tulajdonság szerinti osztályozása*
- 6.2. ábra *A vas-króm-nikkel háromalkotós egyensúlyi diagram 650 °C-os metszete*

## **7. fejezet ábrái**

- 7.1. ábra *A műanyag molekuláris szerkezete*
- 7.2. ábra *Másodlagos szerkezetek*
- 7.3. ábra *Harmadlagos szerkezetek*
- 7.4. ábra *A műanyagok eredet szerinti csoportosítása*
- 7.5. ábra *Az etilén polimerizációs fázisai és a polimer láncszerkezete*
- 7.6. ábra *A fenoplaszt polikondenzációs folyamata*
- 7.7. ábra *A poliuretán poliaddíciós folyamata*
- 7.8. ábra *Nagymolekulájú polimerek feszültség-alakváltozás mechanizmusa*
- 7.9. ábra *A társító anyagok különböző formái kompozitokban*
- 7.10. ábra *A műanyagok csoportosítása a műszaki követelmények szerint*
- 7.11. ábra *A szénatomok kovalens kapcsolódása*
- 7.12. ábra *Természetes nyers gyémánt*
- 7.13. ábra *Grafit és a grafit rácsszerkezete*
- 7.14. ábra *Lemezes grafit a szürke öntöttvasban*
- 7.15. ábra *Újabb szénrácstípusok*
- 7.16. ábra *Kerámiák háromalkotós rendszere*
- 7.17. ábra *Elektromos főzőlap üvegkerámiából*
- 7.18. ábra *Korszerű kerámiák felhasználása*
- 7.19. ábra *Az üveg áteresztő képessége a hullámhossz függvényében*

- 7.20. ábra Kristályos és üvegállapot
- 7.21. ábra A  $\text{SiO}_2$ -hoz adott **Na** hatása az üveg szerkezetére
- 7.22. ábra Az üveg veszélyes „kardos” törése
- 7.23. ábra Edzett üveg szilárdsága
- 7.24. ábra Az edzett biztonsági üveg törése
- 7.25. ábra A ragasztott biztonsági üveg törése
- 7.26. ábra Biztonsági üveg jellemző törési módja
- 7.27. ábra Fulgurit és obszidián, mint természetes üveg
- 7.28. ábra A fa szerkezete és jellegzetes metszetei
- 7.29. ábra A deszka jellemző alakváltozásai
- 7.30. ábra A fűrészáru szabályos tárolása (máglyázás)
- 7.31. ábra A bőr terítése

# Táblázatjegyzék

## 1. fejezet táblázatai

- 1.1. táblázat Rácstípusok jellemzői
- 1.2. táblázat Az ötvözet alkotóinak mennyisége és összetétele
- 1.3. táblázat A szín vas néhány jellemző tulajdonsága

## 2. fejezet táblázatai

- 2.1. táblázat Korróziós fokozatok (csoportok)
- 2.2. táblázat A korrózió minősítéséhez szükséges jellemzők és mérések

## 3. fejezet táblázatai

- 3.1. táblázat Fémek gyakorisága a földkéregben, ércek fémtartalma
- 3.2. táblázat A kohóalumínium összetétele
- 3.3. táblázat A vasérc fajtái
- 3.4. táblázat Érckoncentrátumok alkotói és azok mennyisége
- 3.5. táblázat Koks jellemzői
- 3.7. táblázat Egy korszerű nagyolvasztó főbb méretei és jellemzői
- 3.8. táblázat A nyersvas összetétele
- 3.9. táblázat A nyersvasgyártás anyagai
- 3.10. táblázat Az ívkemencék fontosabb adatai
- 3.11. táblázat Elektroacélok összetétele
- 3.12. táblázat Fémporok előállítási módszerei

## 4. fejezet táblázatai

- 4.1. táblázat Hőátadási teljesítmények

## 5. fejezet ábrái

- 5.1. ábra Szállítószalagos alagútkemence
- 5.2. ábra Kamrás kemence
- 5.3. ábra Harang kemence
- 5.4. ábra Aknás kemence
- 5.5. ábra Tégelykemence
- 5.6. ábra Hőkezelő kosár
- 5.7. ábra Függesztő állvány
- 5.8. ábra Módosító tényezők a hevítési idők meghatározásához
- 5.9. ábra Hűtőtartály

## 6. fejezet táblázatai

- 6.1. táblázat Ötvözőelemek határértéke az ötvözetlen acélban
- 6.2. táblázat Az ötvözők hatása az acél tulajdonságaira
- 6.3. táblázat Ütőmunka minőségi jelei
- 6.4. táblázat Ötvözött, nemesíthető acélok célszerű alkalmazása a folyáshatár és az átmérő függvényében

## **7. fejezet táblázatai**

7.1. táblázat A természetes gumi főbb tulajdonságai

7.2. táblázat Műgumik tulajdonságai

7.3. táblázat Tűzálló téglák anyagának összetétele és alkalmazási hőmérsékletének felső határa

