Anyag- és technológiaismeret

műszaki menedzsereknek

Dobránszky János

DyTh

Anyag- és technológiaismeret műszaki menedzsereknek

Dobránszky János

DyTh

Anyag- és technológiaismeret műszaki menedzsereknek

Szerző: Dobránszky János
gépészmérnök, hegesztő szakmérnök, PhD

A szerző 1987 óta dolgozik tudományos kutatóként és egyetemi oktatóként, jelenleg a MTA és a BME közös Kompozittechnológiai Kutatócsoportjában, valamint a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszékén.

Szakmai lektor: Czoboly Ernő, gépészmérnök, a műszaki tudomány doktora (DSc)

A hallgatói lektorálást végezte: Dobránszky Julianna és Sykora Henrik

Kiadói szaklektor: Tóth Julianna

Első kiadás, 2011.
Első, javított utánnyomás, 2012.

Kiadó: DyTh Műszaki Tanácsadó Bt.
1118 Budapest, Torbágy utca 5.
dyth@chello.hu

Szerzői jogok: Dobránszky János

Nyomtatott változat: ISBN 978-963-89209-1-1

Képernyős változat: ISBN 978-963-89209-0-4

Az adathordozó nélküli képernyős változat ingyenes és szabadon terjeszthető, de mindenféle üzleti célú felhasználása tilos! Az adathordozón kiadott képernyős változatot, illetve a nyomtatott változatot a kiadó az önköltségi ár és a postaköltség utólagos megtérítése fejében postai úton megküldi. A nyomtatott változat másolása tilos! A könyv tartalmának felhasználása esetén kéretik a forrás pontos megjelölése! Mindemellett, a képernyős változat használatáért a szerző örömmel veszi a *Pro Progressio Alapítványba* befizetett adományt, amelyet a képzés minőségének javítására kíván fordítani az előszóban írtak szerint.

Előszó

A budapesti Műegyetemen a műszaki menedzser alapszakra beiratkozott hallgatók az *Anyagismeret* című tantárgy ismeretanyagát két nagy témakörre bontva hallgatják. Az első témakör az anyagszerkezettani alapok, az anyagvizsgálati módszerek, a gépipari gyártási eljárások és a fémes szerkezeti anyagok rövid áttekintését tartalmazza. Ehhez a témakörhöz illeszkedik ez a könyv. Az említett tantárgy második nagy témaköre a polimer szerkezeti anyagok jellemzőit, alkalmazását és gyártástechnológia alapjait mutatja be, és az ezt művelő szakemberek által írt kiváló szak- és tankönyvekben van összefoglalva.

A műszaki menedzser szakos hallgatók körében tíz éven át gyűjtött előadói és vizsgáztatási tapasztalatok, továbbá a hazai iparban megismert műszaki menedzseri karrierpéldák alapján dolgoztam át az első, 2003-ban kiadott jegyzetet a jelen formára és tartalomra. Az volt a szándékom, hogy a lehetőségek határáig megkönnyítsem a témakör elsajátítását és a vizsgára való felkészülést, s további ismereteket adjak a későbbi szakmai pályán felvetődő anyagtechnológiai vonatkozású kérdések megválaszolásához.

Ez a könyv a témakör alapos megismerését azzal igyekszik szolgálni, hogy kifejti a tananyagot, pótolva az előadás szükségszerűen előálló hiányosságait. Be kell látni, hogy az előadásokon nem lehet mindent teljes egészében ismertetni, másfelől viszont az írott szöveg sok esetben nem tartalmazza a megértést megkönnyítő magyarázóerőt: ezért kívánom hangsúlyozni, hogy az előadás és az írott források együtt tudják igazán hatékonnyá tenni a tanulást. További segítséget kívánok nyújtani az egyetemi tananyag megértéséhez azzal, hogy e könyv képernyős megjelenítésű kiadványának mellékletében rövid bemutatókat teszek közzé néhány alapvető gépipari gyártási eljárásról.

Azzal is szeretném elősegíteni az egyetemi hallgatók műszaki ismereteinek és készségeinek fejlődését, hogy önkéntesen választható laboratórium- és üzemlátogatásokat hirdetek meg; ezek megszervezését a tisztelt hallgatóságra bízom, de természetesen minden segítséget megadok. A könyv 10–16. fejezete a BME-n oktatott *Anyagismeret* tantárgy tananyagát lényegesen meghaladó ismereteket is közöl az érdeklődő szakembereknek; ezek megismerése, későbbi felhasználása bizonyára nem lesz haszontalan.

A diákokat a vizsga sikeres letétele foglalkoztatja a legerősebben, ami természetesnek mondható. A vizsgára való alapos felkészüléshez három dolog egyidejű megléte elengedhetetlen: a tananyag pontos ismerete, a tananyag témaköreit tartalmazó szövegek (pl. előadásjegyzet) és a kellő mértékű hallgatóimunka-ráfordítás. Ez utóbbit csak maga a diák biztosíthatja, és erre bíztatok is mindenkit. Lehetnek olyan részek a szövegben, amelyeket nem találnak kellően érthetőnek, sőt, hibákat is találhatnak a szövegben: mindkét esetben számítok megértésükre és az észrevételeikre – akár a vizsgán is.

Ez a könyv – a képernyős megjelenítésű változatában – ingyenes, ezért tanulási célból való másolása sem tisztességtelen. Az ingyenesség mellett azonban kérem a Tisztelt Olvasót, hogy támogassa az oktatást azzal, hogy egy tetszés szerinti összeget befizet a Pro Progressio Alapítvány számlájára *„az Anyagismeret oktatásáért”* megjegyzéssel. Az ide becsordogáló summát üzemlátogatások utazási költségeire és a tudományos diákköri munka jutalmazására kívánom fordítani. Az alapítvány elérhetősége: www.proprogressio.hu.

A műszaki menedzserek a hivatásuk gyakorlása közben műszaki, szervezeti és pénzügyi döntéseket is hoznak. Tapasztalataim szerint a műszaki menedzser diplomát szerzett kollégák a hazai vállalatoknál fontos beosztásokban dolgoznak, és a döntéseikhez erős mérnöki, azon belül pedig alapos anyag- és technológiaismereti háttérre van szükségük. Jó szakmát választottak tehát, de a sikeres pályakezdéshez és a helytálláshoz – higgyék el! – óriási szükség van a mérnöki alapjaik erősítésére. Ehhez kívánok ezzel – a lektorok rendkívül alapos munkájának köszönhetően készre formált – szakkönyvvel hozzájárulni.

Budapest, 2012. október 23.

Dobránszky János

Tartalomjegyzék

Előszó I

Tartalomjegyzék III

1. Az anyagok sokfélesége 3
   - 1.1. Az „anyag” fogalmának definíciója 3
   - 1.2. Példák az „anyag” meghatározására 3
   - 1.3. Az anyagok csoportosítása 4
     - 1.3.1. Az anyagok csoportosítása eredetük szerint 4
     - 1.3.2. Az anyagok csoportosítása az emberek szükségletei szerint 5
     - 1.3.3. Az anyagok családfája 6
     - 1.3.4. A tulajdonságok szerinti csoportosítás 7
     - 1.3.5. Halmazállapot szerinti csoportosítás 8
     - 1.3.6. Éghetőség szerinti csoportosítás 8
     - 1.3.7. A környezettel való kölcsönhatás szerinti csoportosítás; környezeti tulajdonságok 9
     - 1.3.8. Az anyagtulajdonságok „eloszlása” szerinti csoportosítás 10
     - 1.3.9. Az anyagok csoportosítása kémiai kötés és atomszerkezet szerint 10
     - 1.3.10. Különleges jellemzők 11

2. Az anyagok szerkezete 17
   - 2.1. Az anyagok rendeződése 17
   - 2.2. A szilárd anyagok szerkezete 18
   - 2.3. A fémes anyagok szerkezete 19
   - 2.4. A kristályos anyagok szerkezete 20
   - 2.5. A kerámiák szerkezete 22
   - 2.6. Az üvegek szerkezete 23
   - 2.7. A polimerek szerkezete 23
   - 2.8. A társított (hibrid) anyagok szerkezete 25
   - 2.9. A kristályrácshibák áttekintése 26
     - 2.9.1. A ponthibák 26
     - 2.9.2. A vonalszerű rácshibák, a diszlokációk 27
     - 2.9.3. A felületszerű kristályrácshibák 30
   - 2.10. A nanoszerkezetű anyagok 32
   - 2.11. A fázisátalakulások 33

3. A mechanikai tulajdonságok 37
   - 3.1. A mechanikai igénybevételek alapvető csoportjai 37
   - 3.2. Az állapottényezők 38
     - 3.2.1. Külső állapottényezők 38
     - 3.2.2. Belső állapottényezők 38
   - 3.3. A főbb mechanikai tulajdonságok 39
     - 3.3.1. A rugalmassági modulusok 39
     - 3.3.2. A szilárdság és mérőszámai 41
     - 3.3.3. A merevség 42
     - 3.3.4. A keménység 43
     - 3.3.5. A képlékenység és mérőszámai 44
     - 3.3.6. A szívósság és az ütőmunka 44
     - 3.3.7. A repedésterjedéssel szembeni ellenállás 45
     - 3.3.8. A kifáradással szembeni ellenállás 45
     - 3.3.9. A kúszással szembeni ellenállás 45
   - 3.4. A szilárdságnövelés mechanizmusai 46
     - 3.4.1. A Peierls-feszültség 46

3.4.2. A szilárdoldatos keményedés ... 46
3.4.3. A kiválásos keményedés ... 46
3.4.4. Az alakítási keményedés ... 47
3.4.5. A szemcsefinomítás ... 47
3.4.6. Szilárdságnövelés fázisátalakulással ... 47
3.5. A szerkezeti anyagok károsodása ... 48
3.6. A törés fő típusai ... 48
3.7. Anyagvizsgálati eljárások ... 49

4. Az alapvető gyártási eljárások ... 53
4.1. Öntési eljárások ... 53
4.2. Fröccsöntési eljárások ... 55
4.3. Porformázási eljárások ... 56
4.4. Képlékenyalakítási eljárások ... 56
4.5. Forgácsolási eljárások ... 60
4.6. Az anyagok közötti kötési eljárások ... 63
4.6.1. A forrasztás ... 63
4.6.2. A hegesztés ... 64

5. A vasöntészet anyagai ... 71
5.1. A vas–szén egyensúlyi fázisdiagram ... 71
5.1.1. Az Fe-C egyensúlyi fázisdiagramhoz kapcsolódó alapfogalmak ... 72
5.1.2. Az Fe-C rendszer fázisai ... 72
5.1.3. Az Fe-C rendszer szövetelemei ... 72
5.2. A vasöntészeti anyagok tulajdonságai és alkalmazásai ... 75
5.2.1. A vasöntészeti anyagok tulajdonságai ... 75

6. Ötvözetlen acélok ... 79
6.1. Az acélok ötvözői, szennyezői ... 79
6.1.1. Az acélok csoportosítása ... 79
6.1.2. A szén hatása a tulajdonságokra ... 80
6.1.3. Az ötvözők és szennyezők szerepe ... 81
6.1.4. Az ötvözők és szennyezők hatása a vas allotrop átalakulásaira ... 81
6.1.5. Az ötvözők és szennyezők hatása a mechanikai tulajdonságokra ... 81
6.2. Az ötvözetlen acélok osztályának főbb csoportjai ... 82
6.2.1. Melegen hengerelt termékek ... 82
6.2.2. Ötvözetlen szerkezeti acélok ... 83
6.2.3. Csőtávvezetékek acél alapanyagai ... 84
6.2.4. Nyomástartó berendezések acéljai ... 85
6.2.5. Betonacélok és feszítőhuzalok ... 86
6.2.6. Automataacélok ... 86
6.2.7. Gépacélok ... 87
6.2.8. Sínacélok ... 87
6.2.9. Jól hidegalakítható acéllemezek ... 87

7. Ötvözött acélok ... 91
7.1. Nemesíthető acélok ... 91
7.1.1. Ötvözetlen nemesíthető acélok ... 91
7.1.2. Ötvözött nemesíthető acélok ... 92
7.2. Betétben edzhető acélok ... 93
7.3. Rugóacélok ... 94
7.4. Csapágyacélok ... 94
7.5. Szelepacélok ... 95
7.6. Hidegszívós acélok ... 95
7.7. A melegszilárd acélok ... 96
7.7.1. A melegszilárdság és a kúszásállóság ... 96

7.7.2. A melegszilárd acélok főbb csoportjai ... 96
7.7.3. A melegszilárd acélok alkalmazása ... 97
7.8. A hidrogénnyomás-álló acélok ... 98

8. Szerszámanyagok ... 101
8.1. A szerszámacélok csoportosítása ... 101
8.2. Az ötvözetlen hidegalakító szerszámacélok ... 101
8.3. Ötvözött hidegalakító szerszámacélok ... 102
8.4. A melegalakító szerszámacélok ... 102
8.5. A gyorsacélok ... 103
8.6. Egyéb forgácsolószerszám anyagok ... 103
8.7. Felületkezelt szerszámanyagok ... 104

9. A rozsdamentes acélok ... 107
9.1. A rozsdamentes acélok fő típusai ... 107
9.1.1. A rozsdamentes acélok alapjellemzői ... 107
9.1.2. A rozsdamentes acélok főcsoportjai ... 107
9.1.3. Ferrites korrózióálló acélok ... 108
9.1.4. Ferrites hőálló acélok ... 108
9.1.5. Martenzites korrózióálló acélok ... 108
9.1.6. Martenzites kúszásálló acélok ... 108
9.1.7. Ausztenites korrózióálló acélok ... 109
9.1.8. Ausztenites hőálló acélok ... 109
9.1.9. Kiválásosan keményíthető korrózióálló acélok ... 110
9.1.10. A duplex (ausztenit–ferrites) acélok ... 110
9.2. Az ausztenites korrózióálló acélok jellemző tulajdonságai és alkalmazásai ... 111
9.2.1. Alkalmazási példák ... 113
9.3. A ferrites korrózióálló acélok jellemző tulajdonságai és alkalmazásai ... 115
9.3.1. Alkalmazási példák ... 115
9.4. A martenzites rozsdamentes acélok jellemző tulajdonságai és alkalmazásai ... 117
9.4.1. Alkalmazási példák ... 117
9.5. A duplex korrózióálló acélok jellemző tulajdonságai és alkalmazásai ... 120
9.5.1. Alkalmazási példák ... 121

10. A nikkel és ötvözetei ... 125
10.1. A nikkelötvözetek főcsoportjai ... 125
10.1.1. A korrózióálló nikkelötvözetek ... 125
10.1.2. Hőálló nikkelötvözetek ... 126
10.1.3. A kúszásálló nikkel- és kobaltötvözetek ... 126
10.2. További ismeretek a nikkelről ... 127
10.2.1. A nikkel felhasználása ... 127
10.2.2. Pénzérmegyártás ... 128
10.2.3. A nikkelpiac főbb adatai ... 128
10.2.4. Különleges rendeltetésű Ni-ötvözetek ... 129

11. Az alumínium és ötvözetei ... 133
11.1. Az alumínium fizikai tulajdonságai ... 133
11.2. Az ötvözetek jelölése összetétel szerint ... 133
11.2.1. Öntészeti ötvözetek ... 133
11.2.2. Az alakítható ötvözetek ... 134
11.3. Jelölés a gyártási állapot szerint ... 135
11.3.1. Öntészeti ötvözetek (MSZ EN 1706) ... 135
11.3.2. Alakítható ötvözetek (EN 515) ... 135
11.3.3. A hidegen hengerelt lemezek jelölése ... 135
11.3.4. A nemesített termékek kiegészítő jele ... 135
11.4. Az ötvözetlen alumínium (Al ≥ 99,00%) tulajdonságai ... 136

11.4.1. Az ötvözők és a szennyezők hatása ... 136
11.4.2. Korrózióállóság ... 136
11.4.3. Mechanikai tulajdonságok ... 137
11.5. Az ötvözetlen alumínium típusai ... 137
11.6. Az alumíniumötvözetek ... 139
11.7. Az alumíniumötvözetek hőkezelése ... 139
11.8. Az alumíniumötvözetek tulajdonságai ... 141
11.8.1. Melegszilárdság ... 141
11.8.2. Hidegszívósság ... 142
11.8.3. Kifáradással szembeni ellenállás ... 142
11.8.4. A korrózióállóság ... 142
11.8.5. Alakíthatóság ... 142
11.8.6. Hegesztés, forrasztás ... 142
11.8.7. Forgácsolás ... 143
11.9. Nem nemesíthető Al-ötvözetek ... 143
11.9.1. Az Al-Mn ötvözetek ... 143
11.9.2. Az Al-Mg ötvözetek ... 143
11.10. Nemesíthető ötvözetek ... 144
11.10.1. Al-Cu ötvözetek (2000-es csoport) ... 144
11.10.2. Al-Mg-Si ötvözetek (6000-es csoport) ... 145
11.10.3. Al-Zn ötvözetek (7000-es csoport) ... 145
11.11. Az öntészeti Al-Si ötvözetek ... 145
11.12. Alkalmazási példák ... 146
11.12.1. Alkalmazási példák az ötvözési főcsoportok szerint rendszerezve ... 146
11.12.2. Alkalmazások személygépkocsik alkatrészeihez ... 147
11.12.3. Utasszállító járművek ... 148
11.12.4. Villamos és elektronikai alkalmazások ... 148
11.12.5. Az alumínium mint csomagolóanyag ... 149
11.12.6. Háztartási eszközök: ... 149
11.12.7. Építészeti, ipari és mezőgazdasági célú alkalmazások ... 150
11.12.8. További alkalmazások ... 150
11.13. Az alumíniumötvözetek új típusai ... 151
11.14. Újrahasznosítás ... 152

12. A réz és ötvözetei ... 161
12.1. A vörösréz ... 161
12.1.1. Fizikai tulajdonságok ... 161
12.1.2. A szennyezők hatása ... 161
12.1.3. Az ipari rezek típusai ... 161
12.1.4. Mechanikai tulajdonságok ... 162
12.1.5. Korrózióállóság ... 162
12.2. A gyengén ötvözött rézötvözetek ... 162
12.3. Erősen ötvözött rézötvözetek ... 164
12.3.1. Sárgarezek (Zn = 5–45%) ... 164
12.3.2. Korrózióállóság ... 164
12.3.3. A bronzok (ónbronzok) ... 165
12.3.4. Alumíniumbronzok / kuproalumíniumok ... 165
12.3.5. A nikkelbronzok / kupronikkelek ... 166
12.3.6. Egyéb rézötvözetek ... 166
12.3.7. Alakemlékező rézötvözetek ... 166

13. A horgany és ötvözetei ... 169
13.1. A cink ... 169
13.2. A Zn-ötvözetek ... 169
13.3. Alkalmazási példák ... 170

14. A magnézium és ötvözetei ... 175
14.1. A magnézium tulajdonságai ... 175
14.2. A magnézium felhasználása ... 175
14.2.1. Autóipari alkalmazások ... 175
14.2.2. Repülőgépgyártás, űrkutatás ... 176
14.2.3. Hőtágulásmentes Mg-kompozitok ... 176
14.3. A magnéziumötvözetek ... 176
14.4. Öntészeti ötvözetek ... 177
14.4.1. Jól önthető ötvözetek ... 177
14.4.2. Az Mg-Al-Zn ötvözetek ... 177
14.4.3. Az öntészeti ötvözetek tulajdonságai ... 178
14.5. Alakítható Mg-ötvözetek ... 180
14.6. Különleges alkalmazások ... 181

15. A titán és ötvözetei ... 185
15.1. A titán tulajdonságai ... 185
15.2. A titán előállítása ... 185
15.3. A legfontosabb titánötvözetek ... 187
15.3.1. Korrózióálló titántípusok ... 188
15.3.2. Nagyszilárdságú titántípusok ... 188
15.3.3. Kúszásálló és hőálló ötvözetek ... 188
15.4. A titán és ötvözeteinek alkalmazása ... 188
15.5. A titán világpiaca ... 191
15.6. A titán hazai piaca ... 191

16. A fémes bioanyagok ... 195
16.1. A bioanyagok kialakulása ... 195
16.2. A bioanyagok csoportosítása ... 196
16.3. Ferrites rozsdamentes acélok ... 196
16.4. Ausztenites rozsdamentes acélok ... 197
16.5. Az orvostechnikai kobaltötvözetek ... 199
16.6. Az értágítóbetétek vagy sztentek ... 201
16.6.1. A sztentek anyagai ... 201
16.6.2. A sztentek főbb tulajdonságai ... 202
16.6.3. A sztentek gyártási módszerei ... 203
16.6.4. Sztentek fejlesztése Magyarországon ... 204
16.7. Az orvostechnikai titánötvözetek ... 207
16.8. Az alakemlékező ötvözetek ... 209
16.8.1. A Nitiniol orvostechnikai alkalmazásai ... 209
16.8.2. Nitinol anyagú sztentek ... 209
16.8.3. Vezetődrótok ... 210
16.8.4. A kereskedelmi Nitinol ötvözetek ... 211
16.8.5. Az alakemlékező ötvözetekről általában ... 212
16.8.6. További humán alkalmazások ... 215
16.8.7. További alakemlékező anyagok ... 216
16.9. A tantál orvostechnikai alkalmazásai ... 216

Felhasznált és ajánlott szakkönyvek ... 217

Tárgymutató ... 219

1. fejezet
Az anyagok sokfélesége

A velencei Torre dell'Orologio napórája

1. Az anyagok sokfélesége

1.1. Az „anyag” fogalmának definíciója

Általános definíciót nagyon nehéz lenne adni az „anyag” fogalmának meghatározására, ugyanis az emberi civilizáció fejlődésének az egyik állandó alapkérdése volt s ma is az: mi az anyag? Bizonyosra vehető, hogy a válasz keresése erre a kérdésre nagyban hozzájárult mind a humán-, mind a természettudományok eredményeihez.

Az *Anyagismeret* című tantárgy keretében megismerendő „anyagnak” tekintjük mindazokat a fizikai mivoltukban megfogható természetes vagy mesterségesen előállított dolgokat, amelyek a természeti folyamatokban keletkeznek és átalakulnak, illetve amelyeket az emberi tevékenység létrehoz, felhasznál, átalakít.

1.2. Példák az „anyag” meghatározására

„**Anyag** (lat. materia) jelenti 1. ellentétben a formával azt a határozatlant, aminek az alak határozottságot ad; 2. jelenti a testi világot, azt, ami a testek lényegét teszi, ellentétben a szellemmel v. lélekkel.

A filozófiai gondolkodásban /.../ egyes rendszerek az anyag valóságát a szellemé mellett elismerik (l. Dualizmus); ezzel szemben állanak a monisztikus rendszerek (l. Monizmus), melyek vagy a szellem és anyag azonosságát tanítják v. az anyag valóságát egyáltalán tagadják (l. Spiritualizmus), vagy a szellemet kiküszöbölik, úgy hogy csak az anyagot mondják létezőnek (l. Materializmus).

A fizikában /.../ az anyag fogalma hosszas fejlődésen ment át. Főleg két szempont fontos. Először az erő fogalma, másodszor az anyag oszthatóságának a problémája. Az anyagot az erővel egynek gondolhatjuk, mert a gondolkodás fejletlen fokán egyáltalán nem teszünk különbséget e kettő közt (lásd: Hilozoizmus); ha pedig az erőt az anyagtól megkülönböztetjük, v. holtnak gondolhatjuk az anyagot, melyet lökés és nyomás mozgat (mechanizmus), vagy az erőt válhatatlan kapcsolatban levőnek gondoljuk az anyaggal: az erő az anyag tulajdonsága (nincsen anyag erő s nincsen erő anyag nélkül), v. végül az anyag fogalmát /.../ átvezetjük az erőébe: csak erők vannak (dinamizmus). Ha pedig az oszthatóság szempontjából nézzük az anyagot, úgy végtelenül osztható folytonosságnak (continuumnak) vesszük v. oszthatatlan, legkisebb üres közök által egymástól elválasztott (diskret) részekből állónak (l. Atomizmus). A hilozoizmus a görög filozófia kezdő álláspontja; az atomistáktól kezdve *Newtonig* egészben a mechanikus felfogás uralkodik, míg *Thewton* a dinamikus felfogás győzelmét segíti elő.

A fizikában és kémiában a tünemények tárgya (szubsztrátuma) az anyag. Jelenleg *[ez bő 100 éve volt; a Szerző]* /.../ az anyag szerkezetére nézve általánosan elfogadott az atomelmélet, mely szerint minden test végtelen parányi, szétoszthatatlan anyagrészecskékből áll, melyek folytonos mozgásban lévén, épp e mozgásuk és a mozgások közben egymásra gyakorolt hatásuk alapján a különféle fizikai és kémiai jelenségeket létrehozzák. /.../ A kémia jelenleg ama nézet felé hajlik, hogy minden kémiai elem más természetű atomokból áll /.../ Több atom egyesüléséből keletkezik a molekula, mely fizikai jelenségekben épségében megmarad, holott kémiai folyamatok közben az egyes atomokra szétbomolhat. A fizikában az anyag szerkezetét különösen a halmazállapot különbözőségének megmagyarázására használjuk. A szilárd testben az atomok szilárd nyugalmi helyzet körül lengéseket végeznek, melyek fenntartója egy ismeretlen természetű összekötő erő (cohaesio). A folyadékokban a részek között való összetartás már oly csekély, hogy az atomok egymáshoz képest könnyen eltolhatók, oly annyira, hogy a folyadék más erőkkel szemben alakját meg nem tarthatja, hanem az edény alakját elfogadja. A gáznemű testek legkisebb részei között összetartási erőről egyáltalában már nem lehet szó; ezek a részek keresztül-kasul repdesnek addig, míg valamely akadályba nem ütköznek.” (A Pallas Nagy Lexikona, 1893-1896.).

„Az anyag mint a tér geometriájának meghatározója /.../ már *Newton* óta ismert /.../ tény /.../ a tehetetlen tömeg és a gravitáló tömeg azonossága. /.../ Az általános relativitáselmélet /.../ megadja a gravitáció új elméletét: és ez éppen abban áll, hogy a gravitációs erőhatások nem mint erőhatások jelentkeznek, amelyeknek forrása az anyagban keresendő, hanem az anyag a tér geometriáját alakítja” (*Simonyi Károly*: A fizika kultúrtörténete, Akadémiai Kiadó, 1998.).