7.4. táblázat Üvegfajták összetétele és jellemző tulajdonságaik

# Irodalomjegyzék

1. Artinger I. – Kator L. – Romvári P.: Fémek technológiája, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1971.
2. Artinger I. – Kator L. – Ziaja Gy.: Új fémes szerkezeti anyagok és technológiák. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1974.
3. Baer, E.: Korszerű polimerek. Scientific American magyar kiadása, Lapkiadó Vállalat, Budapest, 1986/12. 99-107 p.
4. Beer Gy.: Mezőgazdasági gépek anyagai, Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, 1984.
5. Dr. Beer, Gy.: Mezőgazdasági gépek Gyártása, Műszaki Kiadó, 1988.
6. Bíró, A.: Hőkezelő berendezések. Műszaki Kiadó, Budapest, 1979.
7. Bowen, K. H.: Korszerű kerámiák. Scientific American magyar kiadása, Lapkiadó Vállalat, Budapest, 1986/12. 89-96 p.
8. Czichos, H. (szerk.): Mérnöki tudományok kézikönyve, (HÜTTE: Első magyarnyelvű kiadás). Springer Hungarica Kiadó Kft. Budapest, 1993.
9. Erdey-Grúz, T.: Az anyagszerkezet alapjai. Műszaki Kiadó, Budapest, 1973.
10. Élő, Z. – Ocskó Gy.: Anyag- és gyártásismeret, FVM Képzési és Szaktanácsadási Intézet, Budapest, 2005.
11. Frischherz, A. – Dax, W. – Gundelfinger, K.: Fémtechnológiai táblázatok, B+V Lap- és Könyvkiadó Kft., Budapest, 1997.
12. Füzesi, L. – Kelemen, A-né.: Műszaki műanyagok zsebkönyve. Műszaki Kiadó, Budapest, 1989.
13. Gál I. – Kóródy L.: Anyagismeret és technológia III. Tankönyvkiadó, Budapest, 1992.
14. Gillemot, L.: Anyagszerkezettan és anyagvizsgálat. Tankönyvkiadó, Budapest, 1979.
15. Guy, A. G.: Fémfizika. Műszaki Kiadó, Budapest, 1978.



16. Habraken, J. – L. De Brouwer: Fundamentals of metallography. Presses Academiques Europeenes, S.C., Bruxelles, 1968.
17. Juhász, A. – Tasnádi, P.: Érdekes anyagok, anyagi érdekességek. Műszaki Kiadó, Budapest, 1992.
18. Kalácska, G.: Műszaki műanyagok gépészeti alapjai. Minerva-Sop Bt. Sopron, 1997.
19. Kóczy – Kunos – Iázár: Nemfémes szerkezeti anyagok. Tankönyvkiadó, Budapest, 1984.
20. Komócsin, M.: Gépipari anyagismeret. COKOM Kft., Miskolc, 2008.
21. Majdán, I.: Műszaki zsebkönyv. Műszaki Kiadó, Budapest, 1995.
22. Márton, T.: Anyagvizsgálat. Műszaki Kiadó, Budapest, 1980.
23. M. Csizmadia, B. – Nádori, E.: Mechanika mérnököknek. Szilárdságtan. Nemzeti Könyvkiadó, Budapest, 1999.
24. MSZ szabványgyűjtemények: Acélok 1. Szabványkiadó, Budapest, 1991.
25. MSZ szabványgyűjtemények: Fémek anyagvizsgálata I. kötet. Szabványkiadó, Budapest, 1999.
26. Osztatni, M.: Konverteracélgyártás. Műszaki Kiadó, Budapest, 1982.
27. Pék, L.: Fémes és nemfémes szerkezeti anyagok. Agrártudományi Egyetem, Mezőgazdasági Gépészmérnöki Kar, Gödöllő, 1993.
28. Pék L.: Anyagszerkezettan és anyagismeret, Dinasztia Kiadó, Budapest, 2000.
29. Pék, L. – Szakál, Z.: Anyagismeret, gyártástechnológia. FVM Vidékfejlesztési, Képzési és Szaktanácsadási Intézet, Budapest, 2015.
30. Pellényi, L.: Fémek törése és kifáradása. Agrártudományi Egyetem, Mezőgazdasági Gépészmérnöki Kar, Gödöllő, 1996.
31. Pellionis, P.: Akusztikus Emisszió vizsgálat. Anyagvizsgálók lapja, Budapest, 1991/3. p. 79-81.

32. Romvári, P. – Karády, L.: Metallográfia és anyagvizsgálati gyakorlatok. Tankönyvkiadó, Budapest, 1978.
33. Schott, W. (szerk.): Einführung in die Werkstoff wissenschaft. Veb Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1981.
34. Schön, Gy.: Vasötvözetek és hőkezelésük. Műszaki Kiadó, Budapest, 1968.
35. Tóth, F.: Őrvényáramú anyagvizsgálat. Anyagvizsgálók lapja, Budapest, 1994/1. p. 108-113.
36. Veneckij, Zs. i.: Barangolás a fémek birodalmában. Műszaki Kiadó, Budapest, 1986.
37. Zorkóczy, B.: Metallográfia és anyagvizsgálat. Tankönyvkiadó, Budapest, 1982.

**SZÉCHENYI** 2020



MAGYARORSZÁG  
KORMÁNYA

**Európai Unió**  
Európai Szociális  
Alap



**BEFEKTETÉS A JÖVŐBE**