Ezekből az idézetekből kitűnik, hogy az „anyag” mibenlétének tisztázási szándékával igen messze lehet jutni a tudományterületek sűrűjében, ám az adott tantárgy kereteit szem előtt tartva szigorúan a műszaki tudományok területén kell maradnunk, és azon belül is a szerkezeti és funkcionális anyagoknak abban a szegmensében, amelyet a fémes anyagok családjának nevezünk.

A 2002-ben elhunyt *Balogh János*, az etológia világhírű professzora azt tanította: **„Az új évezredben legfontosabb dolgunk a Föld rendbetétele. A szakadék szélén állunk, előnt bennünket a szemét, mert az új divatok előállításához termeljük magunk vesztére a szemetet. A megsebzett bolygó pedig nem lesz képes elviselni az újabb és újabb sérüléseket.”** A felelős döntéshozó anyagismeretéhez ez is szorosan hozzátartozik.

1.3. Az anyagok csoportosítása

Mindenfajta csoportosításnak az az értelme, hogy elősegítsük a világos áttekintést, az egységes értelmezést az éppen vizsgált területen. Az anyagok (és a gazdasági tevékenységek) csoportosítása különösen kifinomult rendszereket hozott létre, amelyre talán a legjobb példa a nemzeti és a nemzetközi szabványosítás és a statisztikai adatgyűjtés, amely nélkül vélhetően nem működne a kereskedelem, sőt, a modern állam.[1]

Az anyagok osztályozására sokféle szempontrendszer állítható fel, akár önkényesen is. Ezek közül a következő kategóriákat vizsgáljuk meg: az eredet, az emberi szükségletek, a kémiai kötés, az atomszerkezet, a tulajdonságok és végül egyes különleges szempontok.

1.3.1. Az anyagok csoportosítása eredetük szerint

Eredetük szerint az anyagokat három nagy csoportba soroljuk.

- **A természetes anyagok** eredete, keletkezési helye – amint azt az elnevezésük is mutatja – a természet, de az ember közvetlenül felhasználja őket. Eredetüket közelebbről megvizsgálva lehetnek állati eredetűek (gyapjú, bőr), növényi eredetűek (gyapot, fa) és ásványi eredetűek (mészkő, gránit, feketekőszén stb.).
- **A mesterséges anyagok** is a természetben jönnek létre, de felhasználás előtt az ember átalakítja azokat. Ebbe a kategóriába tartozik a fémek döntő többsége, kivéve azokat, amelyeket nem fémércekből kell kinyerni (ilyen fémek, pl. termésréz vagy arany alig vannak a Földön), továbbá a szilícium-dioxidból (kvarc) gyártott üveg vagy a feketekőszénből előállított koksz.
- **A szintetikus anyagok alapanyagai** – a legismertebb a kőolaj és a földgáz – szintén természetes anyagok, de előállításuk csak az ember által kidolgozott vegyészeti módszerekből kiindulva lehetséges, és ez alapvetően megkülönbözteti őket a többi anyagféleségtől. A legismertebb szintetikus anyagok a műanyagok (plexi, forex, celluloid stb.), ill. a gyógyszerek és vegyszerek.

A mindennapi életben számos olyan eszközt használunk, amelyek anyagaként többféle eredetű anyagféleség is elterjedt, ilyenek pl. a konyhai eszközök, de akár a hidak is (1-1. ábra).

1-1. ábra – a) a poroszlói fahíd (2001), b) a hortobágyi kőhíd (1833), c) acélhíd a Tiszán Técsőnél (1948), d) aluminiumhíd Saguenay-nál (1950), e) az első hazai vasbeton vasúti híd Nyírszőlősnél (1905), f) duplex acél + polimer kompozit híd Zumaiában (2008)

[1] *A hazai szabványosítás a Magyar Szabványügyi Testület (www.mszt.hu), a statisztikai adatgyűjtés pedig a Központi Statisztikai Hivatal (www.ksh.hu) hatáskörébe tartozik.*

1.3.2. Az anyagok csoportosítása az emberek szükségletei szerint

Az anyagok fő felhasználója az ember, ezért magától értetődik annak a vizsgálata is, hogy az emberi felhasználás alapján miként rendszerezhetjük az anyagokat. Ebben a tekintetben is három nagy csoportot képezhetünk.

– Létfenntartáshoz szükséges anyagok

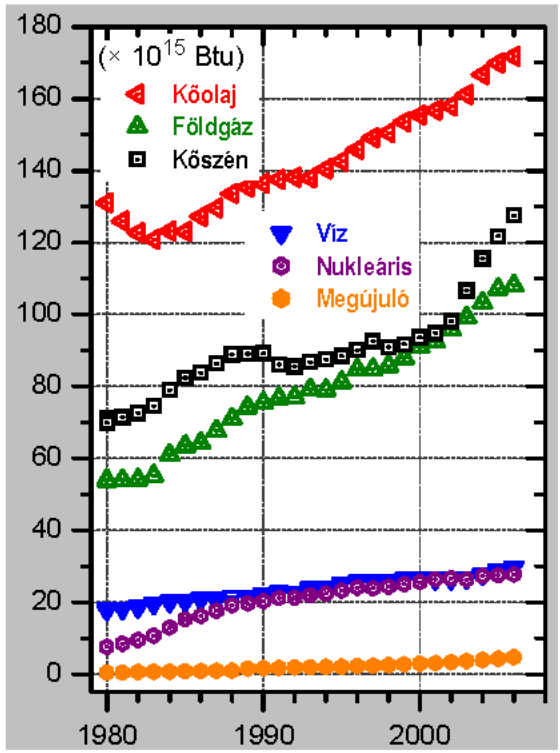
A legfontosabb anyagok e kategóriában a víz és az élelmiszerek, valamint ide kell sorolni a levegőt is. A környezettudatos szemlélet erősödésével a tiszta levegő kezd „új" anyaggá válni.

A létfenntartáshoz szükséges anyagok bemutatása nem tárgya ennek a könyvnek, ám feltétlenül ki kell térni valamire, ami az ember földi jövője szempontjából akár alapkérdésnek is nevezhető: vajon képes-e az emberi civilizáció arra, hogy a mai tevékenységét – a lehető legsürgősebben – átalakítsa annak érdekében, hogy a földi létfenntartáshoz nélkülözhetetlen erőforrások egyre gyorsuló pusztulása legalább megálljon? Vajon át lehet-e még alakítani világméretekben *a bővülő fogyasztás* mindennél erősebbnek tűnő hajtóerejét a bioszféra (vagyis az élet színtereinek egésze: a talaj, a vizek, a tengerek és a légkör) eltartóképességének biztosítására helyezve a hangsúlyt? Az igenlő válasz egyre inkább csak ábrándnak tűnik, mégpedig nem csak azért, mert a világpolitikai érdekellentétek egyre inkább feloldhatatlannak bizonyulnak, hanem azért is, mert az emberek egyéni magatartásának kedvező irányú átalakulására semmi biztató jel nem utal.

Nem lehet eléggé eltúlozni azokat a figyelmeztetéseket, amelyeket a földi életfeltételek rohamos pusztulásáért aggódó jelzések közvetítenek. A mérnöki és menedzseri tevékenység erősen érintett abban, hogy a fogyasztási javakat termelő gazdaság mennyire és mikor építi be saját működési logikájába a bioszféra-kímélés alapelvét. Az ebből fakadó felelősség alól pedig nem lehet kibújni.

– Energiahordozók

A legismertebb energiahordozók a kőszén, a kőolaj, a földgáz és az uránérc, de ma már így tekinthetünk a fára, a mozgó és a geotermikus vizekre, a szélre és magára a Napra. Az 1-2. ábra mutatja az energiafelhasználás megoszlását a különféle energiaforrások között (a Btu egység: British thermal unit, 1 Btu = 1055 J). A megújuló energiaforrások aránya nagyon csekély (1%), bár az elmúlt 10 év alatt a kétszeresére nőtt, különösen a fejlett európai államokban.



1-2. ábra – A világ energiafogyasztásának megoszlása energiaforrások szerint,1980-2006.
(Int. Energy Annual 2008)

– Ipari anyagok, avagy mérnöki anyagok

A fémek és ötvözeteik, a polimerek, a gumik, továbbá a kerámiák és az üvegek alkotják az ipari anyagok öt nagy családját. Ha ebben a csoportosításban megvizsgáljuk az anyagok felhasználási arányát, érdekes adatokat találunk: 2000-ben a világ minden lakosára kb. 6 000 kg anyagfogyasztás jutott (valamint még napi kb. 50 liter víz és 25 m^3 levegő). A 6000 kg-os anyagfelhasználás belső megoszlása: 23% élelmiszer, 31% energiahordozó és 46% ipari anyag.

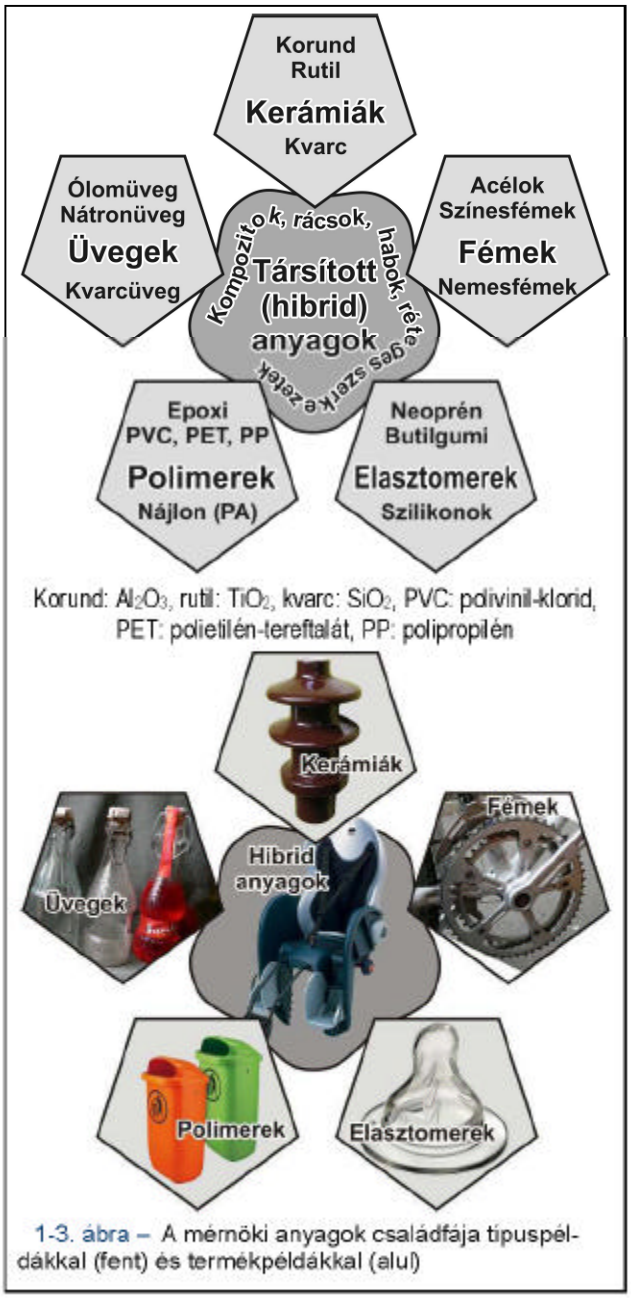
Külön elemezve az egy főre jutó iparianyag-felhasználást, mely tehát kb. 2850 kg, a fémek (acél, alumínium stb.) aránya 5%-ot, a polimereké (fa, papír, műanyagok) 14%-ot, a kerámiáké (építőanyagok és üvegek) 81%-ot tesz ki.

A fémek felhasználása terén a belső megoszlás a következő: vasalapú ötvözetek 90,6%, alumíniumötvözetek 2,7%, réz és ötvözetei 1,6%, horgany 0,9%. A világ acélfelhasználása 2008-ban mintegy 1350 Mt, a hazai 2,5 millió tonna volt.

Meg kell jegyezni, hogy az ipari, másként mérnöki anyagok sűrűsége jelentősen különbözik, ezért gyakran alkalmaznak különféle korrekciókat az egymással és más anyagokkal való összehasonlításban, pl. a műanyagok vagy a beton felhasználási adatait gyakran térfogatban közlik.

1.3.3. Az anyagok családfája

Miként az élővilágban, úgy az anyagok világában is felállítható egy családfa, amely az anyagok különféle fajtáit rendszerezi. Az anyagok családfáján hosszú ideig három nagy anyagcsaládot különböztettek meg – a kerámiákat, a polimereket és a fémeket –, azonban olyan jelentős mennyiségi és minőségi fejlődésen mentek keresztül a mindennapi életben felhasznált mérnöki anyagok, hogy indokolttá vált bővíteni a nagy anyagcsaládok számát, amint ezt az 1-3. ábra szemlélteti. Az ábra az anyagcsaládok elnevezése mellett példákat is megnevez, illetve olyan jellegzetes termékeket is mutat, amelyek az adott anyagcsaládba tartoznak. Lévén szó később főleg fémes anyagokról, itt csak a többi anyagcsaládot jellemezzük.



1-3. ábra – A mérnöki anyagok családfája típuspéldákkal (fent) és termékpéldákkal (alul)

A kerámiák nemfémes, szervetlen szilárd anyagok, jól ismert közülük a porcelán. Legjellemzőbb tulajdonságaik is közismertek: merevek, kemények, kopás- és korrózióállók mind szoba-, mind nagy hőmérsékleten. A kerámiák legtöbbje kiváló villamos szigetelő: a műanyagok elterjedése előtt az izzólámpa-foglalatok, a villanykapcsolók alumínium-oxid kerámiából vagy porcelánból készültek. Az erősáramú kiolvadó biztosítók (a köznyelvben „biztosítékok") terén még ma is szinte kizárólagosan kerámiákat használnak.

Ugyancsak közismertek a kerámiák hátrányos tulajdonságai: törékenyek, rosszul viselik a hirtelen hőmérséklet-változást, a hősokkot, és igen nehéz megmunkálni őket.

Amint láttuk az előző szakasz végén, a kerámiák családjába tartozó anyagok teszik ki az iparianyag-felhasználás döntő részét, aminek az a magyarázata, hogy ebbe a csoportba tartoznak az óriási mennyiségben felhasznált építőanyagok, mint pl. a beton, a falazóanyagok, de maga az építési homok is. A hazai betonfelhasználás 2008-ban kb. 6 millió köbméterre becsülhető (a szilárd beton sűrűsége 2000–2200 kg/m^3).

A kerámiák és **az üvegek** közeli rokonságban állnak egymással, de az üvegek közé csak az átlátszó és amorf (vagyis nem kristályos szerkezetű) szilárd anyagokat soroljuk. A legismertebb üveg a nátronüveg, amely a közönséges ablaküveg és az élelmiszeripari csomagolások révén mindennapi életünk jellegzetes kísérője. Az üvegek tulajdonságai nagyon hasonlóak a kerámiákéihoz, az átlátszóság azonban csak az ő sajátjuk.

A polimerek általában szerves szilárd anyagok, a szénatomok – és néhány esetben a Si-atomok – hosszú láncmolekuláiból épülnek fel. Tulajdonságaik rendkívül széles tartományban irányíthatók, ami a felhasználásukban páratlan fejlődést eredményezett. A világtermelés mostanra elérte a 100 millió tonnát, amely a 20-szorosa az 50 évvel ezelőtti értéknek, és a fejlett országokban évi 3–5%-kal bővül. A csomagolóanyagként való felhasználásuk a legjelentősebb, amely eléri az összes felhasználás harmadát.

A páratlanul gyors elterjedésüket több tényező is biztosította, amelyek közül ki kell emelni a kis sűrűségüket: könnyebbek a legkönnyebb fémnél is. A polimerek tömegegységre vonatkoztatott szilárdsága olyan jó, hogy kedvező feltételek között fémek helyettesítésére is alkalmasak.

A szobahőmérséklethez képest változó hőmérséklettel általában jelentősen változik a polimerek szilárdsága, hajlékonysága stb. Típustól függően,

hő hatására lágyulnak vagy keményednek, a hűtés hatására pedig általában törékennyé válnak. A mérnöki tervezésben és alkalmazásokban rendkívül sokoldalú anyagoknak bizonyultak, aminek fontos eleme az, hogy a polimerekből való termékgyártás rendkívül sokféle gyártási eljárással – technológiával – és tömeggyártási jelleggel, tehát olcsón megvalósítható.

Az elasztomerek – pl. a gumiszalagok, a sportcipők talpa stb. is polimernek minősülnek a szerkezetük alapján, de az egyedülállóan kicsi merevségük – az E rugalmassági (Young-) modulusuk 500–5000-szer kisebb, mint a fémeké; az acélé 210 GPa – miatt önálló anyagcsaláddá és a járműipar kulcsfontosságú anyagává (gumiabroncs) váltak.

Társított anyagok (hibrid anyagok)

Az öt alapvető anyagcsalád valamely tagjának az önálló felhasználása mindmáig elsődleges az ipari termékek tervezésében és gyártásában, de már nagyon régóta állít elő és használ az ember olyan eszközöket, amelyekben különféle anyagfajtákat társít. Az így előállított társított vagy hibrid anyagokkal, a felhasználó olyan tulajdonságú anyagokhoz jut, amelyek kedvezően ötvözik az egyes anyagfajták előnyeit és mérséklik azok hátrányait. A hibrid anyagok közé soroljuk pl. a részecskékkel vagy szálakkal erősített anyagokat (kompozitok), a szendvicsszerkezeteket, a rácsos anyagokat és a habanyagokat.

A természetben képződő anyagok – fa, csont, bőr, falevél – is valójában hibrid anyagok; pl. a csont kollagén (polimer) és hidroxiapatit (kerámia) társulása. A mesterséges hibrid anyagok előállítása ma még meglehetősen költséges, és sok technológiai kihívást (alakadás, kötéstechnológia) hozott a felszínre, de éppen ez – valamint az új felhasználói igények – az anyagfejlesztések hajtóereje.

Az anyagok családfájának tagolása

Végső soron az anyagok rendszerezésében is el kell jutnunk a konkrét anyagtípusokig, ezért a nagy anyagcsaládokon belül további tagoltság segíti az áttekintést. Az anyagcsaládfa egy ágának elvi vázlata az alábbi tagolással mutatható meg:

Anyagok
→ Anyagcsaládok (..., fémek)
→ Anyagosztályok (..., titánötvözetek)
→ Anyagcsoportok (..., Ti-Al ötvözetek)
→ Anyagtípusok (..., Ti6Al4V)

1.3.4. A tulajdonságok szerinti csoportosítás

A munkamegosztáson alapuló társadalmak kialakulásától kezdve az a cél határozza meg a szilárd anyagokkal kapcsolatos emberi tevékenységet, hogy általuk valamilyen felhasználói igényt elégítsenek ki. Ezek alapján fogalmazódtak meg a szilárd anyagokkal kapcsolatos elvárások, amelyeket mint tulajdonságokat kér számon az, aki valamilyen felhasználói igényt képvisel. A tulajdonságoknak egy része a szilárd anyag tényleges, saját jellemzőiből adódik, egy másik részét viszont éppen a felhasználói igény pillanatnyi sajátossága (pl. a divat) rendeli hozzá. Ezt a sajátos rendszert szemlélteti az 1-4. ábra.

1-4. ábra – A szilárd anyagok tulajdonságainak rendszere mint a felhasználói igények összessége

A mechanikai tulajdonságok közé soroljuk többek között a keménységet, a nyúlást és más, a mechanikai terhelésekkel összefüggő fontos jellemzőket. Tekintettel a mechanikai tulajdonságok jelentőségére, ezeket részletesen áttekintjük a 3. fejezetben.

A 4. ábrán a „más belső tulajdonságok" megnevezés lényegében a nem a mechanikai tulajdonságok körébe tartozó fizikai és más fontos tulajdonságokat fedi le, amelyek a következők:

- termikus és transzport tulajdonságok,
- villamos tulajdonságok
- mágneses tulajdonságok,
- optikai tulajdonságok,
- kémiai tulajdonságok,
- környezeti tulajdonságok,
- gyártástechnológiai tulajdonságok,
- egyéb (akusztikai, radiológiai, atomi stb.).

A felsorolt tulajdonságcsoportokban vannak olyan tulajdonságok, amelyek minden anyagra egyaránt értelmezhetők és az elemi fizikai tanulmányokból jól ismertek. A szilárd anyagok jól ismert termikus tulajdonságaira példaként említjük a következőket (zárójelben a mértékegységük):

- olvadáspont (°C) és olvadáshő (J/kg),
- hőkapacitás (J/K) és fajhő (J/kg·K),
- hővezető képesség (W/m·K),
- hőtágulási együttható; lehet lineáris, térfogati,
- hősugárzási emissziós tényező.

Ismertek olyan termikus és transzport anyagtulajdonságok is, amelyeknek csak egyes anyagféleségeknél van jelentőségük, vagy csak a tudományos kutatásban kerülnek előtérbe, pl.:

- termikus diffúziós állandó (cm^2/s),
- Seebeck-állandó (V/K),
- Debye-hőmérséklet (K),
- Curie-hőmérséklet (K); ez egyben mágneses tulajdonság is,
- gázátbocsátó képesség (permeabilitás) a polimereknél (barrer),
- üvegesedési hőmérséklet (°C) a polimereknél,
- Vicat-féle lágyulási hőmérséklet (°C) a polimereknél,
- hőszigetelő képesség kerámiáknál ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$).

Az anyagok tulajdonságait önmagukban is szinte vég nélkül lehetne osztályozni, de mivel nem ez a cél, csak néhány, egymástól jelentősen eltérő megközelítésű felosztást mutatunk be.

1.3.5. Halmazállapot szerinti csoportosítás

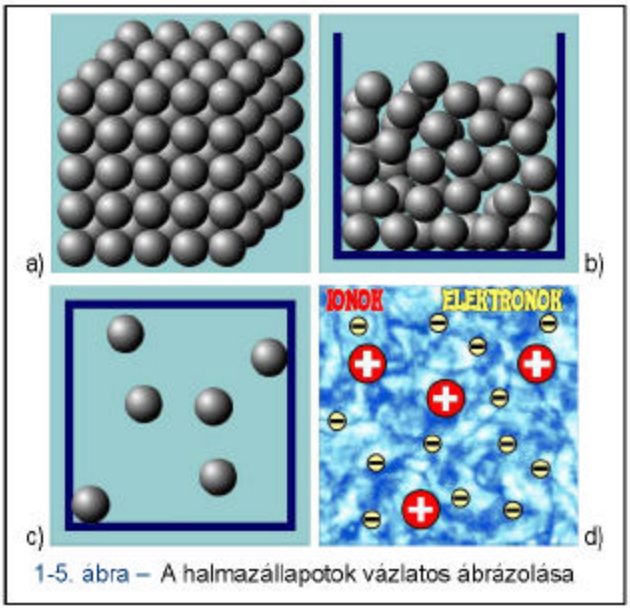
- 1. **Szilárd**: az anyagnak van állandó térfogata és alakja (az 1-5.a ábrán a golyók az atomokat szimbolizálják).

2. **Folyadék**: az anyagnak van állandó térfogata (1-5.b ábra).

- 3. **Gáz**: az anyagnak nincs állandó térfogata és alakja (1-5.c ábra). A gázban diszpergált folyadék neve köd, a szilárd fázis neve füst.
- Egyre gyakrabban említenek további, ún. 4., 5. stb. halmazállapotokat, ilyenek, pl. a **plazma** különféle típusai (1-5.d. ábra), a szemcsés anyagok, a gélek, a folyadékkristályok.

A valóságban az anyagok szinte soha nem fordulnak elő teljes tisztaságban, egyetlen egy kémiai alkotóelemet tartalmazva. A gyakorlati anyagok tehát mindig több alkotót, azaz több kémiai elemet tartalmaznak, amelyeket termodinamikai fogalommal komponenseknek nevezünk. A többalkotós anyagokban a halmazállapot és a kémiai anyagszerkezet alapján a komponensek fázisokat alkotnak.

Definíciószerűen: *a **fázis** az anyagnak egy olyan, fázishatárral körülvett része, amelyben a fizikai és kémiai tulajdonságok azonosak.* A gyakorlati anyagok lehetnek egyfázisúak és többfázisúak; egyensúlyukat a Gibbs-féle fázisszabály írja le, amely a kémiai tanulmányokból ismert.



1-5. ábra – A halmazállapotok vázlatos ábrázolása

1.3.6. Éghetőség szerinti csoportosítás

- **Éghetetlen vagy tűzálló anyagok** (pl. üvegszövet). Nem éghetők azok az anyagok, amelyek tűz vagy hő hatására nem lobbannak lángra, nem parázslanak és nem szenesednek.
- Az **éghető anyagok** az oxigénnel hő fejlődése mellett egyesülnek. *Nehezen éghetők* azok, amelyek lángja, parazsa a hőforrás eltávolítása után megszűnik, pl. kemény PVC. Az MSZ EN 1127-1:2009 szabvány részletesen ismerteti.
- **Jól éghető anyagok** azok, amelyek tűz vagy hő hatására lángra lobbannak, parázslanak, szenesednek és a tűzforrás eltávolítása után e jelenségek tovább fennmaradnak (pl. fa, papír, szalma stb.).
- Az **öngyulladó (piroforos) anyagok** levegővel érintkezve maguktól meggyulladnak; pl. vasszilfid, urán. A piroforos anyagok gyakran a párás levegőn vagy víz alatt is meggyulladnak és égnek. Tárolásuk, szállításuk különös gondosságot igényel.
- Az öngyulladásra képes anyagok termikus tulajdonsága az *öngyulladási hőmérséklet*, amely az a legkisebb hőmérséklet, amelyen spontán gyulladás következik be. Értéke függ az oxigén parciális nyomásától, a tengerszint feletti magasságtól és az öngyulladáshoz szükséges időtől (példák: fehér foszfor 34°C, Mg 473°C, papír 450°C, dietil-éter 160°C, gázolaj 280°C, butángáz 405°C, hidrogén 536°C).

1.3.7. A környezettel való kölcsönhatás szerinti csoportosítás; környezeti tulajdonságok

- **Szennyező anyagok**: az ember által termelt (pl. szennyvíz, füstgázok, ipari hulladékok stb.), ill. a természeti folyamatokban keletkező anyagok ama fajtái, amelyek a földi élet és körforgási folyamatok feltételeit károsan befolyásolják.
- **Mérgező anyagok**: az ember által termelt (pl. nehézfémek, vegyszerek stb.), ill. a természeti folyamatokban keletkező anyagok azon fajtái, amelyek az élő szervezeteket pusztítják.
- **Környezetbarát anyagok**: azok a természetes, vagy mesterséges anyagok, amelyek a környezetbe kerülve azt nem befolyásolják hátrányosan, elfogadható időtartamon belül lebomlanak (biodegradábilis anyagok), illetve nem kerülnek a természetes körforgásba, mivel begyűjthetők és újra feldolgozhatók.

A környezeti tulajdonságok

A környezeti tulajdonságok megfogalmazása viszonylag új szemlélet eredménye, amely jelentős hangsúlyt helyez arra, hogy az anyagok gyártásában és felhasználásában és a használatuk utáni kezelésében helyezzék előtérbe a hosszú távú humán értékeket. Ennek nyomán rendelhetünk környezeti tulajdonságokat az anyagokhoz:

- **Tárolt energia**: az adott anyag egységnyi mennyiségének előállításánál felhasznált energia, melyre példákat tartalmaz az 1-1. táblázat:

Anyag	Energia (MJ / kg)	Alapanyag
Tégla	2–5	Agyag
Cement	5–9	Mészkő
Papír	20–25	Fa
Vas	20–25	Vasérc
Üveg	18–35	Homok
Műanyagok	60–120	Kőolaj
Réz	60–125	Rézérc
Alumínium	227–342	Bauxit

1-1. táblázat: Néhány anyag gyártására jellemző, az előállítása révén „benne tárolt" energia

- **Veszélyesanyag-tartalmi megfelelőség**; az EU-ban az ún. RoHS-direktíva és a WEEE-direktíva szigorúan szabályozza a forgalmazott termékek veszélyesanyag-tartalmát: Pb (ólom), Hg (higany), Cd (kadmium), Cr^{6+} (hat vegyértékű krómion), PBB (polibrómozott bifenilek), PBDE (polibrómozott difenil-éterek). Az előírt határértékeknek való megfelelőséget egyre több terméken címkékkel is jelölik (1-6. ábra).

1-6. ábra – A környezetvédelmi EU-direktíváknak való megfelelést tanúsító címkék (a-d), az újrahasznosíthatóság jele (e-f)

- **Beszerezhetőség, hozzáférhetőség**: e sajátos szempont szerint beszélhetünk, pl. könnyen, illetve nehezen beszerezhető anyagokról, import, „embargós", stratégiai anyagokról stb. A francia autóiparban, az 1970-es években visszaszorult a Cr-ötvözésű acélok felhasználása a készletek kímélése, és az importfüggés csökkentése érdekében. Ez eredményezte viszont, pl. a bórral ötvözött acélok kifejlesztését, illetve a gömbgrafitos öntöttvas alkalmazásának elterjedését az autógyártásban.

A nukleáris fűtőanyagok (urán, plutónium), a robbanóanyagok, ill. más, katonai és/vagy politikai szempontból kényes anyagok forgalmát jelenleg is szigorú ellenőrzés alatt tartják.

- A Földön való előfordulása szerint mind a földkéregben (47%), mind pedig a vizekben (85%) az oxigén a legnagyobb mennyiségben előforduló elem.
- **Újrahasznosíthatóság**: a kimerülőben lévő források miatt e tulajdonság jelentősége nőttön nő, ezért e kérdéskört a későbbi fejezetekben részletesen ismertetetendő anyagokra különkülön tárgyaljuk.

1.3.8. Az anyagtulajdonságok „eloszlása” szerinti csoportosítás

- Az **izotrop anyagok** tulajdonságai függetlenek attól, hogy a belsejükben, avagy a felületükön milyen irányban mérve vizsgáljuk azokat. Izotropnak tekintjük a mindennapi életben felhasznált anyagokat, ha a teherbírásuk nem tér el jelentősen a rájuk ható terhelés iránya szerint.
- Az **anizotrop anyagokban** (azok belsejében, ill. felületén) a tulajdonságok eloszlása irányfüggő (pl. fa, egyes sziklák, a hengerelt acéllemezek, a szénszál, a jól hasadó szilícium egykristály, a grafit, a folyadékkristályok stb.).
- Az **ortotrop anyagokban** a tulajdonságok a tér 3 tengelye mentén definiálhatók (pl. ortotrop szerkezetek a hídpályák vasbetonlemezei vagy a repülőgépek szálerősítéses kompozit vezérsíkjai).

1.3.9. Az anyagok csoportosítása kémiai kötés és atomszerkezet szerint

– **A anyagok kémiai kötéstípusai**

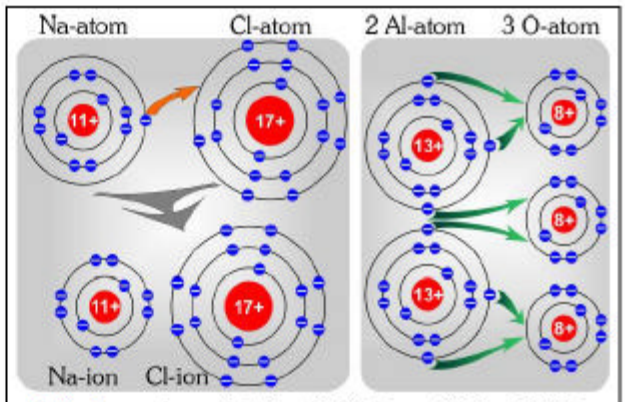
A kémiai tanulmányokból jól ismert kell, hogy legyen, hogy az atomok közötti kötési energia szerint a kémiai kötések a következők lehetnek:

- Elsődleges vagy erős kötések:
  - fémes kötés,
  - ionos kötés,
  - kovalens kötés, amelynek változatai:
    - datív (koordinációs) kötés,
    - σ-kötés,
    - π-kötés.
- Másodlagos vagy gyenge kötések, másként: Van der Waals-féle molekulavonzások:
  - diszperziós kölcsönhatás,
  - dipólus-dipólus kölcsönhatás,
  - hidrogénkötés

A fenti kémiai kötések közül a legalapvetőbbek főbb jellemzőit tekintjük át.

– **Az ionos kötés (1-7. ábra)**

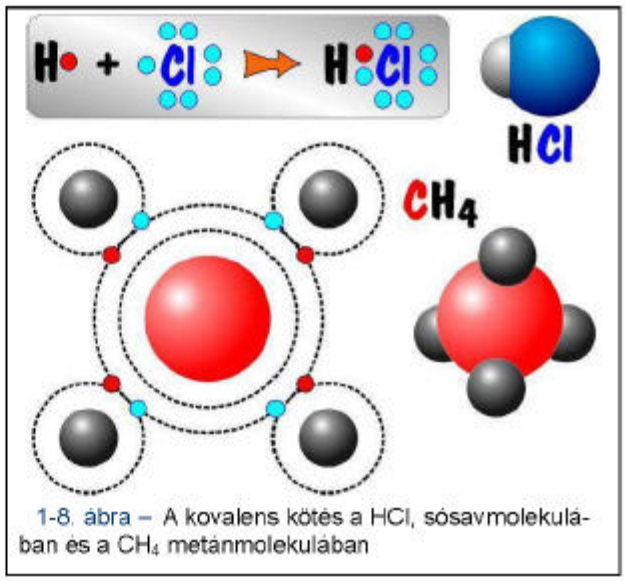
- Egy fémes és egy nemfémes elem között jön létre. A kötés erős, stabil.
- A nemfémes anyag atomja leszakít egy elektront a fém külső elektronhéjáról.
- A fém atomja kationná (pozitív ionná) válik, a nemfémes anyag atomja pedig anionná.
- A kationok és az anionok egy ionrácsot (rácspontjain ionokat tartalmazó kristályrács) alkotnak.
- Az alkotóelemekből álló vegyület kémiai képlete megfelel a kationok és az anionok legegyszerűbben kifejezett arányának.



1-7. ábra – Ionos kötés a NaCl és az Al_2O_3 példáján

– **A kovalens v. atomos kötés (1-8. ábra)**

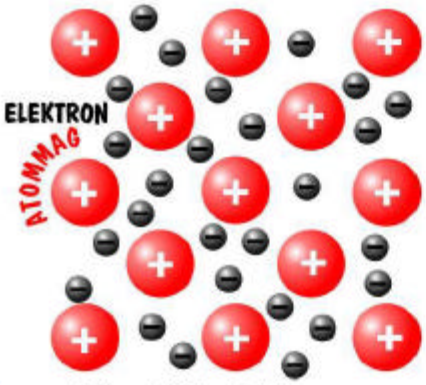
- Nemfémes anyagok atomjai alkotják.
- A kötés közös elektronpárok létrejöttével alakul ki, az atomok molekulákat alkotnak (Lewis-modell, 1915.).
- A molekulák összetevői határozzák meg a molekula kémiai képletét.
- A legerősebb kémiai kötés. A kötési energia nagysága irányfüggő.



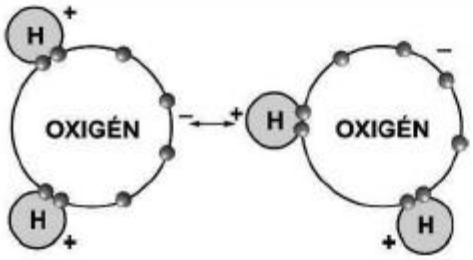
1-8. ábra – A kovalens kötés a HCl, sósavmolekulában és a CH_4 metánmolekulában

– **A fémes kötés jellemzői (1-9. ábra)**

- Fémes anyagok atomjai alkotják (de nem minden fém atomjai alkotnak fémes kötést, pl. a szilícium atomjait kovalens kötés tartja a kristályrácsban).
- Nem irányított kötés, a kötési energia minden irányban azonos, de kisebb, mint az ionos és a kovalens kötésben.
- A fématomok leadják vegyértékelektronjaikat, amelyek közös, delokalizált elektronok alkotta elektronfelhőt képeznek.
- Ez a sajátos elektronszerkezet magyarázza a fémek jó villamos és hővezető képességét.



1-9. ábra – A fémes kötés vázlata



1-10. ábra – A Van der Waals-kötés vázlata

– **A Van der Waals-féle kötések (1-10. ábra)**
  - Más atomokhoz elsődleges kötésekkel kapcsolódó atomok, illetve molekulák közötti másodlagos kötés.
  - A kötési energia csak kb. századrésze az elsődleges kötésekének.
  - Kialakulása az elektronoknak az atommaggal alkotott dipólusai közötti kölcsönhatásra vezethető vissza.
  - Nem irányított kötés, de erőssége a távolsággal jelentősen csökken (az atomok úgy viselkednek, mint az olyan mágnesek, amelyek pólusai folyamatosan elmozdulnak).
  - A kötési energia annál nagyobb, minél nagyobb az elektronfelhő (ezzel magyarázható az, hogy a halogén elemek rendszámának növekedésével változik a szobahőmérsékletre jellemző halmazállapot is: a klór gáz, a bróm folyadék, a jód pedig szilárd.
  - A kötéstípusok jellemzőit az 1-2. táblázat foglalja össze.

	Ionos kötés	Kovalens kötés	Fémes kötés	Van der Waals-kötés
Jellege	Ellentétes töltésű ionok elektrosztatikus vonzása	Közös elektronpár(ok)	A szabadelektronok közösek	Gyenge kötés semleges atomok között
Szerkezeti tulajdonságok	Nem irányított, sűrű szerkezet	Irányított kötés az atomok között, nem túl sűrű szerkezet	Nem irányított, nagyon sűrű szerkezet	Nem irányított
Mechanikai tulajdonságok	Erős kötés	Erős kötés	Változó	Gyenge kötés
Termikus tulajdonságok	Elég nagy olvadáspont	Nagy olvadáspont a szilárd anyagok körében	Változó olvadáspont	Kis olvadáspont
Villamos tulajdonságok	Közepes szigetelő	Szigetelő	Vezető	Szigetelő
Példák	NaCl, Al_2O_3, SiO_2	Gyémánt, HCl, CH_4,	Cu, Fe, Al, Pb	A hőre lágyuló műanyagok

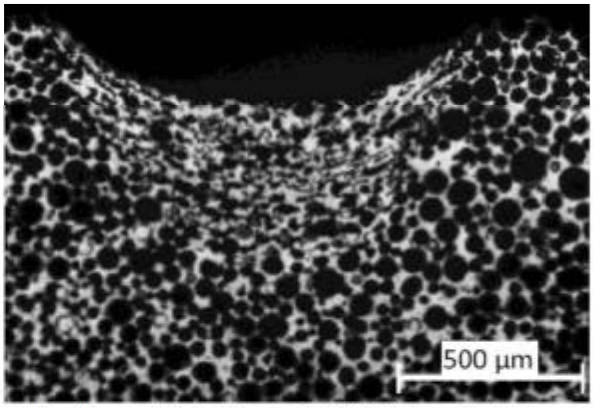
1-2. táblázat: A kémiai kötéstípusok jellemzőinek összehasonlító táblázata

1.3.10. Különleges jellemzők

– **Az anyagok felosztása tömörségük szerint**

„Amikor a modern ember nagy teherbírású szerkezeteket épít, tömör anyagokat használ fel: acélt, betont, üveget. Amikor viszont a természet teszi ugyanezt, általában cellás – mondhatni: lyukacsos – anyagokból építkezik: fából, csontból, korallból. Bizonyára jó oka van ennek.", fogalmaz *M. F. Ashby*, a University of Cambridge világhírű professzora.

A tömörség szerint régóta beszélünk tömör és porózus anyagokról. Utóbbiakat már gyakran nevezzük cellás anyagoknak vagy haboknak.



1-11. ábra – Acélgolyó okozta felületi benyomódás 65% pórust tartalmazó alumíniumhab felületén, keresztmetszeti képen

A hídépítésben régen felváltották a tömör szerkezeteket (kőhidak) rácsos szerkezetekkel, ám maguk a hídszerkezeti anyagok tömörek (acél vagy beton). A cellás mikroszerkezetű anyagok azonban már hosszú ideje ismertek (pl. a porcelán vagy a fa), és megfigyelhető, hogy az új anyagok kifejlesztésének egyik fontos irányzata a cellás, nagy porozitású anyagok létrehozása, és alkalmazási területük kiszélesítése. Az 1-11. ábra járművázszerkezetek – autók, repülők, tengeralattjárók – merevítésére, rezgés- és zajszigetelésére használt alumínium fémhab felületi benyomódásának metszetét mutatja.

A nagyszilárdságú és nagy hőállóságú kerámiák, a vízen úszó fémhabok, a nagy tűzállóságú aerogélek és más, különlegesen könnyű anyagok elterjedését minden bizonnyal az fogja meghatározni, hogy mennyire csökkenthető az áruk. Ameddig ez nagyon nagy, megmaradnak a csak az árra érzéketlen alkalmazások terén.

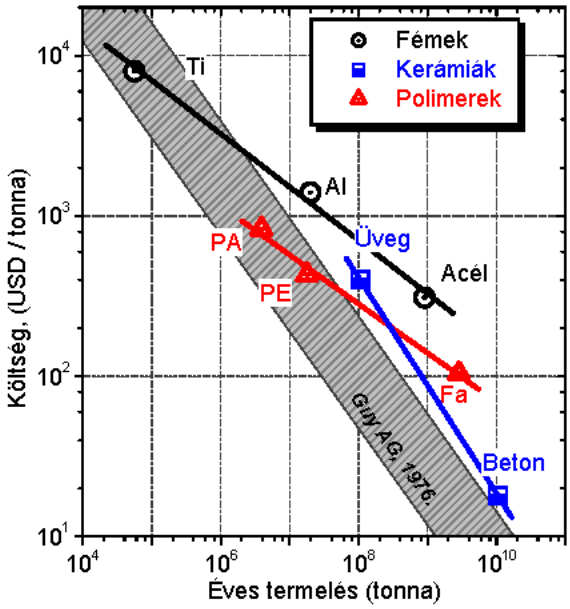
– **Az anyagok csoportosítása a gyártási, kereskedelmi stb. költségek szerint**

A fémes szerkezeti anyagok döntő részének árát a világkereskedelmi rendszerek határozzák meg az aktuális kereslet, kínálat és készletek, valamint a különféle előrejelzések alapján.

A csoportosítás alapja lehet, pl. a piaci ár nagyságrendje, de ugyancsak sokatmondó a kereskedelmi forgalomban alkalmazott mértékegység: az acélt ezer tonnában, az aranyat unciában mérik. Ebben a tekintetben hasznos információkat lehet találni a fémek és egyéb anyagok kereskedelmére vonatkozó adatbázisokban, ill. az alapanyaggyártó és újra feldolgozó vállalatoknál.

Az 1-12. ábra eredeti változatát *A. G. Guy* közölte 1976-ban, és arra világított rá vele, hogy az ipari anyagok ára viszonylag szoros korrelációban áll a termelt mennyiségükkel. *Guy* eredeti adatai alapján a diagramon a szürkére színezett sáv fedi le az adatpárokat. A jelenlegi adatokat feltüntetve az eredeti termékekre, a két vastag vonal határolja az aktuális mennyiség–költség tartományt, és az is látható, hogy hosszabb távon (az ábra kb. 30 évet fog át) csökken a mennyiségcsökkenéssel járó drágulás. Azt is észre kell venni, hogy továbbra is a fémek a legdrágább ipari anyagok (tehát nem az ékszerekre kell gondolni), amennyiben az árakat a tömegre vonatkoztatjuk.

Az 1-3. táblázat egyes ipari anyagok árát mutatja 1980-as és 2003-as adatok alapján (az adatok USD/tonna dimenziójúak).



1-12. ábra – Az anyagok mennyisége és ára közötti kapcsolat 1976-ban (szürke sáv) és 2003-ban

Anyag	1980.	2003.
Acél	385	320
Acél (horganyzott)	470	530
Acél, rozsdamentes	2 750	2 300
Alumínium	2 000	1 546
Arany	19 100 000	13 150 000
Bronz	1 505	1 100
Cement	533	52
Ezüst	1 140 000	180 000
Homok (SiO_2)	3,3	7,5
Horgany (Zn)	733	974
Ipari gyémánt	900 000 000	2 500 000 000
Kobalt	17 200	41 900
Króm	7 700	9 640
Molibdén	34 000	15 542
Nikkel	7 031	13 300
Nióbium	14 128	34 722
Ólom	961	685
Ón	18 322	5 860
Öntöttvas	260	250
Platina	26 000 000	26 270 000
Réz	2 253	2 170
Szilícium-karbid	630	390
Titán (ferrotitán)	12 300	7 800
Vanádium (ferro-V)	12 100	12 180
Volfrám	26 000	10 360
Volfrám-karbid	66 000	4 800

1-3. táblázat: Egyes ipari anyagok tonnánkénti ára 1980-ban és 2003-ban

– **Az anyagok felosztása a megismerésük időpontja szerint**

Az „életkor” alapján beszélhetünk tradicionális anyagokról, amelyek közé azokat az anyagokat soroljuk, amelyeket az emberek hosszú ideje ismernek és használnak. Új anyagoknak nyilvánvalóan azokat tekintjük, amelyek ismerete és/vagy alkalmazása csak nagyon rövid időre nyúlik vissza. Éles határvonalat nem lehet vonni, a két kategória között. Jó esélyű, hogy előbb-utóbb minden új anyag (pl. a fémüvegek, fémhabok, fullerének, szénnanocsövek, szupravezető kerámiák stb.) hagyományos anyaggá válik, miként az alumínium is azzá vált, jóllehet 100 éve még ritkaságnak számított. Néhány példát mutat az 1-4. táblázat az ember által használt anyagok megismerésére, „születésére” vonatkozóan:

Mikor?	Milyen anyag?	Ki? / hol?
Kr. e. 4000	Tégla, cserép	Sumérok
Kr.e. 2800	Bronz	Égei-tenger körül
Kr.e. 2500	Üveg	Egyiptom
Kr.e. 2000	Vas	Európa
~ 0	Acél	India
800–900.	Porcelán	Kína
1700.	Kokasz	*Abraham Darby*
1824.	Cement	*Joseph Aspdin*
1839.	Gumi	*Charles Goodyear*
1867.	Vasbeton	*Joseph Monier*
1886.	Alumínium	*P. L. T Héroult*
1899.	Aszpirin (Bayer)	Felix Hoffmann
1904.	Korrózióálló acél	*L. Guillet, A. Portevin*
1906.	Nemesíthető Al-ötvözet	*Alfred Wilm*
1907.	Bakelit	*L. H. Baekeland*
1955.	Mesterséges gyémánt	General Electric
1962.	Nitinol (Ni-Ti ötvözet)	*W. J. Buehler*
1986.	Szupravezető kerámia	*A. Müller, G. Bednorz*
2000.	Bohrium, Bh (Z = 107)	*R. Eicher*

1-4. táblázat: Néhány anyag megismerésének jellemzői

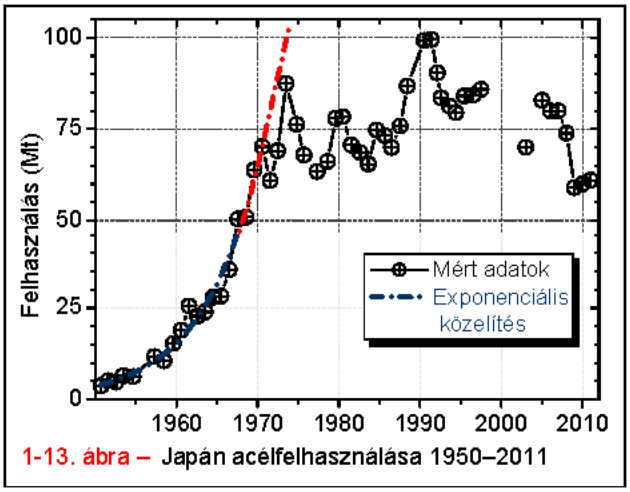
Az ipari anyagok termelési és fogyasztási adatainak hosszú időre visszanyúló adatsorai azt mutatják, hogy szinte minden anyagnak, amelyet a gazdasági–társadalmi fejlődés előtérbe helyez, hasonló a felhasználást az idő függvényében mutató „életgörbéje”. Kezdetben nagyon kis mennyiséget igényel az ipari és a lakossági fogyasztás, és ez nagyon lassan bővül. Mivel azonban csökkennek az előállítási költségek, és kialakul a fogyasztói igény, fokozatosan növekszik a kereslet, amely növekvő termelést indukál.

Az M fogyasztás időbeli növekedése jól leírható egy exponenciális függvénnyel: ezt mutatja a 1-13. ábra, amely Japán acélfogyasztásának fejlődését szemlélteti. A növekedési ütem exponenciális szakaszát leíró függvényben r jelöli az százalékos évenkénti növekedési rátát.

$$\frac{dM}{dt} = \frac{r}{100} M \ , \ M = M_0 \cdot \exp\left[\frac{r}{100}(t - t_0)\right].$$

Természetesen előbb-utóbb kifullad a gyors növekedés (az acél éppen ebben a szakaszban tart ma), és akár csökkenés (kadmium, higany), sőt, teljes visszafejlődés (káros vegyszerek, gyógyszerek) – majd reneszánsz – is bekövetkezhet, amint az a fémes anyagok között a magnéziumnál jelenleg megfigyelhető.

Megjegyzés: A „növekedés” a ma uralkodó gazdaságfilozófiák bűvszava; de már az elvárható minimális antropologizmussal is az önpusztítás szinonimájának tekinthetjük.



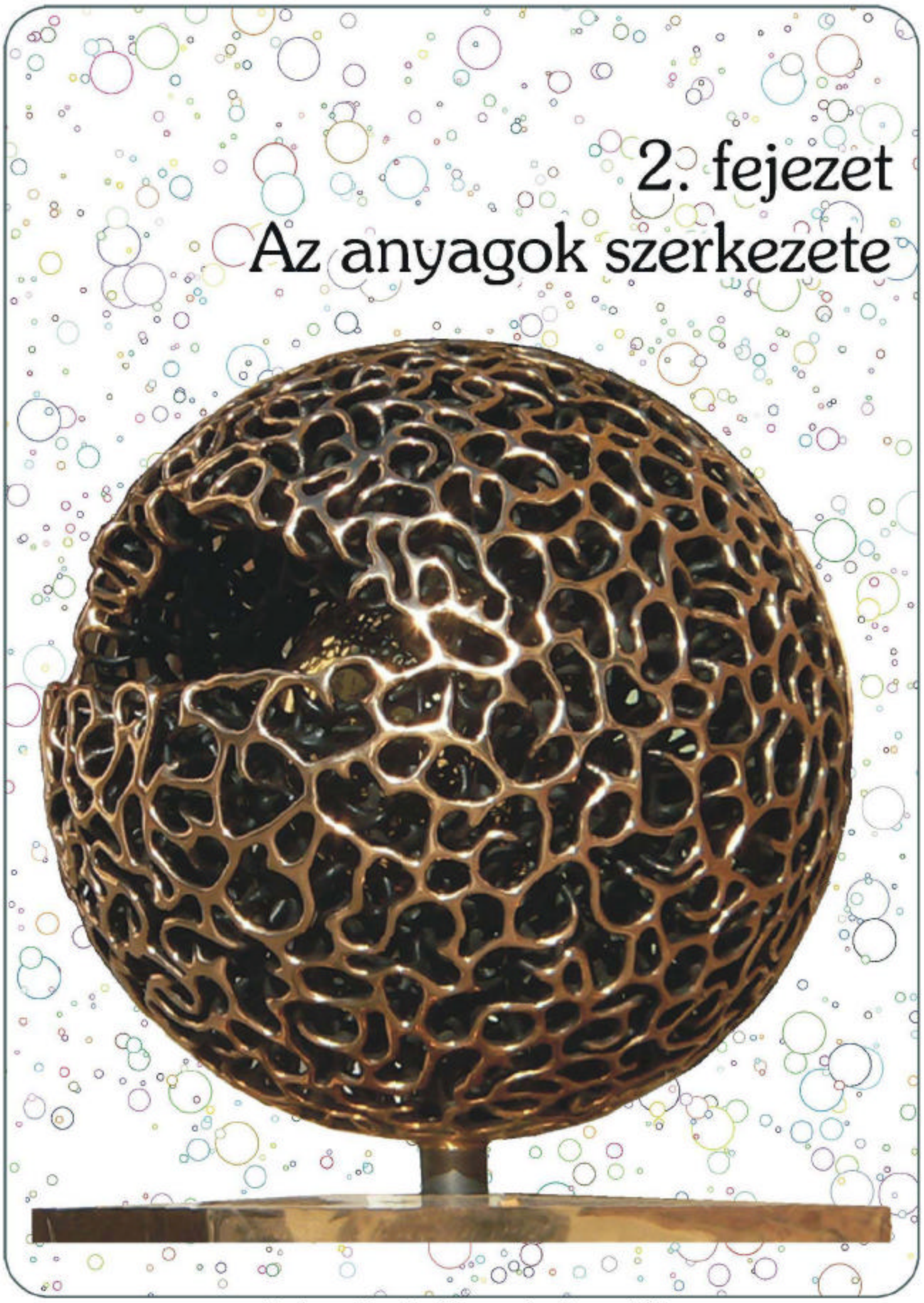
1-13. ábra – Japán acélfelhasználása 1950–2011

Az anyagok felhasználását számtalan körülmény befolyásolja. Mindössze kettő álljon itt, amelyek a jelenkori gazdaságokban markánsan megfigyelhetők: az új anyagokkal való helyettesítés és az újrafeldolgozás.

Jól ismert példaként említhető a háztartási vízvezetékek és fűtési rendszerek csővezeték-anyagainak változása. Az ólomcsöveket horganyzott acélcsövek, majd polietiléncsövek váltották fel a hidegvízvezetékekben, a melegvízcsövek terén viszont egyre terjed az acélt felváltó réz. 20 éve még nem volt alternatívája az ezüstnek a fotográfiában, ma viszont – a digitális fotózás rohamos terjedésével – már-már aggódni kell a fotópapírért.

Az újrafeldolgozás a környezetvédelmi szempontok mellett alapvető gazdasági érdek a fémek az üveg, a papír és a műanyagok terén egyaránt.

2. fejezet
Az anyagok szerkezete



Gianfranco Meggiato: Sfera con sfera (bronz, 2007)

2. Az anyagok szerkezete

2.1. Az anyagok rendeződése

Az előző fejezetben megvizsgáltuk az anyagok csoportosítására szolgáló szempontokat. Fontosságuk miatt kiemelten kell tárgyalni azt a két szempontrendszert, amely az anyagok jellemzőit a műszaki, a fizikai és a kémiai ismeretek együttes alkalmazásával írja le: e két fogalomkör az *anyagszerkezet* és a *mechanikai tulajdonságok*.

Az atomokból felépülő anyagok szerkezetének milyensége ugyanolyan jelentőségű, mint az, hogy a szóban forgó szerkezetet milyen kémiai elemek alkotják. Az anyag szerkezetét a tantárgyunk szempontjából az atomok szerveződésétől, elrendeződésüktől a nagyobb térfogategységek irányába haladva kell értelmezni.

A 2-1. táblázat azt szemlélteti, hogy a hőmérséklet, valamint az atomok rendezettségének kiterjedtsége függvényében miként különíthetők el a gáz, a folyadék és a szilárd fázisok (lásd az 1-5. ábrát), és ez utóbbinak milyen főbb csoportjait különböztetjük meg.

		Rendezettségi hatótávolság, r_0 = atomsugár			
		0	3-10 r_0	> 100 r_0	∞
Hőmérséklet ↑	Gáz	Tökéletes gáz	Reális gáz		
	Folyadék		Folyadék		
	Szilárd		Amorf anyag	Reális kristály	Tökéletes kristály
		Tökéletes rendezetlenség	Rövid hatótávú rend	Hosszú hatótávú rend	Tökéletes rend

Üveg
Fém
Kerámia
Polimer

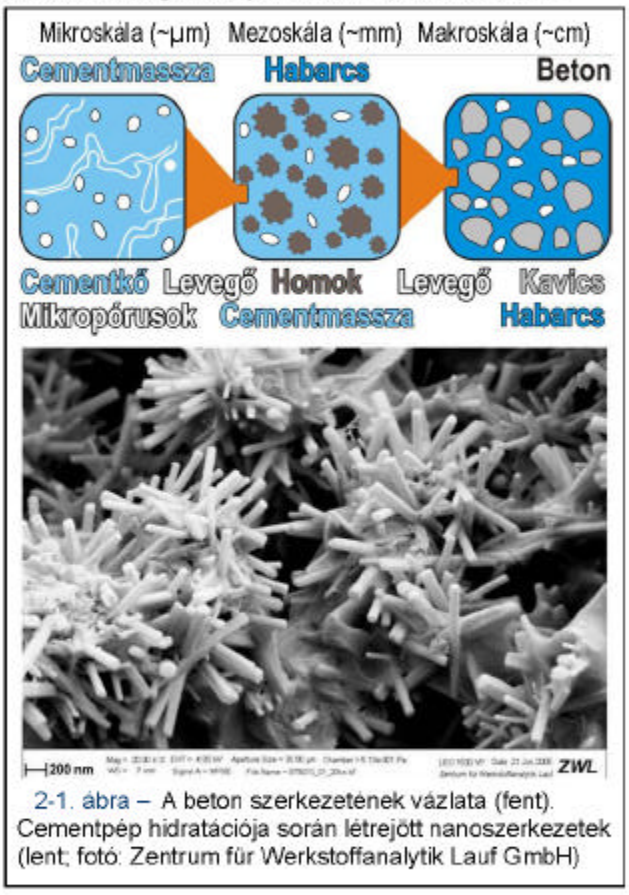
2-1. táblázat: Az anyagszerkezet és a rendezettség

Az *anyagszerkezet* kifejezés alatt számos, külön-külön is értelmezhető tulajdonságot kell érteni, amelyek mindegyike azzal kapcsolatos, hogy miként alakul az anyag belsejében (esetleg a felületén) az atomok, valamint más, az atomoknál nagyobb anyagfelépítő egységek elrendeződése. Úgy is fogalmazhatunk, hogy az anyag belsejében (felületén) értelmezhető rend milyensége az anyagszerkezet. Az ezt a rendet kifejező anyagszerkezeti tulajdonságokat különféle, nem teljesen éles határokkal elválasztható méretskálákon kell vizsgálni, amelyek a következők:

- Makroskála (5–50 mm) → makroszerkezet
- Mezoskála (0,1–5 mm) → mezoszerkezet
- Mikroskála (0,5–100 μm) → mikroszerkezet,
- Nanoskála (1–500 nm) → nanoszerkezet, kristályszerkezet, molekulaszerkezet

Az azonos méretskálán vizsgált anyagszerkezeti tulajdonságok együtt alkotják az adott skálán megadható anyagszerkezeti tulajdonságokat. Így például a mikroszerkezeti tulajdonságok jellemzően az egy mikrométer és a néhány száz mikrométer közötti nagyságrendbe eső anyagszerkezeti sajátosságokat jelentik. Ugyanannak az anyagnak egészen más tulajdonságai lehetnek érdekesek a különféle anyagszerkezeti skálákon.

A 2-1. ábra szerint például a betonra nézve a benne lévő kb. cm-es kavicsdarabok szemcseméret és eloszlása makroszerkezeti tulajdonság, a homokszemcsék eloszlása mezoszerkezeti jellemző, míg a megkövesedett cementhabarcs mikrorepedéseinek és mikropórusainak mérete mikroszerkezeti. Ha a nanoskálára is kiterjesztjük a vizsgálatot, akkor a 2-1. ábra fotóján látható molekulaszerkezet tárul fel. Ha pedig a méretskála másik végére pillantunk, ahol a betonba helyezett 1–100 méteres betonvashálót is figyeljük, akkor már az építmény szerkezetéről beszélünk.



2-1. ábra – A beton szerkezetének vázlata (fent). Cementpép hidratációja során létrejött nanoszerkezetek (lent; fotó: Zentrum für Werkstoffanalytik Lauf GmbH)

A továbbiakban az anyag szerkezetére való hivatkozásokban általában mikroszerkezetről fogunk beszélni abból az egyszerű megfontolásból, hogy a témánk fogalomkörében vizsgált anyagok és anyagtulajdonságok jellemzően a mikroskála tartományába eső anyagszerkezeti jellemzőkkel állnak a legszorosabb kapcsolatban.

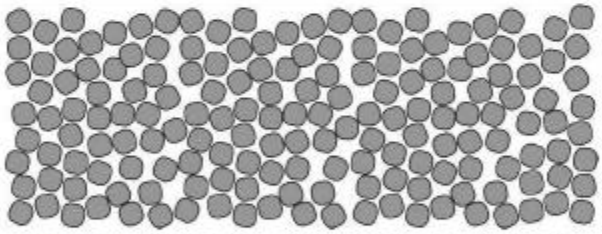
Amint láttuk, a 2-1. táblázatban, az anyagszerkezet a legáltalánosabb értelemben az atomok rendezettségének mértékével írható le. Ezt a rendezettséget döntően befolyásolja a hőmérséklet és a nyomás, bár ez utóbbi *állapottényezőnek* a gyakorlatban ritkán van érzékelhető szerepe a szilárd anyagoknál. A szilárd anyagokat a mikroszerkezetük és az ezzel szorosan összefüggő tulajdonságaik alapján 5+1 nagy anyagcsaládba soroltuk (lásd az 1.3.3. fejezetet).

2.2. A szilárd anyagok szerkezete

A hőmérséklet kellő mértékű csökkenésekor az folyadékok, olvadékok megszilárdulnak. Az anyagot felépítő atomok, illetve molekulaláncok rendezettségének mértékétől függően a szilárd halmazállapotú anyag lehet:

- amorf vagy
- kristályos, esetenként pedig
- kvázikristályos.

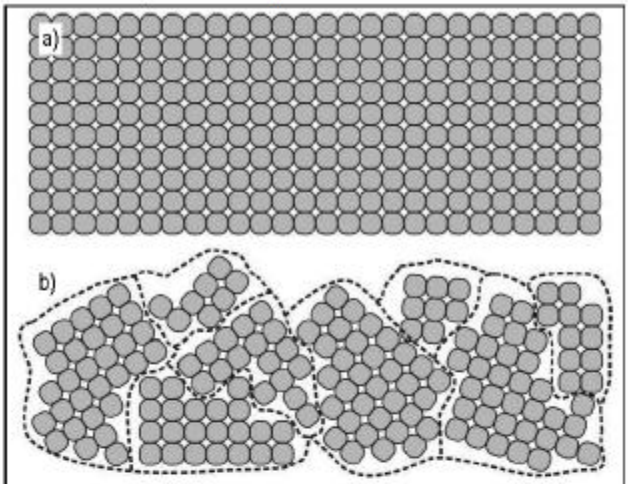
Az elasztomerek és az üvegek, továbbá a polimerek és a kerámiák jelentős része, valamint a rendkívül gyorsan hűtött fémolvadékokból képződő fémüvegek szerkezetét vizsgálva figyelhető meg az a jelenség, hogy az atomok nem alkotnak szabályos elrendeződést: ezek az amorf anyagok. Az atomok amorf elrendeződésének síkbeli vázlatát a 2-2. ábra mutatja.



2-2. ábra – Az amorf anyagok atomjainak eloszlása

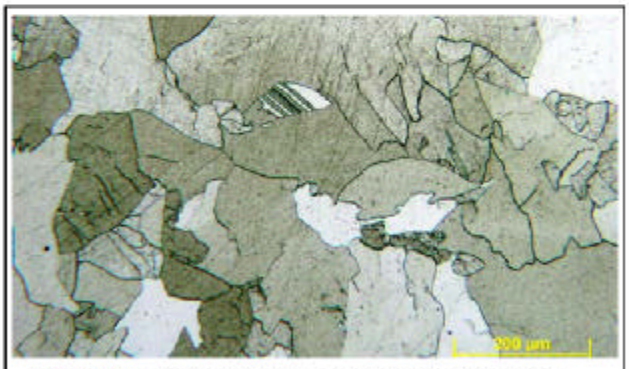
A kristályos megszilárdulásnál az atomok vagy a molekulák egy szabályos térrács – a kristályrács, molekularács – rácspontjaira illeszkednek. A kristályos anyag minden atomja rácspontban ül, és minden rácspontban található atom, s végül a kristály alakja szabályos. Ha e feltételek egyike nem teljesül, a kristály nem tökéletes, pontosabban fogalmazva: nem hibamentes.

A térbeli kristályrácsot képzeletben elemi darabokra – pl. kocka – lehet bontani: ezeket elemi celláknak nevezzük. Az egymáshoz illeszkedő elemi cellák tehát a kristályos anyag geometriai egységei. Amikor a kristályrács az anyag minden pontján azonosan irányított elemi cellákból épül fel, egykristályról beszélünk: a 2-3.a ábra egy egyszerű síkrácsot ábrázol, amelynek elemi cellái a rácsot alkotó négyzetek. Ám ha az anyag belsejében elhatárolhatók olyan tartományok, amelyek irányítottsága (orientációja) eltérő, polikristályról beszélünk (2-3.b ábra).



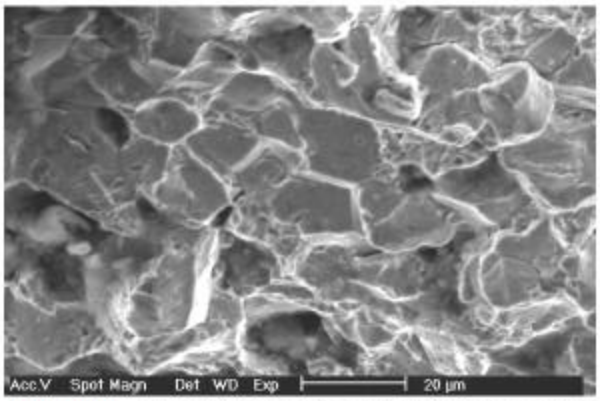
2-3. ábra – Egykristály (a) és polikristály (b) síkmetszete; a szaggatott vonalak jelölik a szemcsehatárokat

A szabálytalan alakú kristályt ***szemcsének*** vagy krisztallitnak nevezzük, és a ***szemcsehatár*** választja el őket egymástól. A 2-4. ábra tiszta vas metszeti felületén mutat néhány szemcsét és a köztük lévő szemcsehatárokat fénymikroszkóppal készített, ún. szövetszerkezeti képen: a szemcsék mérete a 2-4. ábrán látható képen a 20–100 μm tartományba esik, és a bennük szabályos rendet alkotó Fe-atomok átmérője kb. 280 pm.

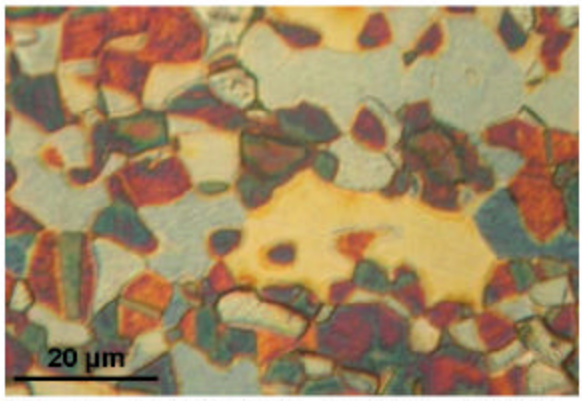


2-4. ábra – Polikristályos „tiszta" vas optikai mikroszkópos képe: a sötét vonalak a szemcsehatárok

A szemcsék és a szemcsehatárok jól feltárulnak akkor is, ha pl. a kis széntartalmú acélt lehűtve eltörjük; egy ilyen töretfelület látható a 2-5. ábrán.



2-5. ábra – Kis széntartalmú acél töretfelülete: a törési folyamatban a repedés döntően a szemcsék határait követve terjedt



2-6. ábra – Két fázis alkotta, ún. duplex acél optikai mikroszkópos képe; a sötét színű szemcsék fázisának neve ferrit, a világos színűeké ausztenit

2.3. A fémes anyagok szerkezete

Szobahőmérsékleten a ***fémek*** többsége szilárd halmazállapotú anyag. A legelterjedtebben alkalmazott fémek a vas, az alumínium és a réz. Az ***ötvözetek*** két vagy több fém atomjainak egyenletes eloszlású keverékei, pl. a réz (Cu) és a horgany (Zn) ötvözete, a sárgaréz. Gyakran fém és nemfém alkot ötvözetet, pl. a vas (Fe) és a szén (C) ötvözete az acél és az öntöttvas. A fémek általában jó hő- és villamos vezetők, a látható fény hullámhossztartományában nem átlátszók. A mechanikai tulajdonságaik – pl. alakíthatóság – széles tartományban változnak, de a (szín)fémek általában jóval lágyabbak, mint az ötvözeteik.

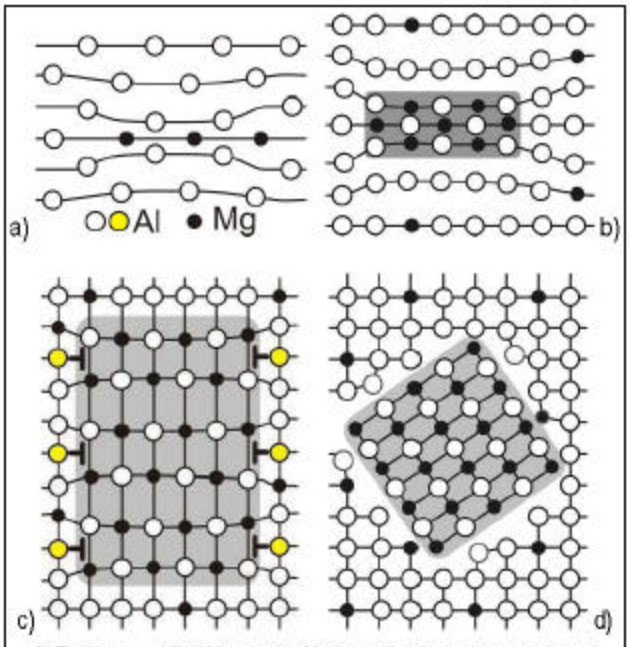
A fémes anyagok – tehát a fémek és az ötvözetek – különleges gyártási módszerekkel egykristályként is előállíthatók, de általában 1–100 μm-es szemcsékből állnak; ezek alakja azonban rendkívül változatos lehet akár ugyanabban az alkatrészben; ilyenkor a szemcsék méretében vagy / és alakjában jelentkező eltérés az anyag tulajdonságainak eltérését is maga után vonja.

A polikristályos anyag lehet egyfázisú vagy többfázisú. A 2-4. ábra látható vas csak egy fázist tartalmaz (eltekintve az apró foltokként jelentkező nemfémes zárványoktól), míg a 2-6. ábra mutatta szövetképen több (színben, méretben, alakban eltérő) fázis is megfigyelhető (a „fázis” fogalmát az 1.3.1. szakaszban definiáltuk).

A fázishatár mentén tehát egymástól jelentős mértékben eltérő tulajdonságú anyagok érintkeznek. Attól függően, hogy e határfelület mentén a kristályrácsok mennyire illeszkednek, háromféle fázishatártípust ismerünk (2-7. és 2-8. ábra):

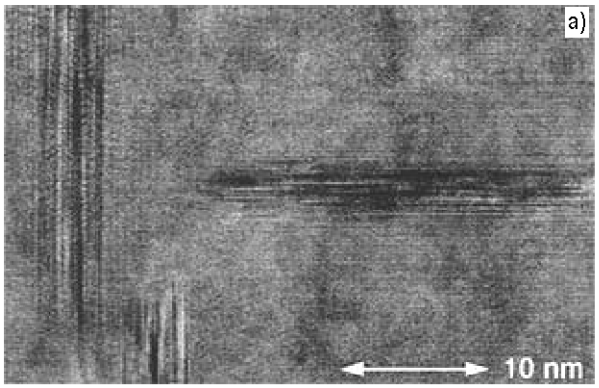
- koherens (összefüggő),
- inkoherens (nem összefüggő),
- szemikoherens (félig összefüggő).

A fázishatároknak, illetve azok koherenciájának a szerepe a fémes anyagok nem kis részénél nagyon jelentős. Azokról az anyagokról van szó, amelyekben a lehűlés közben vagy az üzemeltetés során fellépő külső hatásokra az eredeti alapanyagtól – a mátrixtól – eltérő fázisok, ún. kiválások jönnek létre. A 2-7.a ábra azt szemlélteti, hogy az alumínium alapmátrixban már viszonylag kevés ötvözőatom csoportosulása is módosítja a szerkezetet; az ötvöződúsulási zónák át tudnak alakulni a b)–d) ábrán látható kiválásokká.

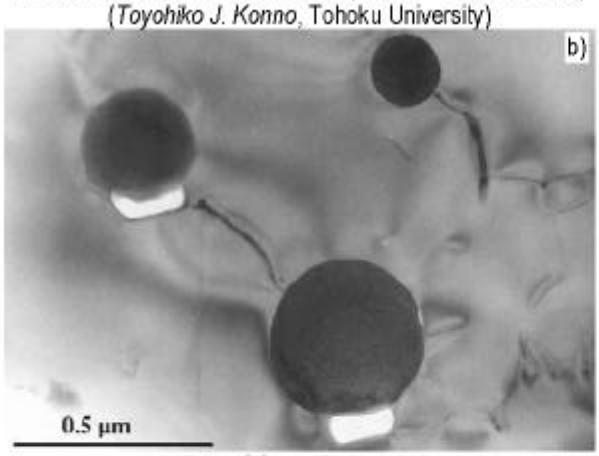


2-7. ábra – Kiválások és fázishatáruk: koherens vagy összefüggő (a és b), szemikoherens (c), inkoherens (d)

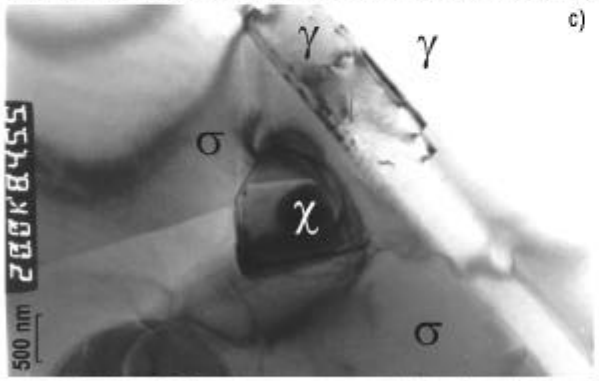
A szilárdság növelése céljából tudatosan gyártanak kiválásokat tartalmazó alumíniumötvözeteket (Ni-ötvözetből turbinalapátokat stb.). A fémes anyagok hegesztése, hőkezelése vagy üzemelése közben is képződhetnek kiválások, és okozhatnak nemkívánatos hatást számos esetben. A kiválások szerepére külön is kitér a 3.4.3. szakasz.

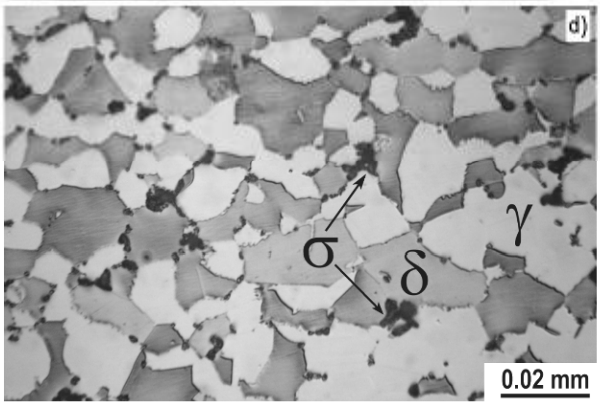


Koherens kiválások Al-ötvözetben (Guinier–Preston-zónák)
(*Toyohiko J. Konno*, Tohoku University)



Inkoherens Fe-kiválások $(Fe,Mg)_2SiO_4$ olivinben
(*H. Leroux*, Université des Sciences et de Technologie, Lille)



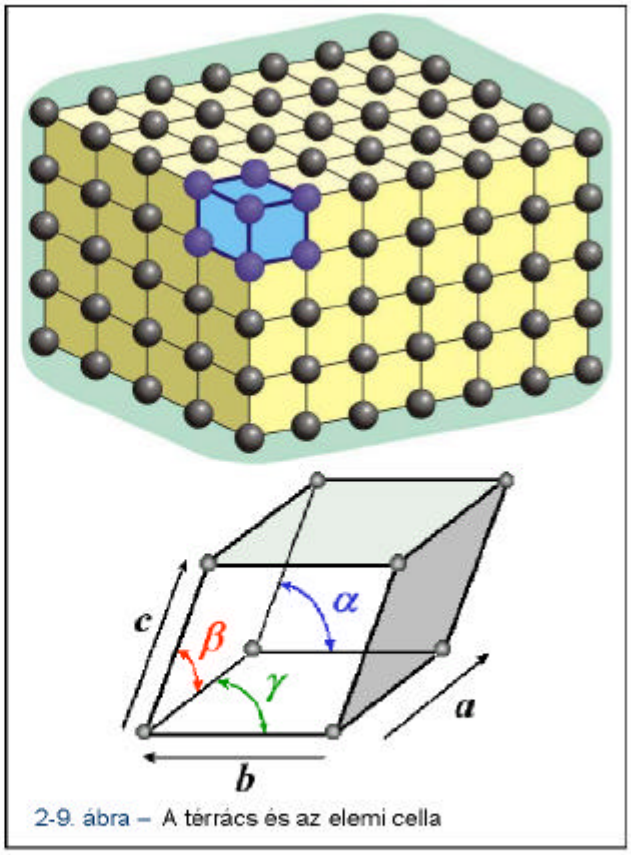


SAF2507 duplex rozsdamentes acélban keletkezett kiválások
(a görög betűk a különféle fázisokat jelölik)

2-8. ábra – Kiválások transzmissziós elektronmikroszkópi és optikai mikroszkópi képeken

2.4. A kristályos anyagok szerkezete

A fémek és az ötvözetek a legtöbb esetben kristályos anyagok. A kristályban az atomok térbeli kristályrácsot alkotnak: ennek legkisebb egysége az elemi cella, melyet vázlatosan a 2-9. ábra szemléltet. Az elemi cella az a legkisebb térelem, amely a kristályrács 3, egymástól független irányában folyamatosan ismétlődik. A szóban forgó irányok és a térelemek távolsága adja a 3 transzlációs egységvektort, és ezek hossza (a, b, c), valamint az egymással bezárt szögük (α, β, γ) egyértelműen meghatározza a kristályrendszert.

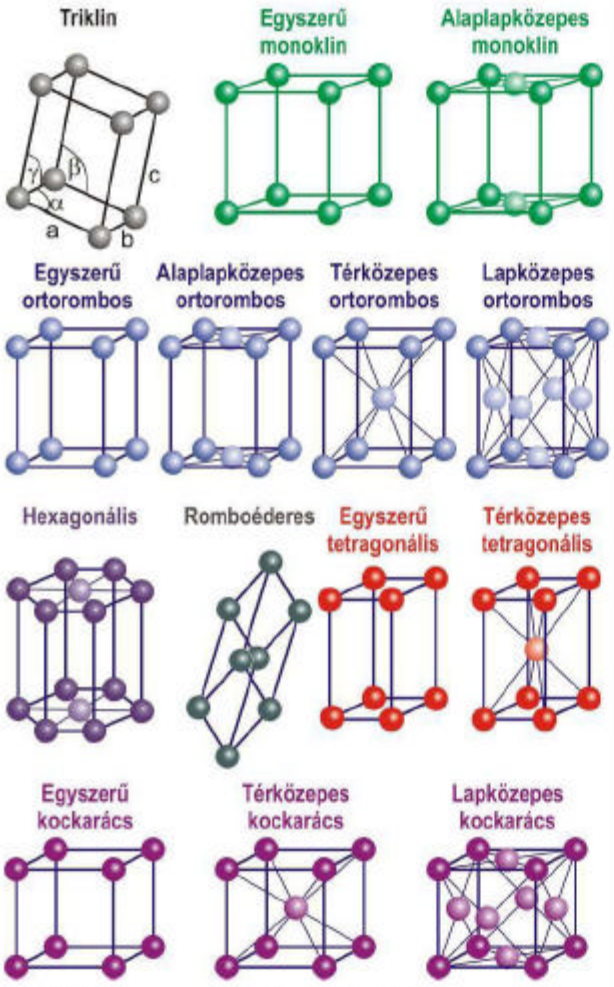


2-9. ábra – A térrács és az elemi cella

A természetben előforduló összes kristályos anyag besorolható 7 kristályrendszerbe, melyeknek összesen 14 alaptípusa létezik aszerint, hogy az elemi cella csúcsain kívül hol található még atom: a cella, a lapok vagy az alaplapok középpontjában. Mindezeket *August Bravais* határozta meg 1849-ben. A kristályrendszerek és a Bravais-féle térrácsok a következők:

- kockarács vagy köbös rács (Al, Cu, Fe, W),
- tetragonális (Cl, α-Sn, TiO_2, martenzit),
- ortorombos (α-S, Ga, Fe_3C, α-U),
- hexagonális (Be, Mg, Ti, Zn, grafit),
- romboéderes vagy trigonális (Sb, Bi, Hg),
- monoklin vagy egyhajlású (F, α-S, Se),
- triklin vagy háromhajlású (K_2CrO_7).

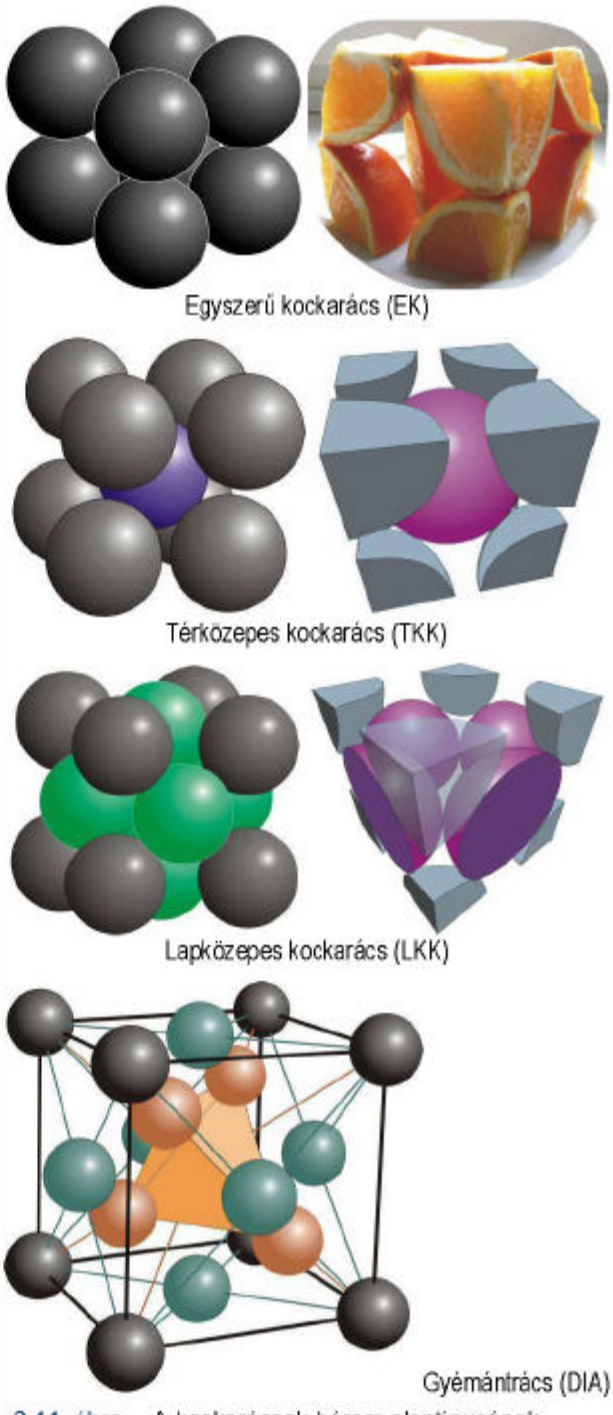
Az egyes kristályrendszerek elemi celláit és az azt kifeszítő transzlációs egységvektorok jellemzőit a 2-10. ábra szemlélteti.



2-10. ábra – A Bravais-féle 7 kristályrendszer 14 különböző kristályrácstipusa

A 2-10. ábrán bemutatott 14 féle térrács közül a legjelentősebb a köbös rácsrendszer, ugyanis a gyakorlati életben használt legfontosabb fémek és ötvözetek legnagyobb részét valamelyik kockarács jellemzi. Ezzel az ábrával ellentétben, amelyen a gömbök nem atomokat jelentenek, hanem csak rácspontokat, a valóságot sokkal inkább érzékelteti a 2-11. ábra, amely azt mutatja, hogy a térrácsban az atomok a lehetséges legszorosabb elrendeződést veszik fel, tehát a geometriai adottságok szerint egymással érintkező gömböknek tekinthetők. A köbös térrács alapváltozatai és jellemző példái a következők:

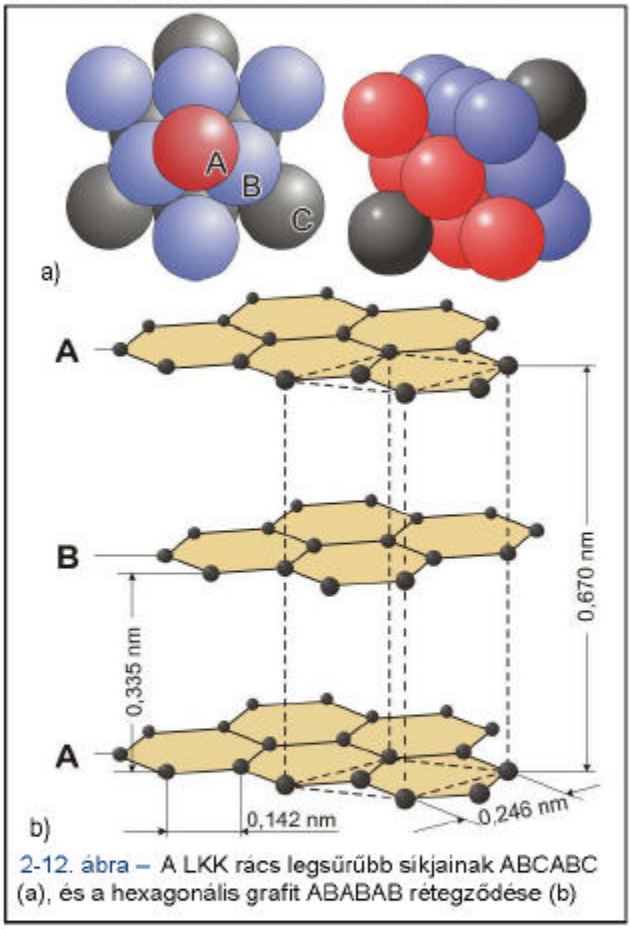
- Egyszerű kockarács (másként: primitív köbös); rövid jele: EK, amelyre az egyetlen példa a polónium (Po).
- Térközepes kockarács; rövid jele: TKK, pl. Li, K, Na, Mo, α-Fe, Nb, Ra, Ta, V, W stb.
- Lapközepes kockarács; rövid jele: LKK, pl. Ag, Al, Au, Ce, Cu, Ir, Ni, Pb, Pt, Rh, γ-Fe.
- Gyémántrács; rövid jele: DIA, pl. gyémánt, Si, Ge, α-Sn („szürkeón") 13°C alatti hőmérsékleten.



2-11. ábra – A kockarácsok három alaptipusának, valamint a gyémántrácsnak a golyómodellje

A térrácsban tehát a gömb alakúnak tekintett atomok olyan elrendeződést vesznek fel, amely számukra a legszorosabb illeszkedést biztosítja. Minden rácstípusban megtalálhatók azok az irányok, ill. síkok, amelyek mentén, ill. amelyeken az atomok érintkeznek a legközelebbi szomszédjaikkal. Ezek az ún. **legsűrűbb síkok** és a **legsűrűbb irányok** kitüntetett szerepet játszanak az anyagok képlékeny alakváltozásának folyamatában.

Az egyszerű kockarácsban a legsűrűbb irányok a kocka élei, a legsűrűbb síkok pedig a kocka lapjai. Ugyanilyen módon belátható, hogy a TKK rácsban a legsűrűbb irányok a kocka testátlói, az LKK rácsban pedig a kocka lapátlói. Ez utóbbi kristályrács 3 féle elrendezésű legsűrűbb síkjának A–B–C–A–B–C típusú rétegződését mutatja a 2-12.a ábra vázlata. A grafit egymáson könnyen elcsúszni képes legsűrűbb síkjainak A–B–A–B típusú rétegződése a 2-12.b ábrán látható.



2-12. ábra – A LKK rács legsűrűbb síkjainak ABCABC (a), és a hexagonális grafit ABABAB rétegződése (b)

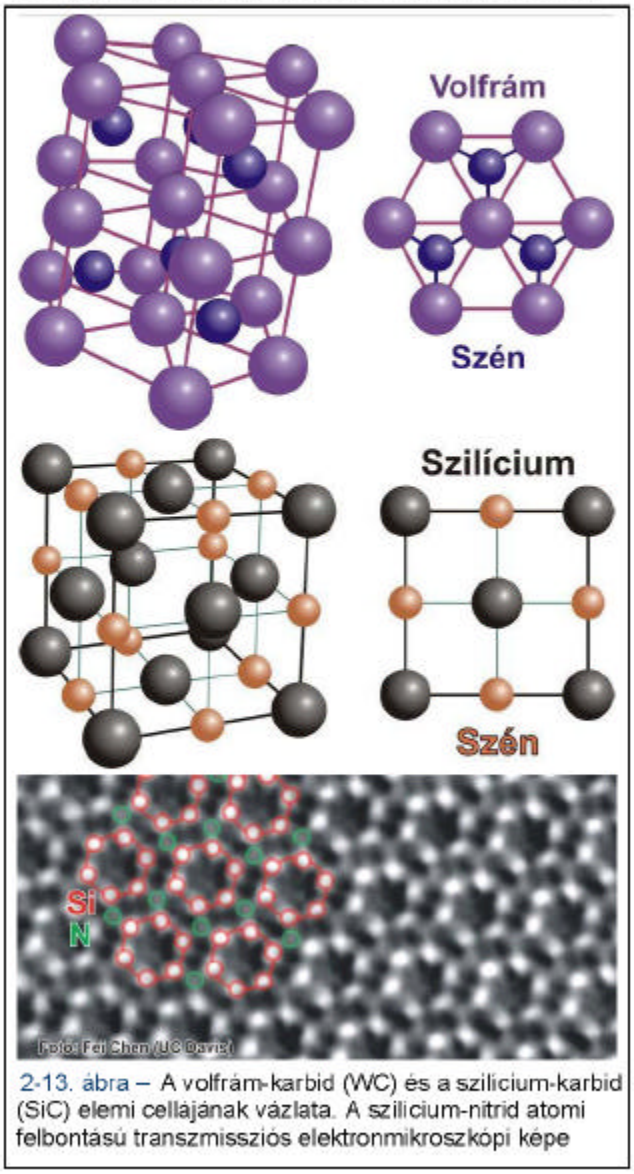
Fontos kristálytani jellegzetessége egy kristályrácsnak a térkitöltési tényező, amely az atomok által elfoglalt, az elemi cella belsejébe eső térfogat, valamint teljes elemicella-térfogat hányadosa: a térkitöltés a LKK-rácsban a legnagyobb, értéke 74%, a TKK-rácsban 68%.

Atomok rendeződésén, de nem az elemi cella ismétlődésén, alapuló anyagok a *kvázikristályok*.

2.5. A kerámiák szerkezete

A kerámiák nemfémes, szervetlen és kristályos szilárd testek. A kerámiák többsége – az ún. egyatomos kerámiák, a grafit és a gyémánt kivételével – két- vagy többféle anyag vegyülete. A térrácsba szerveződő atomok jellegzetes elemi cellákat alkotnak: a 2-13. ábrán látható a hexagonális rácsú volfrám-karbid (WC) és a kockarácsú szilícium-karbid (SiC) elemi cellája.

A kerámiáknak a szabad felületén és töretfelületén nem láthatók olyan látványosan jól szemcsehatárok és a krisztallitok, mint a fémes anyagoknál. Ennek az egyik oka az, hogy a kerámiákban a szemcseméret többnyire kisebb, mint a fémekben, a másik oka pedig az, hogy a kerámia alkatrészeket a legtöbb esetben finom kerámiaporokból állítják elő porsajtolással és szinterezéssel. Emiatt a kerámiák mikroszerkezetének lényeges részét képezik a mikropórusok vagy mikroüregek, amelyek aránya egy tökéletes szerkezetben 0%.

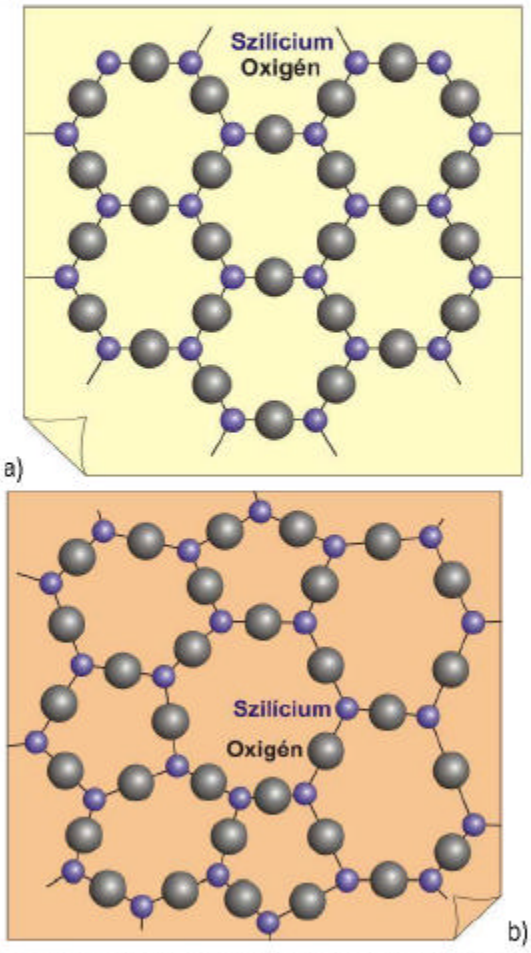


2-13. ábra – A volfrám-karbid (WC) és a szilicium-karbid (SiC) elemi cellájának vázlata. A szilicium-nitrid atomi felbontású transzmissziós elektronmikroszkópi képe

2.6. Az üvegek szerkezete

A rendezett kristályos szerkezet a szilárd anyagok számára a legkisebb szabadenergiájú állapot. A hőközlés és a megolvasztás jelentősen növeli a szabadenergiát, minek következtében az anyag távol kerül az egyensúlyi állapottól. Az atomok elrendeződése egy fémolvadékban nagyon hasonlít a 2-2. ábrán illusztrált állapotra. Az olvadékot lassan lehűtve a tiszta fémek és az ötvözetek kristályosodással szilárdulnak meg, ám ha a lehűtés sebessége rendkívül nagy, a többalkotós fémolvadékok némelyikében a megszilárdulás után is megmarad az amorf szerkezet: az atomok nem alkotnak szabályos kristályrácsot. Így keletkeznek a fémüvegek, amelyeket pl. különleges mágneses és termikus tulajdonságaik miatt használ az ipar.

A vegyületek esetében jóval könnyebben és gyakrabban szilárdul meg az olvadék amorf szerkezettel. A Föld egyik legelterjedtebb anyaga a SiO_2, amelynek nagyon sokféle szilárd fázisa létezik. Az egyik kristályos változatát a 2-14.a ábrán látható szabályos és egyforma Si–O gyűrűk építik fel, míg az amorf szerkezetben az atomok elrendeződése szabálytalan (2-14.b ábra).



2-14. ábra – A SiO_2 kristályos és amorf szerkezete

Ahogyan a vázlat mutatja, az amorf szilícium-dioxidban az atomok szabálytalanul, a kristályos kerámiára (a 2-14.a ábrán látható béta-tridimit kvarcra) jellemző, szabályos, hexagonális gyűrűk helyett öt-, hat- és hétszögű „gyűrűket" alkotva rendeződnek el. Ez az amorf szilícium-dioxid a fő alkotója csaknem minden, a szó hétköznapi értelmében vett üvegnek. A Na_2O nátrium-oxid hozzáadásával létrejövő nátronüveget az épületek ablaküvegeinek és az italosüvegeknek a gyártására használjuk. A B_2O_5 bór-oxid hozzáadásával készülő boroszilikát üveg (Pyrex) a hősokkálló edények alapanyaga.

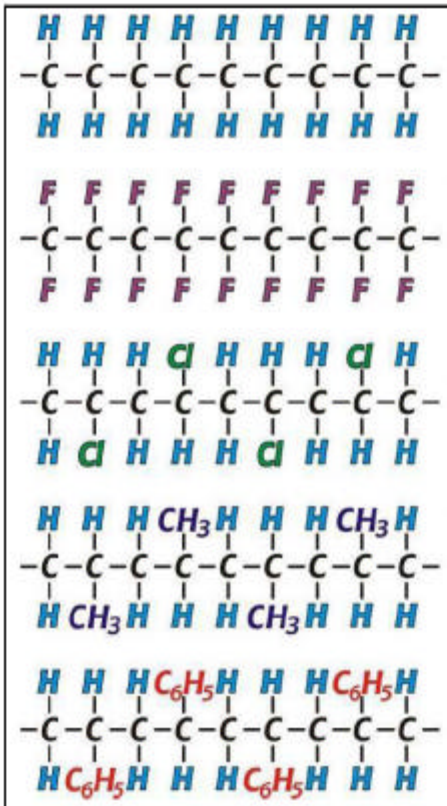
A „kerámia" kifejezés alatt gyakran értik mind a kristályos, mind az amorf szervetlen szilárd vegyületeket. Mind a kerámiák, mind az üvegek alapvető jellemzője a nagy mechanikai szilárdság és a hőállóság. Legtöbbjük kiváló villamos és hőszigetelő, ugyanakkor a kerámiák közül kerülnek ki a legjobb hővezetők is: a gyémánt és a grafit, amelyek atomos kerámiák.

2.7. A polimerek szerkezete

Jóllehet az egyetemi tananyagnak fontos részét képezik a polimer anyagok, azok gyártási és feldolgozási technológiái, ezeket a témaköröket ez a könyv nem tárgyalja, mivel mindezt kitűnően összegzik a BME Polimertechnika Tanszékén készült tankönyvek és jegyzetek. Ezért itt csak az anyagszerkezeti áttekintés szempontjából alapvető ismereteket foglaljuk össze.

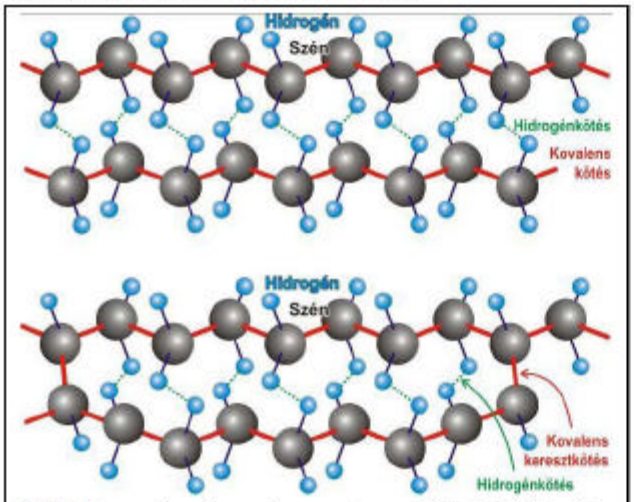
A szerves és a szervetlen polimer anyagok atomjainak elrendeződése jelentősen eltér az eddig tárgyalt fémek, kerámiák és üvegek atomelrendeződésétől. A szerves polimer anyagok vázát szénatomok hosszú láncai alkotják (a szervetlen polimer szilikonokban pedig szilícium). A szénlánc atomjaihoz oldalcsoportok (atom vagy atomcsoport) kapcsolódnak. A legegyszerűbb szerkezetű (2-15. ábra) polimer a polietilén: a molekulalánc végein a szénatomhoz 3 db H-atom kapcsolódik, a lánc belsejében pedig kettő. A polietilén a $CH_2{=}CH_2$ etilén molekuláinak polimerizációjával jön létre; ennek során az etilén szénatomjai közötti kettős kötés felszakad, és így több C-atom tud egymáshoz kapcsolódni. A 2-16. ábra a legismertebb polimerek láncszerkezetét mutatja.

2-15. ábra – A polietilén láncmolekulájának részlete



2-16. ábra – A leginkább elterjedt műanyagok polimer láncának jellemző molekulaszerkezete

A 2-16. ábra jól mutatja, hogy a mindennapi életben, a leggyakrabban használt műanyagokban a szénatomokhoz kapcsolódó oldalcsoportok részleges vagy teljes kicserélődése új polimer láncot és így új anyagot eredményez.

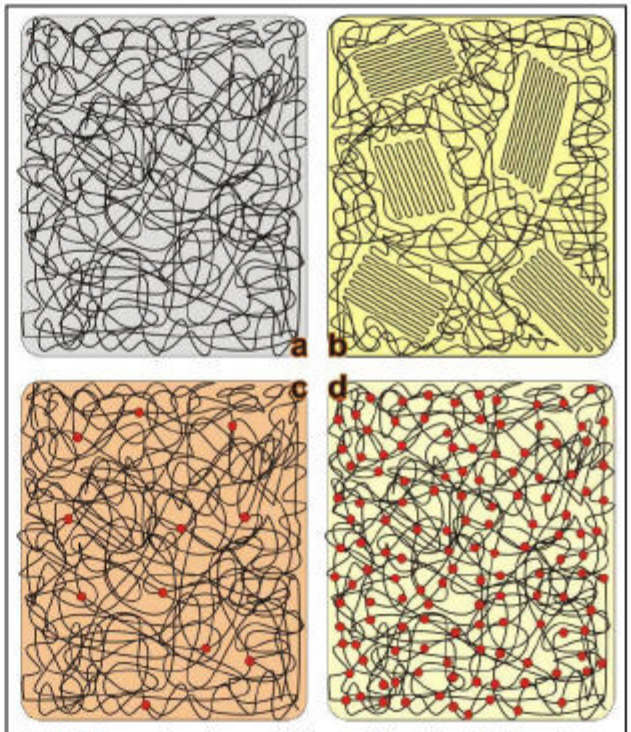


2-17. ábra – A polimer lánc szakaszai között kialakuló másodlagos (fent) és keresztkötések (lent)

A polimerek makromolekuláiban 10^4–10^6 darab láncelem, más néven monomer kapcsolódik össze erős, elsődleges, kovalens kötéssel. Az „összegubancolódó" molekulaláncok (2-17.a ábra) vonzzák egymást, az oldalcsoportok atomjai másodlagos kötésekkel kapcsolódnak egymáshoz, és így alkotnak amorf szerkezetű szilárd anyagot.

Hőközlésre a másodlagos kötések könnyen felbomlanak, ezért az ilyen szerkezetű anyagokat **hőre lágyuló** műanyagoknak nevezik. A teljesen rendezetlenül összegubancolódó láncmolekulák (2-18.a ábra) egyes szakaszai rendeződhetnek; ilyenkor a kristályos szerkezetnek megfelelő rend jön létre (2-18.b ábra) kis, 1–10 μm-es tartományokban, amelyeket krisztallitnak (szemcsének) nevezünk. A krisztallitokon szóródik a fény, ezért a legalább részben kristályos műanyagok – pl., a PE polietilén vagy a PA poliamid (nájlon) – már nem átlátszók, hanem csak többé-kevésbé fényáteresztők, míg a teljesen amorf műanyagok, pl. a polikarbonát (PC) vagy a plexi (PMMA, polimetil-metakrilát) átlátszók.

A polimerek szerkezetében igazán jelentős változás akkor következik be, amikor a polimer lánc szakaszai között a gyenge hidrogénkötést erős, kovalens, C–C kötések, ún. keresztkötések váltják fel (2-17.b ábra). Ilyenkor egy keresztkötéseket ritkán tartalmazó (2-18.c ábra) vagy azokkal sűrűn telített (2-18.d ábra) térháló jön létre. A kevés keresztkötéses, térhálós szerkezet jellemző az elasztomerekre (másként: gumik vagy gumiszerű polimerek). A keresztkötésekkel sűrűn telített, térhálós polimerek a hőre keményedő* műanyagok; ilyenek pl. az epoxi- vagy a fenolgyanták.



2-18. ábra – A polimerek láncmolekuláinak jellegzetes szerkezeti elrendeződése: amorf (a), részben kristályos (b), kevés keresztkötéses térhálós (c), sűrű térhálós (d)

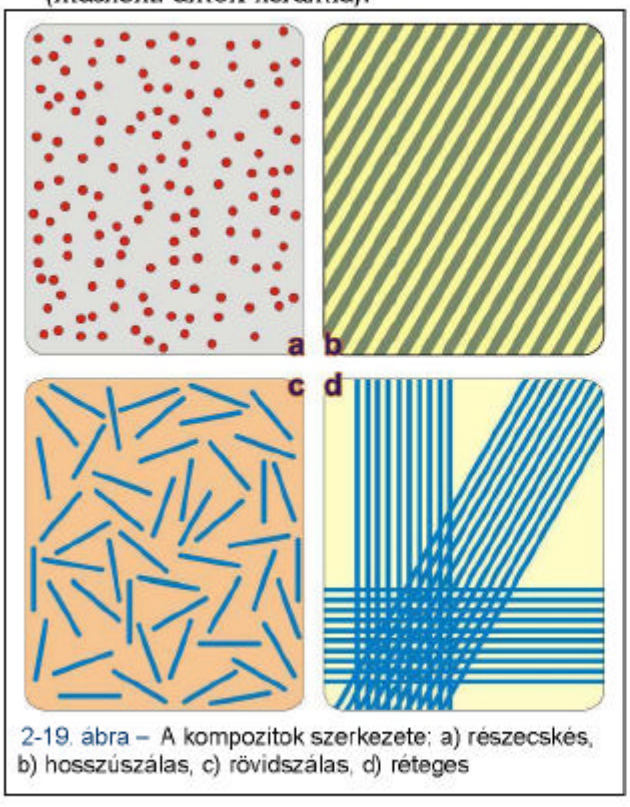
* A szakterület hazai művelői közül sokan a „hőre nem lágyuló" kifejezést tartják indokoltnak használni a keményedő helyett

2.8. A társított (hibrid) anyagok szerkezete

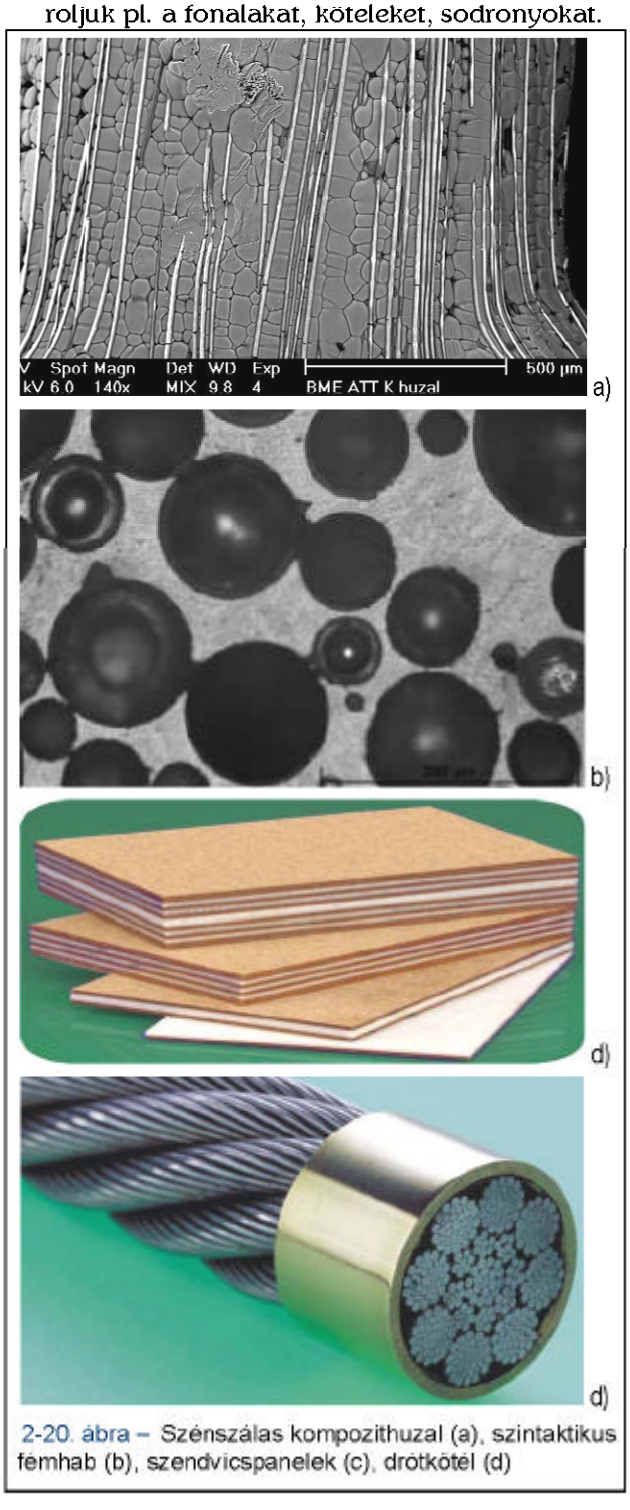
A mesterségesen vagy szintetikusan előállított ipari anyagok mindig több kémiai elem atomjainak keverékei, amelyek gyakran nem csak olvadék állapotban képesek egymást oldani (miként pl. a tea a cukrot), hanem megszilárdulás után is. A szilárd oldatok többsége fémes anyag, ötvözet, és a sűrűségük jól számítható a legegyszerűbbnek tekinthető, a mennyiségarányosságot kifejező keverési szabállyal (Vegard-szabály).

Amikor egymást nem oldó tetszőleges anyagoknak – az egyiknek legalább a mikroskálán, de akár a mezo- vagy a makroskálán mérhető – darabjait keverjük össze folyékony vagy/és szilárd anyagként, és gondoskodunk a stabil formájuk kialakításáról, *hibrid anyagokat* hozunk létre. A hibrid anyagok szerkezetét tekintve nem az atomelrendeződés vagy a nanoskálán vizsgálható molekulaszerkezet, hanem a mikro-, a mezo- és a makroskálán vizsgálható elrendeződés az igazán lényeges. A hibrid, társított anyagok (2-20. ábra) a következő csoportokba sorolhatók:

- Két, önmagában is szilárd anyag társításával jönnek létre az összetett anyagok; jól ismert elnevezésük: *kompozitok*. Az egyik összetevő folytonos mátrixot képez, amelyben részecskék, hosszú szálak, rövid szálak vagy rétegek formájában helyezkedik el az erősítőanyag (2-19. ábra). A mátrix és az erősítőanyag egyaránt lehet polimer, fém, kerámia vagy üveg (másként: amorf kerámia).
- Üregek keverhetők be vagy hozhatók létre a mátrix belsejében; az így létrejövő hibrid anyagok a *cellás anyagok* v. *habok* (2-20.b).
- A *réteges anyagokban* és a *szendvicspanelekben* a társított anyagok nagy, összefüggő felületek mentén érintkeznek és kapcsolódnak másodlagos (néha elsődleges) kötésekkel.
- A *kötegelt* vagy *rétegelt (szegmentális) anyagokban* a társított összetevők – elemi szálak, lemezek – között csak a tartós érintkezés biztosított, de nincs közöttük kémiai kötés. Ide soroljuk pl. a fonalakat, köteleket, sodronyokat.



2-19. ábra – A kompozitok szerkezete: a) részecskés, b) hosszúszálas, c) rövidszálas, d) réteges



2-20. ábra – Szénszálas kompozithuzal (a), szintaktikus fémhab (b), szendvicspanelek (c), drótkötél (d)

2.9. A kristályrácshibák áttekintése

A kristályrács definíciójából következik, hogy ha akár csak egyetlen rácspontra vagy atomra nem teljesül az egyértelmű feltétel, ott rácshiba alakul ki. Szigorúan véve nem is létezhet tökéletes kristály, hiszen annak végtelennek kellene lennie, viszont még a kivételesen nagy egykristályok – mint pl. a nagy ásványi kristályok vagy az egykristályként növesztett turbinalapátok – is legfeljebb néhány kg tömegűek.

Az összetettség szerint haladva a kristályhibákat az alábbi csoportokba sorolhatjuk:

- rácsrezgések (másként: fononok),
- pontszerű rácshibák,
- vonalszerű rácshibák és
- felületszerű rácshibák.

2.9.1. A ponthibák

Amikor a kristályrács egyetlen pontban nem tökéletes, az adott helyen ponthiba alakult ki. A ponthibák legjellemzőbb típusai (2-21. ábra):

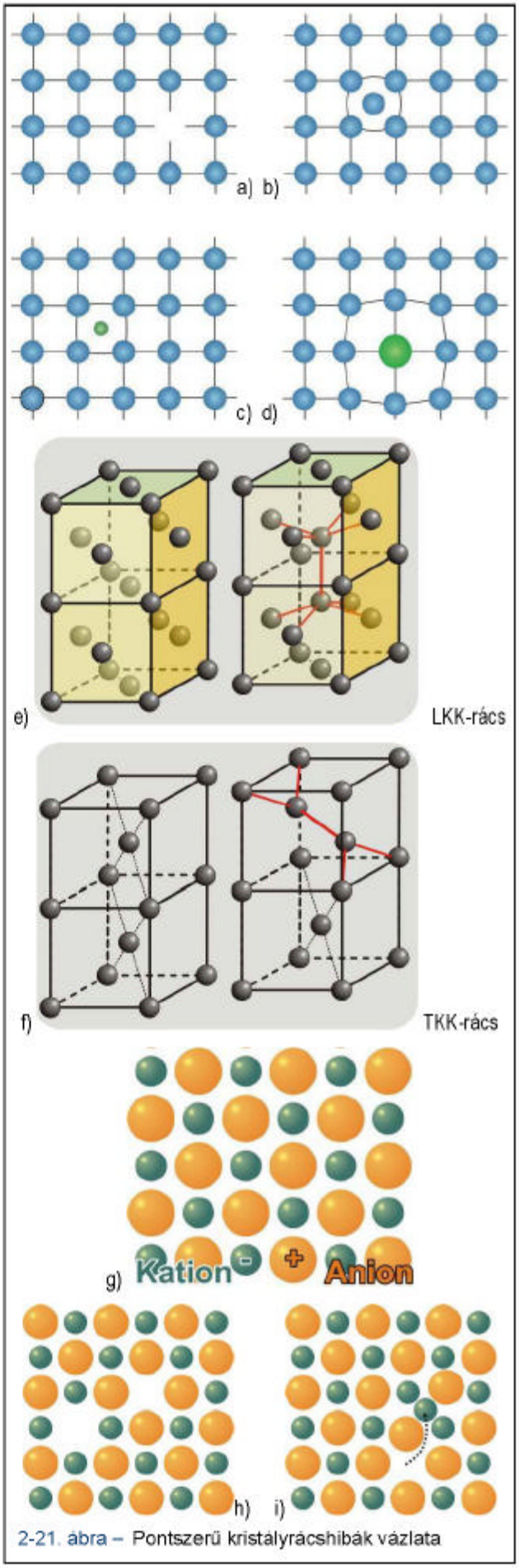
- üres rácshely v. vakancia (2-21.a),
- saját fajtájú intersztíciós atom (2-21.b),
- idegen fajtájú intersztíciós atom (2-21.c),
- szubsztitúciós atom (2-21.d),
- intersztíciós atompár (2-21.e–f).

Többalkotós ionrácsokban (2-21.g. ábra):

- Schottky-féle hiba: ionpárhiány (2-21.h),
- Frenkel-féle hiba (2-21.i),
- csoportosan kialakuló hibák, ún. „klaszterek” képződhetnek vakanciákból és saját fajtájú intersztíciósokból.

A ponthibák keletkezésére nézve többféle elméletet megfogalmaztak, de ezek ismertetése nélkül csak arra utalunk, hogy a ponthibákat a legjelentősebb mennyiségben a neutronokkal való besugárzás, valamint a hőmérséklet erőteljes növelése termeli. A hőmérséklet növekedésével nem csak a ponthibák sűrűsége növekszik, de a mozgékonyságuk is. Mind a vakanciák, mind pedig az intersztíciós atomok képesek a kristályrácsban vagy a szemcsehatárokon való mozgásra: ezt a jelenséget nevezzük *diffúziónak*.

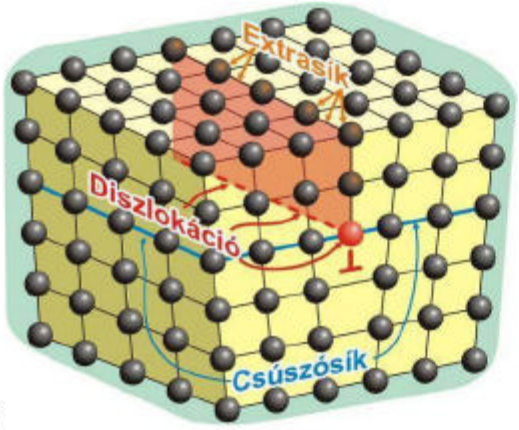
Amikor a fém vagy más szilárd fázisú anyag többféle atomot tartalmaz (többkomponensű), ill. több szilárd fázis van benne egyidejűleg jelen (többfázisú), a diffúzió révén számottevően módosulhat az egyes fázisok kémiai összetétele, ha egyes alkotóelemek gyorsabban, mások pedig lassabban tudnak diffundálni. A diffúzió fontos szerepet tölt be az ötvözetek tulajdonságainak kialakulásában, valamint a hőmérséklettel gyorsuló, ún. termikusan aktivált folyamatokban.



2-21. ábra – Pontszerű kristályrácshibák vázlata

2.9.2. A vonalszerű rácshibák, a diszlokációk

Diszlokációnak a hosszú vonal mentén elhelyezkedő atomok sorát nevezzük, ha az atomok a kristályrács szabályos rendjétől eltérően nem a rácspontokban találhatók. Amint a 2-22. ábra szemlélteti, a diszlokáció vonalát alkotó atomok egy extra(fél)sík végén sorakoznak. Az extrafélsík a kristályrács rendes síkjai közé beékelődő félsík, amelynek az ábrán is jelölt csúszósíkkal alkotott metszésvonala a diszlokáció.



a)

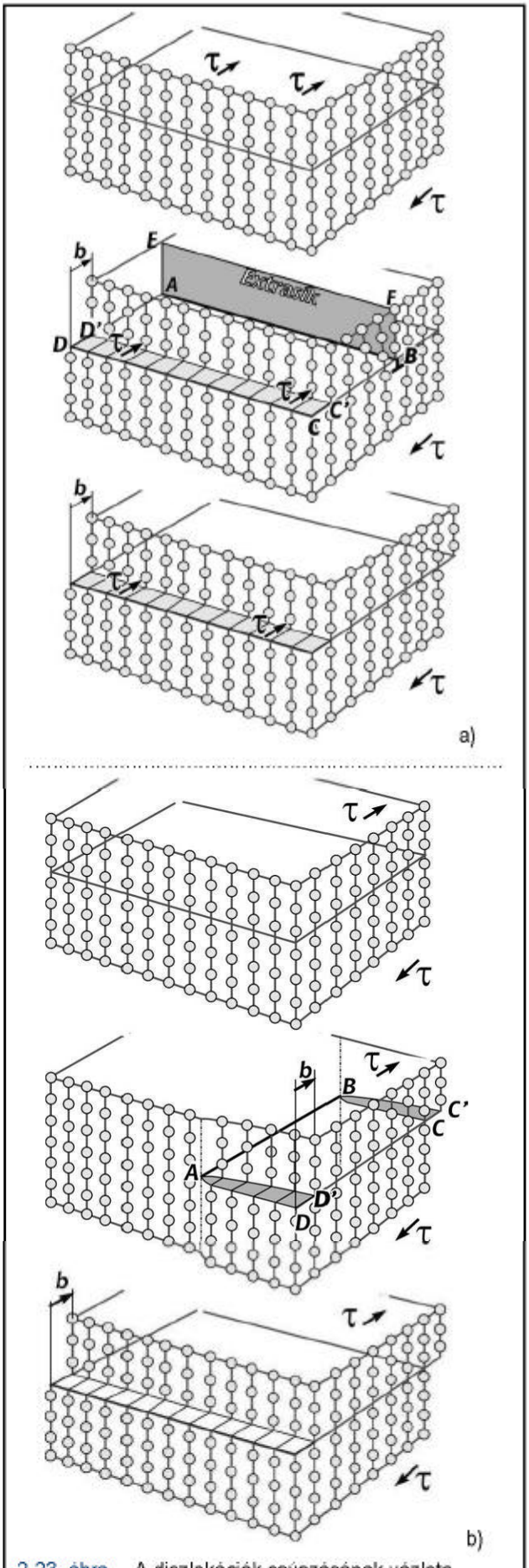
2-22. ábra – Éldiszlokáció környezetének vázlata

A diszlokáció tehát a csúszósíkban fekszik, amely onnan kapta a nevét, hogy a diszlokáció vonalát alkotó atomok ebben a síkban elmozdulásra képesek, az elmozdulás pedig jellegét tekintve csúszás. A csúszást a csúszósíkban ható τ csúsztatófeszültség kényszeríti ki. A csúszás iránya merőleges a diszlokáció vonalára. A csúszás következtében a krisztallit maradó (képlékeny) alakváltozást szenved; ennek mértéke egy diszlokáció csúszása hatására a ***b***-vel jelölt rácsparaméter nagyságú (< 1 nm). A csúsztatófeszültség mozgásba hozza a már létező diszlokációkat, és biztosítja új diszlokációk termelődését is.

Attól függően, hogy a diszlokáció vonala milyen helyzetű az őt létrehozó vagy mozgató nyírófeszültség irányához képest, a diszlokációk háromféle alaptípusát különböztethetjük meg:

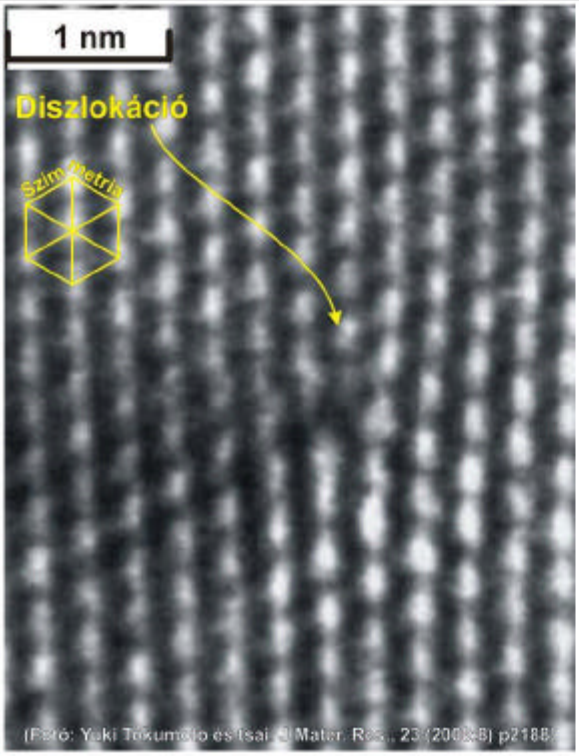
- Éldiszlokáció: a diszlokáció vonala merőleges a csúsztatófeszültség irányára (2-23.a ábra).
- Csavardiszlokáció: vonala párhuzamos a csúsztatófeszültség irányával (2-23.b ábra).
- Vegyes diszlokáció: vonala görbe (pl. hurok), pontjaiban a kétféle jelleg együtt van jelen.

A diszlokációk körül a rács torzul, feszültségek ébrednek benne: az éldiszlokáció csúszósíkja felett a kristályrácsot nyomófeszültség, alatta pedig húzófeszültség terheli. A csavardiszlokáció vonala mentén a kristályrácsra csak nyomófeszültség hat.



2-23. ábra – A diszlokációk csúszásának vázlata

Az anyagok szerkezetének vizsgálatára már olyan nagyfeloldású (felbontóképességű) eszközök állnak rendelkezésre, hogy azokkal jól meg lehet jeleníteni az atomok valós elrendeződését. A 2-24. ábra egy éldiszlokáció környezetét mutatja alumínium-nitridben.



2-24. ábra – Éldiszlokáció nagyfeloldású transzmissziós elektronmikroszkópi képe; a világos foltok az atomok

A ponthibák kapcsán láttuk, hogy azok a diffúzió révén mozgásra képesek. A diszlokációk esetében még nagyobb jelentőségű a mozgásra való képesség. A jelen témakörben azonban csak a legfontosabb mozgásformát említettük meg: a csúszást. A diszlokációcsúszás tehát a kristályrács elemi képlékeny alakváltozását eredményezi, és a sok(millió) diszlokáció elcsúszásának eredője a makroszkopikusan is jelentkező képlékeny alakváltozás. Ha viszont a diszlokációkra ható csúsztatófeszültségnek a csúszósíkba eső komponense nem ér el egy kritikus értéket, akkor a kristályrács csak rugalmasan torzul, és a terhelés megszűnése után a kristályrács visszanyeri eredeti alakját. A diszlokáció csúszásának elemi lépéseit a 2-23. ábra szemlélteti.

A diszlokáció csúszásának érzékeltetésére példaként szokták említeni a hosszú szőnyeg elmozdítását, illetve a giliszta vagy a hernyó tovahaladásának mechanizmusát (2-25. ábra). Valóban, ezek a példák és az éldiszlokáció csúszása is olyan mozgásmechanizmust jelentenek, amelynél egyszerre nem az egész anyagmennyiség, hanem annak csak egy egészen kis része van mozgásban.

2-25. ábra – Az éldiszlokáció mozgásának analógiái

Vegyük azonban észre, hogy kristályrácsban sem egy bizonyos atomsor és a szőnyegben sem egy bizonyos anyagdarabka mozog! A szőnyegnél és a hernyónál a kidudorodás mint *állapot* halad tovább. A kristályrácsban a diszlokáció csúszása azt jelenti, hogy a rendes rácssíkok közé való beékelődöttség mint állapot tolódik át újabb és újabb atomsorokra, miközben a rács atomjainak döntő többsége meg sem mozdul. A diszlokációk létezése és elcsúszásuk mechanizmusának tisztázása alapján sikerült pontosan leírni a kristályos anyagok makroszkopikus képlékeny alakváltozását; ez az elmélet 50 évvel ezelőtt Magyarországon még gyakorlatilag ismeretlen volt.

A diszlokációelmélet alapjainak lerakása *Sir G. I. Taylor* nevéhez fűződik, és a kidolgozásában igen jelentős szerepet játszott az USA-ban dolgozó magyar *Orowán Egon* (1901–1989) is.

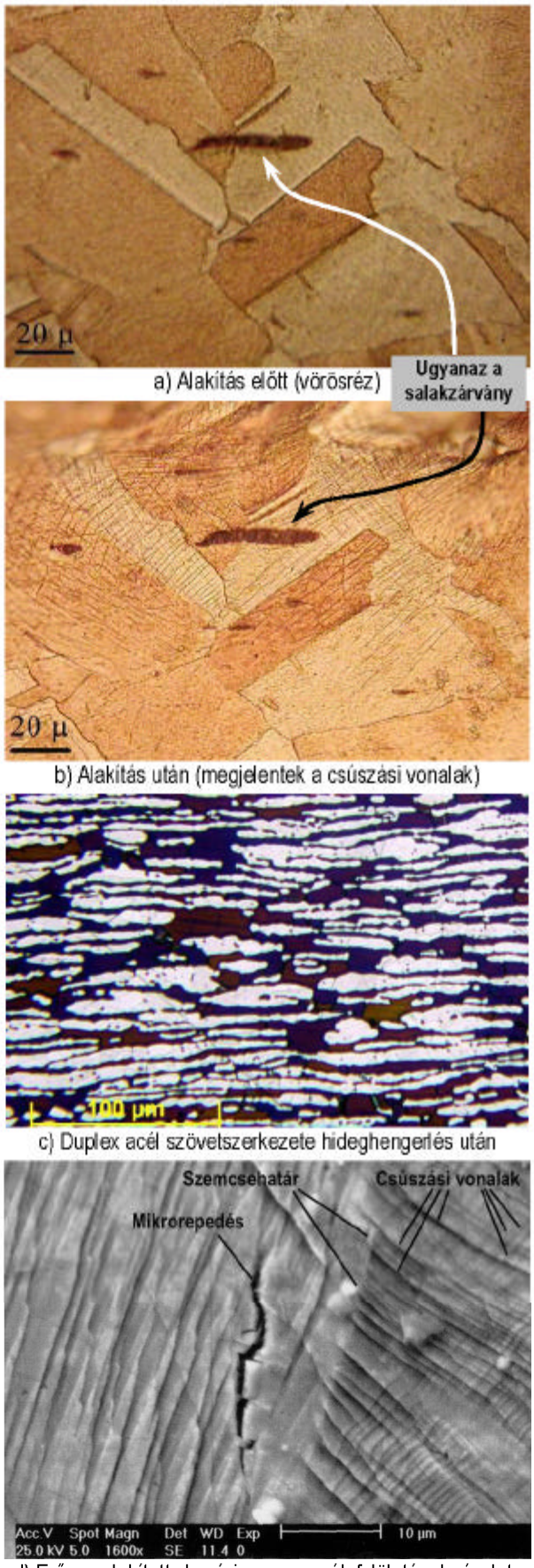
A gyakorlatban használt polikristályos anyagok elképesztően nagy számban tartalmaznak diszlokációkat. Röntgendiffrakciós mérésekkel meg lehet határozni a diszlokációsűrűséget, ami vagy az egységnyi térfogatra jutó diszlokációk összes hosszúságát, vagy pedig az egységnyi keresztmetszetet döfő diszlokációk számát jelenti (az utóbbi az elterjedtebb). Álljon itt néhány példa a diszlokációsűrűség értékére:

- kristályos félvezetők 10^1–10^3 cm^{-2}
- kerámiák 10^4–10^6 cm^{-2}
- nagytisztaságú fémek 10^5 cm^{-2}
- alakítatlan fémek 10^7–10^8 cm^{-2}
- hidegalakított fémek 10^9–10^{13} cm^{-2}.

A fenti adatokból kitűnik, hogy a hidegalakított – vagyis az olvadáspont (K) felénél kisebb hőmérsékleten képlékenyen alakított – fémekben a diszlokációsűrűség több nagyságrenddel megnő. Azt, hogy a képlékenyalakítás (pl. hengerlés, hajlítás stb.) hatására a szemcsék alakja megváltozik, a szövetszerkezet fénymikroszkópos vizsgálatakor is észlelni lehet. Ezt szemlélteti a 2-26.a és b ábra: a képek egy polírozott és maratott oldalfelületű (ez a felület látható a képen), vörösrézből készült alkatrész felső felületére nyomterhelést gyakorló megmunkálás előtt és az után készültek. A terhelés okozta alakváltozás egy vékony sávban minden szemcsét érintett, bár koránt sem biztos, hogy azonos mértékben. A szemcsék képlékeny alakváltozását jelzi az alakjuk megváltozásán kívül az ún. csúszási vonalaknak a megjelenése is.

A szemcsék alakja igen jelentős mértékben képes deformálódni, különösen a lemezek hengerlésekor vagy a huzalok húzásakor; ilyenkor a szemcsék megnyúlnak a hengerlés irányába, amint ezt a 2-26.c ábra szemlélteti. Magukban a szemcsékben az alakváltozás csak megszabott irányokban mehet végbe. Az alakváltozó képességet meghaladó terhelés mikrorepedéseket hoz létre (2-26.d ábra), s végső soron törésre vezet.

Mivel a makroszkopikus képlékeny alakváltozás sok esetben több tíz százalék is lehet, a lágyított anyagok első ránézésre igen nagy (10^7 cm^{-2}) diszlokációsűrűsége sem elegendő ennek teljesítéséhez. Ezt a „diszlokációhiányt” az anyag oly módon oldja meg, hogy az alakváltozás közben, az azt létrehozó feszültség hatására diszlokációk termelődnek a krisztallitokban, az ún. Frank–Read-források aktiválódása eredményeként.*



a) Alakítás előtt (vörösréz)

b) Alakítás után (megjelentek a csúszási vonalak)

c) Duplex acél szövetszerkezete hideghengerlés után

d) Erősen alakított alumíniumszemcsék felületének részlete

2-26. ábra – A képlékenyalakítás hatása a szemcsék alakjára és felületére

* *A Frank–Read-források működését, és a kristályrácshibák egészét részletesen tárgyalja:* Prohászka János, *A fémek és ötvözetek mechanikai tulajdonságai, Műegyetemi Kiadó 2001.*

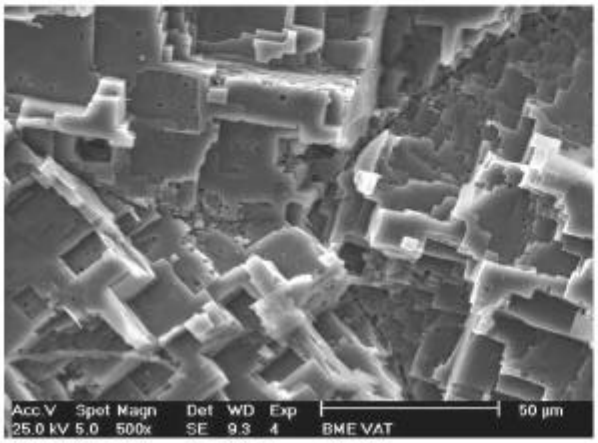
2.9.3. A felületszerű kristályrácshibák

Amennyiben a kristályrács hibákat tartalmazó részének kiterjedése kétdimenziós, síkhibáról, általánosabb esetben felületszerű vagy kétméretű hibáról beszélünk. A felületszerű hibák fő típusai a következők:

- szabad felület,
- fázishatár,
- szemcsehatár és szubszemcsehatár,
- ikerhatár,
- rétegződési hiba.

A szilárd testeket az őket körbevevő fázistól (amely többnyire gáz vagy folyadék) a *szabad felület* választja el, amely csak ritkán sima, de a nanoskálán és a mikroskálán még ilyenkor is lépcsőket, árkokat, csúcsokat stb. tartalmaz (lásd a 2-27. ábrát). A szabad felület tulajdonságait általában a felületi érdességgel szoktuk jellemezni.

Minden felületet – mivel rajta a termodinamikai egyensúlytól nagyon távoli energiaviszonyok uralkodnak – egy felületi energia jellemez, amely függ egyebek mellett a kristályorientációtól is: a legkisebb energia az atomokkal legsűrűbben pakolt síkokat jellemzi, mivel e síkok atomjai vannak a legkevésbé távol egymástól. A szabad felület fontos szerepet játszik számos folyamatban, mint pl. a súrlódás, a katalízis, a hegesztés, az oxidáció vagy a vékonyrétegek növesztése.

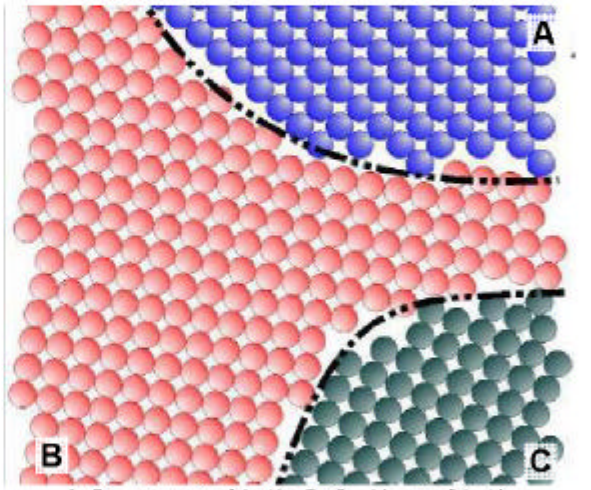


2-27. ábra – Alumíniumlemez sósavval maratott szabad felülete. A pásztázó elektronmikroszkópi kép három szemcse találkozásának helyét mutatja

A *fázishatárokat* a 2.3. szakaszban már bemutattuk. A *szemcsehatárokról* is már elmondtuk, hogy elválasztják a kristályrácsba szerveződött anyag különböző orientációjú térfogatelemeit; a 2-27. ábra jól szemlélteti ezt is. A szemcsehatárok között kialakulásuk és az elválasztott tartományok orientációjának különbsége alapján megkülönböztetjük a következő típusokat:

- Kisszögű határ: az orientációkülönbség < 10°. Gyakran szubszemcsehatárnak nevezik a kisszögű határokat, az általuk elválasztott tartományokat pedig szubszemcséknek.
- Nagyszögű határ: a szomszédos szemcsék közötti orientációkülönbség > 10° (2-28. ábra).

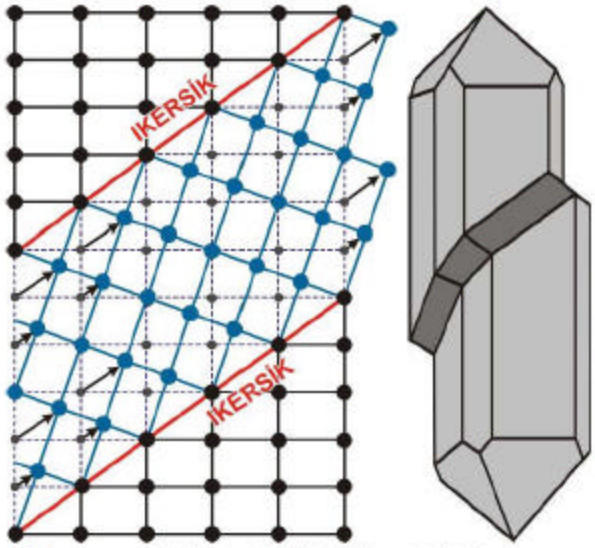
A szemcsehatárokhoz jelentős szabadenergia-többlet társul, ami azt jelenti, hogy pl. hevítés hatására képesek elmozdulni. E szemcsedurvulásnak nevezett folyamatnak az eredménye a szemcsehatár-összfelület csökkenése. A kristályrácsba beékelődő idegen atomok, pl. a szennyezők előszeretettel dúsulnak a szemcsehatárokon, mivel általában itt gyorsabb a diffúzió. A korrózió is fokozottan érinti a szemcsehatárokat. A terhelés (csúsztatófeszültség) hatására mozgásba lendülő éldiszlokációk fennakadnak a szemcsehatárokon, míg a csavardiszlokációk képesek áthaladni rajtuk. Mindezek azért lényegesek, mert a szemcsehatárok kitüntetett szerepet játszanak a kristályos anyagok számos tulajdonságának alakulásában.



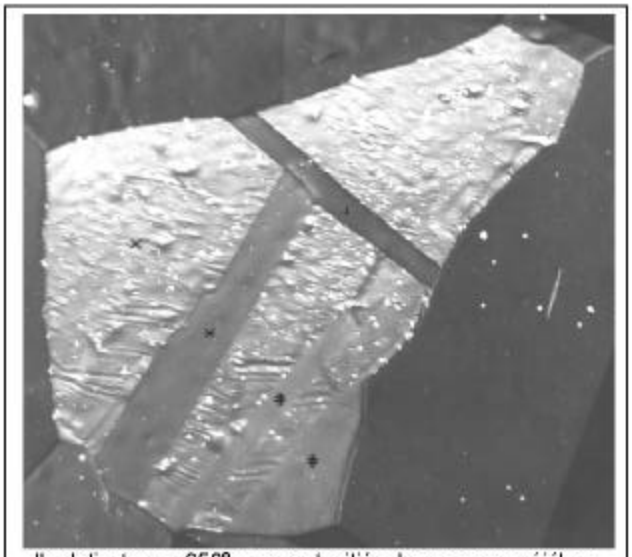
A–B = nagyszögű határ; B–C = kisszögű határ

2-28. ábra – Szemcsehatárok vázlata

Az *ikerhatárok* az ikresedés következtében alakulnak ki. Ez a mechanizmus egy további lehetőség (a csúszáson kívül) a kristályos anyagokban a képlékeny alakváltozásra. Az ikresedés az atomok olyan, koordinált (tehát egyszerre és szabályos módon lezajló) átrendeződése a kristálynak egy szűk tartományában, aminek eredményeként az elmozdult atomok új helyzete tükörszimmetrikus lesz az eredetivel. A szimmetria az ún. ikerhatárra vagy ikersíkra vetítve áll fenn (2-29. ábra). Az ikerhatár határolja az ikresedés tartományát. A szemcsék felületén vagy síkmetszetein az ikerhatárok leggyakrabban két párhuzamos vonalként észlelhetők, amelyek szemcsehatártól szemcsevagy ikerhatárig húzódnak; erre mutat szép példákat a 2-30. ábra.



2-29. ábra – Az ikresedés síkbeli és térbeli vázlata



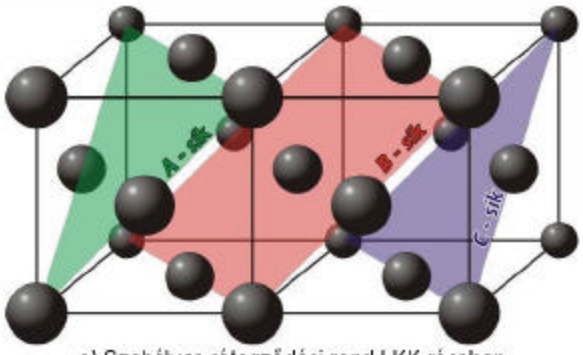
Ikrek tiszta vas 950°-os ausztenitjének egy szemcséjében (fotó: *Verő Balázs*, 1980.)

Ikrek vörösréz maratott felületén

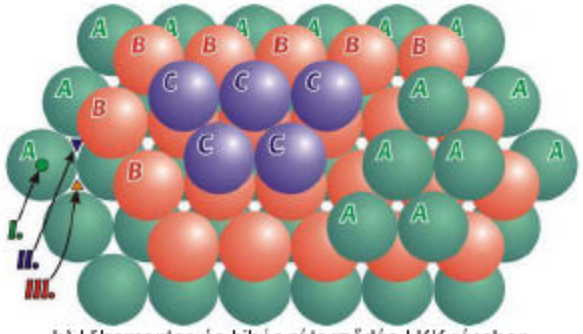
2-30. ábra – Ikrek és ikerhatárok szövetképe

Az ikerképződéssel végbemenő képlékeny alakváltozás az alapja az alakemlékező ötvözetek „működésének", pl. az egyutas és a kétutas alakemlékezésnek és a szuperrugalmasságnak.

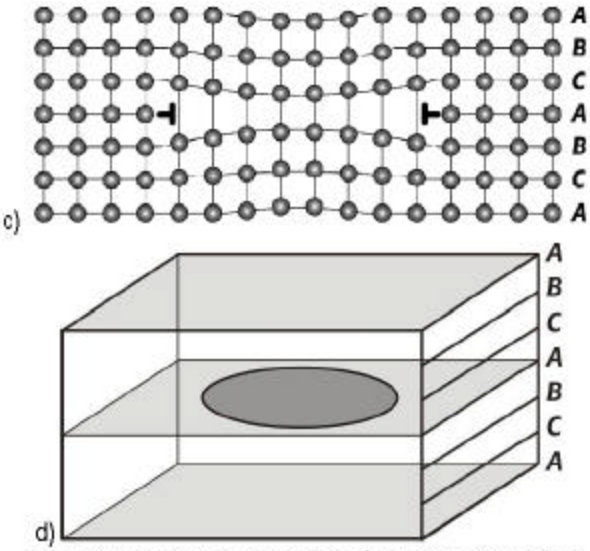
A *rétegződési hibák* az atomokkal legsűrűbben rakott kristálysíkok szabályos rétegződési sorrendjének (2-31.a ábra) a helyi zavara esetén jönnek létre. Az LKK rács legsűrűbb síkjainak az egymásra rétegződését szemlélteti felülnézetből a 2-31.b ábra. A legsűrűbb síkokon lévő – egymást az elemi cella kockalapátlói mentén érintő – atomok a háromféle (I–III.) helyzetbe kerülhetnek, és ennek megfelelően a szabályos rétegződési sorrend az A–B–C rétegződésnek a folyamatos ismétlődését jelenti. Ez a szabályosság jellemzően 10–1000 nm kiterjedésű síkfelületeken változik meg úgy, hogy pl. valamelyik réteg kimarad a másik kettő közül, pl. a 2-31.c–d ábra vázolta módon.



a) Szabályos rétegződési rend LKK rácsban



b) Hibamentes és hibás rétegződés LKK rácsban



c) és d) Vakanciahurok mint rétegződési hiba kialakulása

2-31. ábra – A rétegződési hiba és képződése vázlata

Felületszerű hibák lévén, a rétegződési hibák (másként síkhibák) növelik a kristályrács szabadenergiáját, ezzel közrejátszanak a nagy hőmérsékleten végbemenő, valamint az ismétlődő terhelés miatt bekövetkező károsodási folyamatokban; ezeket a 3.5. szakasz ismerteti röviden.

2.10. A nanoszerkezetű anyagok

A technológiai fejlődés az utóbbi évtizedben számos kifejezést tett szinte máról holnapra a műszaki, sőt a hétköznapi nyelv mindennapos használatú elemévé, pl. a nanotechnológia kifejezést. Annak ellenére, hogy a „nano" betűkombináció a magyar nyelvben önálló szóként nem is élő idegen prefixum, használatát tekintve óriási térfoglalásának vagyunk szemtanúi.

A „nano" előtag a korábbi évtizedekben megszokott méretskáláktól – makro, mezo, mikro – a nanoskálára való átállásra utal, vagyishogy az anyag szerkezetének vizsgálata és tudatos megszervezése a nanométeres dimenziókban történik. Amiként jól ismert kifejezések pl. a makro- és a mikrogazdaságtan, a mezoterápia, mezoszféra vagy a mikroelektronika, úgy a nanoskálát előtérbe helyező tudományterületen és a ráépülő, ma már erőteljesen kibontakozott iparágakban a „nano" előtag a nanométeres dimenziókra irányultságot fémjelzi; ez a nanoszerkezetű anyagok világa és a nanotechnológia.

A „nanoszerkezet" kifejezést a szabványosítás (Nemzetközi Szabadalmi Osztályozás) ekképpen értelmezi: a nanoszerkezet az anyag pontos, különleges alakzatban való atomos elrendezése, amely magában foglal legalább egy alkotóelemet; ez az alkotóelem az atomok és molekulák módfelett korlátozott csoportjából áll, amely mennyiség optikai mikroszkóppal nem ismerhető fel, és amelyeket atomjaiknak vagy molekuláiknak mint különálló egységeknek az egyedi manipulálásával formáltak.

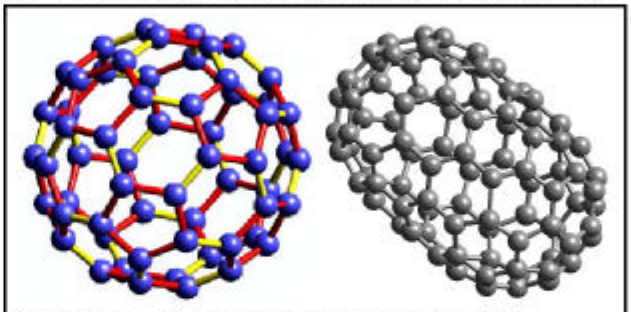
A nanoszerkezetű anyagok (másként nanoanyagok) említésekor olyan anyagokra kell gondolni, amelyekben a gyártáskor kialakuló szemcseméret az 1–100 nm mérettartományba esik. Ide sorolják azokat az anyagokat is, amelyeknél ez a feltétel legalább a tér egyik irányában mérve teljesül. Mindez akkor igazán figyelemkeltő, ha meggondoljuk, hogy a hagyományos kristályos anyagok átlagos szemcseméretе a 10–100 μm tartományba esik (1 μm = 1000 nm), továbbá azt, hogy az atomok átlagos mérete 1–2 angström (1 nm = 10 Å). A nanoszerkezetű anyagok egységeiben tehát alig néhány tucat atom szerveződik.

A nanoszerkezetű anyagokat kezdetben különleges mechanikai tulajdonságaik emelték a figyelem középpontjába, de ma már az élelmiszeripartól az informatikai és kommunikációs technológiákon át a kozmetikai iparig szinte mindenütt jelen vannak. Főbb csoportjaik (2-32. ábra):

- fullerén,
- nanocsövek,
- fémnanorészecskék,
- kerámiananoporok,
- nanoszálak,
- nanolemezek,
- nanofilmek, nanorétegek,
- nanokristályok,
- nanokompozitok,
- csomósodásgátló élelmiszeradalékok,
- nanopigmentek.

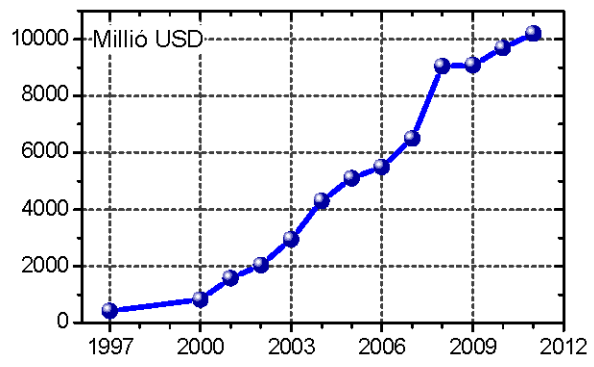
A nanoszerkezetű anyagok ma már a mindennapi élet számos területén jelen vannak. Közvetlen részesei vagyunk az adattárolás eszközei terén zajló elképesztő fejlődésnek: az alig 10 éve megjelent memóriakulcsok (pendrájvok) között sokáig a 256 Mb-os volt a legnagyobb, és az ára háromszorosa volt (38 eFt) egy manapság 12–13 eFt-ért kapható 32 Gb-osének. Mindezt a néhány nanométeres szilícium nanokristályokat tartalmazó vékonyrétegek kifejlesztése tette lehetővé.

A nanoszerkezetű anyagok jelképének egyértelműen a fullerén számít. Ennek a 60 db, különleges – de a régi focilabdákról jól ismert – formába szerveződött szénatomból álló molekulának a felfedezését a később Nobel-díjas *H. Kroto*, *J. Heath*, *S. O'Brien*, *R. Curl* és *R. Smalley* publikálta 1985-ben, a Nature c. folyóiratban. A fullerén a nevét *Richard Buckminster Fuller* (1895–1983), amerikai építész tiszteletére kapta.



2-32. ábra – Nanokristályos anyagok modellje: a C60 fullerén (balra) és egy szénnanocső (a C96)

A harmadik évezredbe lépve, világszerte óriási lendületet kapott a nanoszerkezetű anyagok kutatása, szélesebb értelemben a nanotechnológia. Jól példázza ezt a 2-33. ábra, amely a világ összes, államilag finanszírozott nanotechnológiai kutatási költségvetésének növekedését mutatja.



2-33. ábra – A nanotechnológia állami ráfordításainak trendje a világon (Global funding of nanotechnologies & its impact. Cientifica Ltd. London, July 2011)

A 2-33. ábrához hozzá kell tenni, hogy rendkívüli a forráskoncentráció a nanotechnológia területén, de ebben csak néhány ipari hatalom vesz részt. A magánszférát is figyelembe véve, 2011-ben Oroszország (2600 M$), USA (2300), Kína (2200), Dél-Korea (1950) vezették a sort. A többi, kb. 10 nanotechnológiai hatalom messze az 1000 M$-os határ alatt költ. Oroszország a 2006. évi szinte nulláról 2008-ra 3000 M$-ra növelte a nanotechnológiai forrásait.

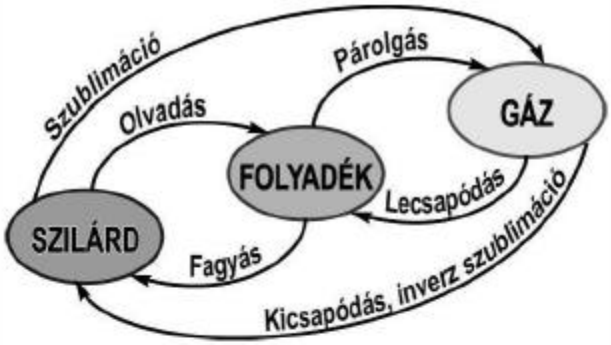
Magyarországon az akadémiai, egyetemi és a magánszféra együttes nanotechnológiai ráfordításainak becsült összege 2011-ben kb. 10 M$.

2.11. A fázisátalakulások

A fémes anyagok tulajdonságainak megismerése, és a tulajdonságokat nagymértékben meghatározó gyártási és feldolgozási folyamatoknak – technológia – a megértése érdekében kiemelkedő jelentőséggel bír a fázisátalakulások ismerete. A fázis fogalmát már definiáltuk az 1.3.5. szakaszban; a definíció alapján leszögezhetjük, hogy amennyiben a tömegére nézve állandónak tekintett anyag pillanatnyi fázisviszonyaiban valamilyen – akár mennyiségi, akár minőségi – változás következik be, az csak fázisátalakulás révén következhet be. A fázisátalakulás(ok) eredménye tehát jelentheti a fázisok számának és mennyiségének a változását, illetve akár a kettőt egyszerre.

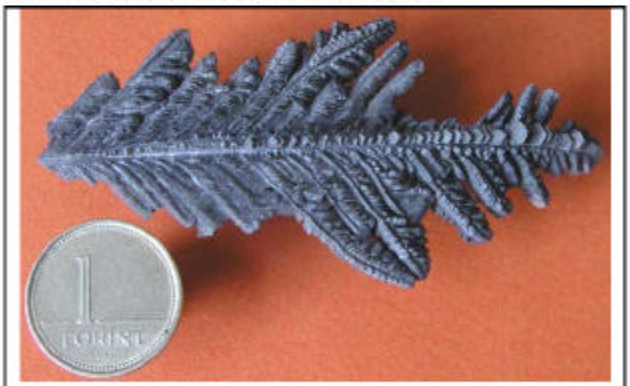
A fázisok egyensúlyával kapcsolatos folyamatokat egy komoly tudományág, a termodinamika értelmezi. E könyvben ennek csak egyetlen és leegyszerűsített törvényére, a Gibbs-féle fázisszabályra hivatkozunk: egy termodinamikai rendszert alkotó komponensek (K), az azokból létrehozható fázisok (F) és a szabadon változható állapothatározók (SZ = „szabadsági fok", jellemzően a hőmérséklet és a koncentráció) száma között az alábbi összefüggés áll fenn: F + SZ = K + 1.

A fázisátalakulások egyszerű esetben a halmazállapot-változásokat jelentik, megnevezésük a 2-34. ábrán látható. A szublimáció jelenségéről akkor beszélünk, amikor a szilárd fázisú anyag közvetlenül elpárolog. Ily módon is fogynak a gleccserek, és az élelmiszerek kiszárításának egyik módszere, a liofilizálás is a szublimáció jelenségén alapul. A szublimáció inverze az alapja a korszerű bevonatolási és vékonyréteg-technológiáknak (PVD és CVD*), amelyek arra szolgálnak, hogy a gőz fázisból a céltárgy felületére jussanak az előzőleg elporlasztott anyag atomjai.



2-34. ábra – A halmazállapot-változások rendszere. A gázokból elektronleadásos ionizációval képződik a plazma, amelyet egy további halmazállapotnak tekintünk

A fémes anyagok esetében a fagyás kifejezés helyett a dermedés, megszilárdulás, a kristályos szerkezetek létrejöttekor a kristályosodás, kifejezéseket illik használni. A fémolvadékok kristályosodásának számos típusa ismert, amelyek közül – átfogó rendszerezés és termodinamikai leírás nélkül – megemlítjük a cellás és a dendrites kristályosodást, amely utóbbi a 2-35. ábrán látható, jellegzetes szerkezetet eredményez.



2-35. ábra – Magnézium dendrites kristálya. A dendrit törzséből „nőnek ki" a másodlagos dendritágak

* CVD = Chemical Vapor Deposition, azaz kémiai gőzfázisú leválasztás, PVD = Physical Vapor Deposition, azaz fizikai gőzfázisú leválasztás (gyakran vákuumporlasztásként, vákuumgőzölésként is emlegetik)

Az allotrop átalakulás

Egy szilárd anyagnak azt a tulajdonságát, hogy atomjai többféle szilárd – kristályos vagy amorf – fázist is képesek alkotni, polimorfizmusnak (többfajtájúságnak) nevezik. A szénnek allotrop módosulata a grafit, a gyémánt, a C60 fullerén, a szénnanocsövek vagy ez utóbbinak a síkba kiterített formája, a grafén. Az ónnak (Sn) a fehérón és a szürkeón két kristályos módosulata.

Egyes fémek és sok ötvözet hűtésekor vagy hevítésekor, esetenként pedig a képlékenyalakítás hatására olyan fázisátalakulások figyelhetők meg, amelyeknél mind az eredeti, mind az új fázis szilárd. Az ilyen fázisátalakulás neve allotrop átalakulás. Gyakorlati fontosság miatt a vas allotrop átalakulásai mondhatók a legjelentősebbnek: a δ-vas (TKK) → γ-vas (LKK) → α-vas (TKK) fázisátalakulás hűtéskor, ellenkezője pedig hevítéskor játszódik le a tiszta vasban és sok Fe-ötvözetben.

– **A diffúzió szerepe a fázisátalakulásokban**

A diffúzió (2.9.1. szakasz) a fémek és ötvözetek tulajdonságainak egyik meghatározó anyagtranszport-folyamata. A fázisátalakulásokat a diffúzió szempontjából nézve megkülönböztetünk:

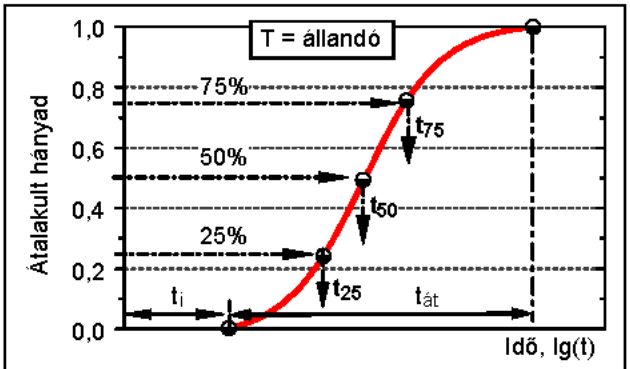
- diffúziós átalakulásokat és
- diffúzió nélküli átalakulásokat.

A diffúziós átalakulások közé a hevítéskor és hűtéskor, avagy izotermikusan lezajló olyan allotrop átalakulásokat soroljuk, amelyekben a diffúzió – az atomok koncentráció-, hőmérséklet- és időfüggő mozgása – a meghatározó. Ugyancsak diffúziós átalakulás pl. a kiválások képződése és sok más, ún. termikusan aktivált folyamat. Az izotermikus diffúziós átalakulások időbeli lefolyását szigmoid görbe alakú függvények (2-36. ábra) írják le, pl. a Johnson–Mehl–Avrami-egyenlet, amelyben y az átalakult anyaghányad, t az idő, k és n konstansok:

$$y = 1 - \exp\left(-k \cdot t^{n}\right).$$

A 2-36. ábra alapján a valamely hőmérsékleten már nem stabil fázisok diffúziós átalakulásának fontosabb jellemzői a következők:

- Nem azonnal kezdődik meg, hanem egy bizonyos t_i inkubációs idő után.
- Az átalakulás időbeli lefolyását szigmoid görbe jellegű függvény írja le.
- Állandó hőmérsékleten is teljes, tehát az eredeti fázis teljes mennyisége átalakul.
- Első lépésként az eredeti fázis kitüntetett pontjain (főleg a szemcsehatárokon) kialakul az új fázis egy *magja*, és ha ez a mag eléri a kritikus méretet, a magképződést növekedés követi.



2-36. ábra – A diffúziós fázisátalakulások menete

– **A martenzites átalakulás**

Diffúzió nélküli fázisátalakulásokról akkor beszélünk, amikor a kristályrács átalakulása nem az atomok diffúziós mozgásával megy végbe. A diffúzió nélküli fázisátalakulások között talán a legismertebb az ún. *martenzites átalakulás*, amelyben az új fázis a rács komplex, és koordinált, nyíró-alakváltozás okozta átrendeződésével születik. Martenzites átalakulást leginkább a gyors hűtés vagy a rácsban ébredő nyírófeszültség okoz. Az acélokat véve példaként, az eredeti fázis az ausztenit, a belőle képződő új fázis a martenzit, és alapesetben az átalakult anyaghányadot csak a T hőmérséklet és egy, az anyagtól függő határhőmérséklet, az M_S („martenzit start") hőmérséklet szabja meg.

A martenzites átalakulások néhány lényeges jellemzője a következő:

- Amint a hőmérséklet az M_S alá csökken, azonnal, inkubációs idő nélkül elkezdődik.
- Ha a hőmérséklet nem csökken az M_f hőmérséklet („martenzit finis") alá, az átalakulás nem megy végbe teljes mértékben: ilyenkor ún. „maradék ausztenit" marad az anyagban.
- A martenzites fázisátalakulás időbeli lefolyása kvázi-pillanatszerű (bár létezik izotermikus és időfüggő változat is).
- Az acélokban – az uralkodó álláspont szerint – csak hűtéskor játszódhat le, vagyis irreverzibilis, de több ötvözetben (pl. az alakemlékező Ni-Ti ötvözetekben) hevítéskor is vagy mechanikai feszültség hatására is végbemehet, vagyis ezek anyagokban lehet reverzibilis. Az acélokban az ultranagysebességű hevítés feltételei között végbemenő martenzites jellegű ausztenitesedés lehetőségét *Prohászka János* (1920–2012), a BME Mechanikai Technológiai és Anyagszerkezettani Intézetének egykori igazgatója vetette fel, és kísérletileg is kimutatta 1990-ben.

3. fejezet
A mechanikai tulajdonságok

Törött, korrodálódott, kora középkori lelet (rézkorong)

3. A mechanikai tulajdonságok

A szerkezeti anyagok (fémek, kerámiák, üvegek, polimerek, gumik), a funkcionális anyagok (pl. festékek, ragasztók, hegesztőanyagok) és soksok termék (pl. ruházati termékek, élelmiszerek vagy hatlapú csavaranya stb.) minősítésére, rendeltetésüknek való megfeleltetésére számos követelményt támasztott a szabványosítási rendszer. A szabványokat úgy tekinthetjük, mint a kereskedelmi forgalomban érdekelt piaci szereplők (gyártók, forgalmazók, fogyasztók) közös nyelvét valamely anyag vagy termék egyértelmű jellemzésére. A szerkezeti anyagok esetében a legalapvetőbb minősítési követelmények közé soroljuk a mechanikai tulajdonságokat. A mechanikai tulajdonságok mérnöki szempontból olyan anyagtulajdonságok összessége, amelyek az adott anyag viselkedését kifejezik mindazon külső igénybevételek felléptekor, amelyek elsődleges – de nem feltétlenül egyetlen – összetevője valamilyen mechanikai terhelés.

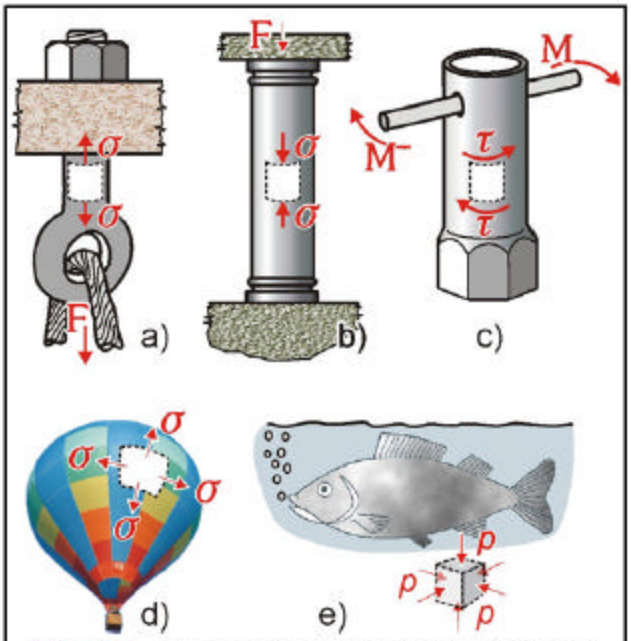
3.1. A mechanikai igénybevételek alapvető csoportjai

A mechanikai tulajdonságok közé tartozhatnak ebben az értelemben:

- Klasszikus fizikai anyagjellemzők (pl. a rugalmassági modulusok).
- A mechanikai terhelésekkel szembeni ellenállásnak csak az anyagtól és a fizikai feltételektől (pl. nyomás, hőmérséklet) függő, de az anyagvizsgálati módszertől és az anyag pillanatnyi alakjától független anyagjellemzői (pl. a törési szívósság).
- A mechanikai terhelésekkel szembeni ellenállásnak azok a mérőszámai, amelyek nem csak az anyagtól és a fizikai feltételektől (pl. nyomás, hőmérséklet), de az anyagvizsgálati módszertől, az anyag geomeriájától stb. is függenek (pl. keménység, nyúlás, folyáshatár).
- Végül: valamely gyártási folyamatra való alkalmasságot kifejező, ún. technológiai tulajdonságok (pl. a forgácsolhatóság, mélyhúzhatóság).

Mechanikai terhelés alatt mindig olyan igénybevételt értünk, amelynek hatására az anyagban valamilyen mechanikai feszültség ébred; ezek alapeseteit vázolja a 3-1. ábra.

Érzékelhető a fentiekből, hogy az anyagok mechanikai tulajdonságait felsorolni akarván nagyon hosszú listát állíthatnánk össze. Azonban nem sok esély van egy teljes listára, ugyanis a szerkezeti anyagok éppen azért olyan sokfélék, mert a legtöbbjük esetében a felhasználót csak néhány mechanikai tulajdonság – és esetleg más további tulajdonságok, pl. sűrűség, hőszigetelő képesség, korrózióállóság, sugárzáselnyelő képesség stb. – megléte, ill. mértéke érdekli. „Egy másik felhasználói igényre másik anyagot választani!", ez nevezhető a bevált anyagválasztási filozófiának, noha vannak ezzel ellentétes törekvések is, pl. van olyan hegesztőanyag-gyártó cég Magyarországon is, amely egyetlen, univerzálisnak mondott terméket javasol minden hegesztési célra – az univerzalitásnak azonban megkéri az árát.



3-1. ábra – A mechanikai feszültségek alapesetei: húzó (a), nyomó (b), nyíró (csavarás) (c), kéttengelyű v. membránfeszültség (d), háromtengelyű v. hidrosztatikus feszültség (e)

Az anyagtól megkívánt mechanikai tulajdonságok összessége szempontjából tehát lényeges szerepet kap az a mechanikai terhelés, amely a szóban forgó anyagot vagy az abból készített szerkezetet terhelni fogja. A mechanikai terheléseket ebből a szempontból három nagy csoportba sorolhatjuk:

- Statikus terhelések: állandó nagyságú és irányú húzás, nyomás, hajlítás, nyírás, csavarás vagy ezek kombinációja.
- Dinamikus terhelések: ütésszerű, lökésszerű hatások, amelyeknél az igénybevételi sebesség jelentős, a hatás időtartama rövid.
- Ismétlődő igénybevételek: a terhelés nagysága és/vagy iránya ciklikusan váltakozik.
- Kombinált igénybevételek: a mechanikai terhelés mellett lényeges szerepet játszik valamely egyéb külső hatás, pl. a nagy hőmérséklet vagy a korrózió.

3.2. Az állapotényezők

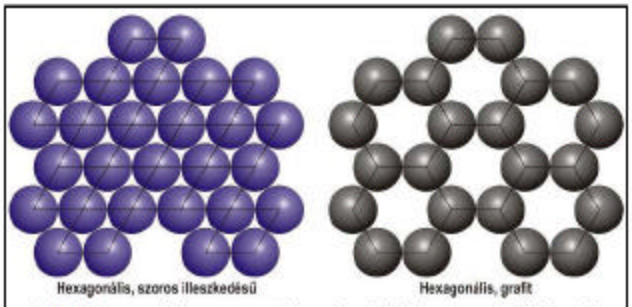
A mechanikai tulajdonságoknak szinte mindegyikét – többé vagy kevésbé – olyan tényezők befolyásolják, amelyek az anyag belső szerkezetével, illetőleg a külső feltételekkel függnek össze. Ismert jelenség az, hogy pl. a (hidegen végzett) kalapálás hatására a fémek keményednek, a meghajlított alumíniumkábel ugyanazon a helyen nem hajlítható vissza, ill. a nagy hidegben az anyagok nagy része sokkal könnyebben törik, mint szobahőmérsékleten. Mindez az állapotényezők hatása, amelyeket két nagy csoportra, a *külső és belső állapotényezőkre* oszthatunk.

3.2.1. Külső állapotényezők

- *Hőmérséklet.* Növelt hőmérsékletnek tekintjük általában a szobahőmérséklet és a Kelvinben megadott olvadáspont fele közötti tartományt, nagy hőmérsékletnek az e feletti tartományt. A kis hőmérsékletek tartományát a Celsius-skála negatív értékeihez kötik, a cseppfolyós gázok hőmérséklet-tartományát pedig kriogén tartományként említik. A hőmérséklet csökkentése általában csökkenti a fémes anyagok képlékenységét, növelése pedig növeli azt. Ellentétesen hat a törési hajlamra: a csak nagy energiaelnyelés hatására törő anyagokat **szívósnak**, a könnyen törő anyagokat **ridegnek** mondjuk.
- *Feszültségállapot.* Megkülönböztetünk egytengelyű és többtengelyű feszültségeket.
  A háromtengelyű (hidrosztatikus) nyomás jelentősen javítja a képlékenységet, a húzás viszont gyakorlatilag megszünteti azt: elridegít.
- *Igénybevételi sebesség.* Miként korábban szó volt róla, megkülönböztetünk statikus és dinamikus terheléseket. Az igénybevételi sebesség kapcsán azt a főszabályt kell megjegyezni, hogy a terhelés sebességének növekedésével csökkennek a képlékenységi mutatók, s bár nő a szilárdság, a törési hajlam is növekedik.

3.2.2. Belső állapotényezők

Kristályszerkezet. A kockarácsos szerkezetű fémek képlékenysége nagy, a LKK fémeké még egészen kis hőmérsékleteken is. A gyémántrácsú anyagok (Si) és a sűrűn rakott hexagonális fémek (pl. Mg, Zn, α-titán) képlékenysége viszont kicsi. A grafit bár hexagonális szerkezetű, az elemi cellája csak az alaplapokon tartalmaz atomokat (3-2. ábra), ezért a kristálysíkok könnyen el tudnak egymáson csúszni, míg az alaplapok között további három atomot tartalmazó rácsok nagyon nehezen deformálhatók.



3-2. ábra – A hexagonális rács kétféle legsűrűbb síkja

3-3. ábra – A hengerlési szálirány hatása

- *Ötvözők és szennyezők.* A szennyezők kis mennyiségben is erősen rontják a képlékenységet. E hatás jóval erősebb, mint a szilárdság növelése. A szennyezők mennyiségét ezért csökkenteni kell, ha nem túl költséges. Az ötvözők hatása összetett, azt külön szakaszban tárgyalja a könyv (lásd az 6.1. szakaszt).
- *Kristályrácshibák.* A közel hibamentes anyagok kivételével mindegyik rácshiba mennyiségi növekedése általában növeli a szilárdságot, ugyanakkor a képlékenységet csökkenti.
- *Szemcseméret.* A fémes anyagokat a *G* szemcseméret szerint a következő, némileg szubjektív szemcseméreti fokozatokba sorolhatjuk:
  – durvaszemcsés anyagok: G > 100 μm
  – normál szemcseméretű: G = 10–100 μm
  – finomszemcsés anyagok: G = 1–10 μm
  – ultrafinomszemcsés anyagok: G = 0,1–1 μm
  – nanokristályos anyagok: G < 100 nm.
- *Szövetszerkezeti sajátosságok:* A krisztallitok alakjának torzulásával (pl. valamely irányban elnyújtott szemcsék) vagy a mikro- és mezoskálán észlelhető szálirány (3-3. ábra) szálasság, rétegesség, kérgesség stb. miatt a tulajdonságok is irányfüggést mutathatnak; ez az irányfüggőség a mechanikai anizotrópia.

A mechanikai tulajdonságok egyik csoportját a **szilárdság típusú jellemzők** alkotják. Ezek az anyagnak a mechanikai terhelések valamelyikével szembeni ellenállását fejezik ki. A másik nagy csoportba ama tulajdonságokat soroljuk, amelyek a terhelés okozta alakváltozással függnek össze, és **képlékenységi jellemzőknek** nevezzük.

Az állapotényezőket általában ama hatásuk szerint értékeljük, hogy mely tulajdonságcsoportra hatnak kedvezően. Az esetek döntő többségében elmondható, hogy amikor egy állapotényező a szilárdsági jellemzőket növelő módon hat az anyagra, a képlékenységi jellemzők romlanak.

3.3. A főbb mechanikai tulajdonságok

Ennek a fejezetnek a további részében sorra véve – de csak a lényegre törekedve – áttekintjük mindazokat az anyagtulajdonságokat, amelyek a főleg a gépipari anyagokkal dolgozó menedzser és mérnök szakemberek számára a „tudni illik" kategóriába tartoznak. Az anyagtulajdonságok ismerete ugyanúgy alapvető jelentőségű a tervezés, a gyártás, az üzemeltetés, a karbantartás és az anyagokkal, termékekkel való kereskedés területén, mint a kutató fejlesztő munkában, bár természetesen más elmélyültség kívántatik meg az anyagismeret terén egy kutatótól.

Amiként az összes anyagtulajdonság, úgy a mechanikai tulajdonságok meghatározása is elválaszthatatlanul összekapcsolódik az anyagvizsgálati módszerekkel. Az anyagvizsgálati mérési módszerek arra hivatottak, hogy számszerű, az anyagok közötti összehasonlítást biztosító és egységesen elfogadott mérőszámokat használjunk erre a célra. Ez utóbbi igény miatt nyert óriási jelentőséget a szabványosítás az anyagvizsgálatban.

A 3.1.1. szakaszban felsorolt mechanikai igénybevételek mindegyike törvényszerűen alakváltozást okoz; ezt világosan látni kell, még akkor is, ha az alakváltozás igen gyakran nem látható. A különféle mechanikai igénybevételek tehát külső hatások az anyagra, és az anyag válaszai ezekre voltaképpen a mechanikai tulajdonságok számszerűsíthető kifejeződései.

Az alább felsorolt **főbb mechanikai tulajdonságokat** részletesebben fogjuk tárgyalni. Megismerjük a mechanikai tulajdonságot pontosan kifejező anyagvizsgálati mérőszámokat vagy adott esetben fizikai anyagjellemzőket – amelyeket természetesen magukat is mechanikai tulajdonságoknak tekintünk –, valamint a meghatározásukra szolgáló anyagvizsgálati módszereket. A szilárd anyagok jellemzésére használt legfontosabb mechanikai tulajdonságok tehát a következők:

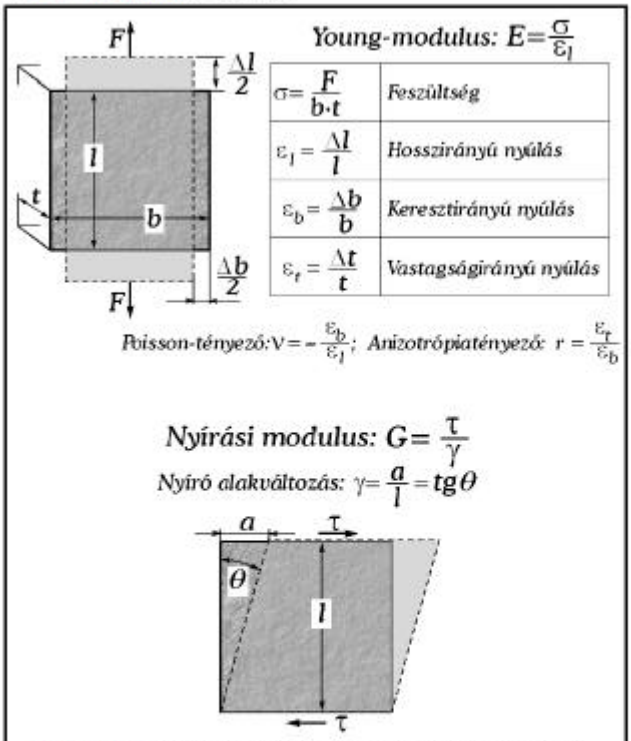
- rugalmassági modulus,
- merevség,
- szilárdság,
- keménység,
- képlékenység,
- szívósság,
- repedésterjedéssel szembeni ellenállás,
- kifáradással szembeni ellenállás,
- kúszással szembeni ellenállás,
- kopással szembeni ellenállás.

Számos további mechanikai tulajdonság kaphat jelentőséget egyes anyagcsoportokban (pl. a viszkoelaszticitás, a szuperképlékenység stb.).

3.3.1. A rugalmassági modulusok

A szilárd testek alakváltozással reagálnak a rájuk ható mechanikai feszültségekre. Ha a feszültség megszűnése után a test visszanyeri eredeti alakját, *rugalmas alakváltozásról* beszélünk. A rugalmas alakváltozás és azt létrehozó feszültség között lineáris összefüggés érvényes; a feszültség és az alakváltozás hányadosa adja meg a rugalmassági modulust. Többféle modulust definiáltak az anyagtudomány különféle területein (húzó, nyomó, nyíró, térfogati stb.), amelyek közül a legjellemzőbbeket – az E húzó vagy Young- és a G nyírási vagy csúsztató rugalmassági modulust –, továbbá a rájuk és a rugalmas alakváltozásokra érvényes összefüggéseket a 3-4. ábra szerint lehet értelmezni. Dimenziójuk rendszerint N/mm^2 vagy GPa (1 GPa = 10^9 Pa). A lineáris kapcsolat miatt a Young-modulus a feszültség-alakváltozás diagram kezdőszakaszának meredeksége.

Megjegyzendő: a fémekre általában érvényes, hogy a *húzó* és a *nyomó rugalmassági modulus* megegyezik, viszont a polimerek egyik fő jellegzetessége az, hogy ez a kettő eltér egymástól. A térfogatváltozással is járó alakváltozásokra használják az ún. *összenyomódási* vagy *térfogati modulust* is (jele: K), de a fémes anyagok terén csak a hullámterjedési folyamatok leírásánál van szerepe. A legelterjedtebb anyagok Young-modulusát a 3-1. táblázat mutatja.



3-4. ábra – A rugalmassági modulusok, a rugalmas alakváltozások és a Poisson-tényező értelmezése

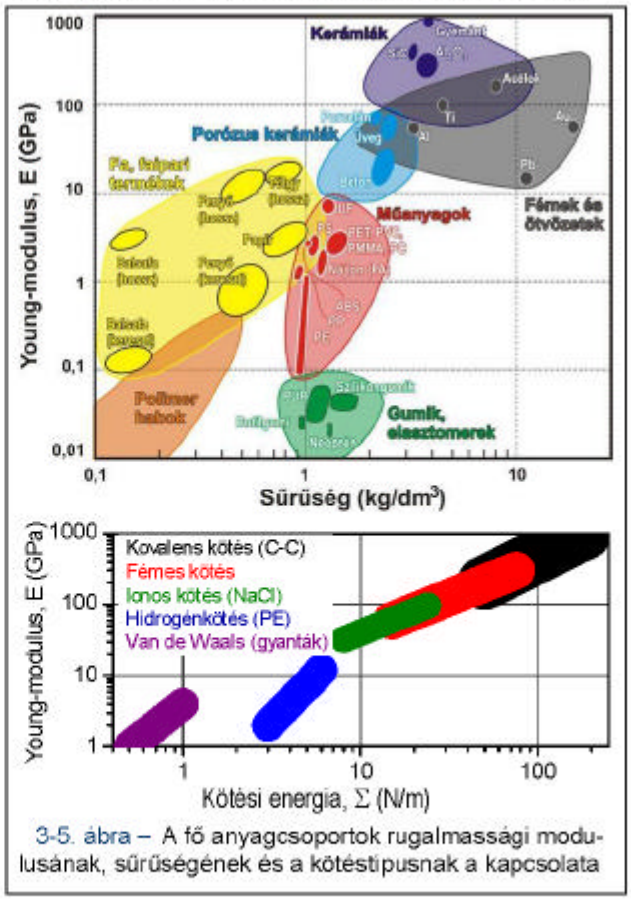
Ügyelni kell arra, hogy a rugalmasság kifejezés használata az anyagok világában nem igazán szerencsés; helyette és szabatosan a rugalmassági modulus fizikai anyagjellemzőként fejezi ki azt a képességet, hogy az igénybevételnek az anyag *maradó alakváltozás nélkül* mennyire áll ellen.

Kerámiák, *E* (GPa)	
Gyémánt	1200
Grafit	27
Keményfém (WC + Co)	530
Szilícium-karbid (SiC)	450
Alumínium-oxid (Al_2O_3)	390
Kvarcüveg (SiO_2)	94
Nátronüveg	69
Gránit	62
Beton	50
Jég	9,1
Fémek, E (GPa)	
Ozmium	551
Volfrám	411
Molibdén	329
Bór	320
Króm	279
Nikkel	214
Vas (és ötvözetlen lágyacél)	210
Rozsdamentes acél	190
Öntöttvas	180
Réz	130
Titán	116
Sárgarezek és bronzok	110
Horgany (cink, Zn)	108
Szilícium	107
Ezüst	83
Arany	78
Alumínium	70
Ón	50
Magnézium	45
Ólom	16
Nátrium	10
Lítium	4,9
Polimerek, E (GPa)	
Fa	6–16
Tölgyfa	11
Teflon	0,5
Polietilén	0,23–0,80
Polipropilén	1,5–2,0
Polisztirol	3,0–3,5
Nájlon (poliamid)	2–4
Aramid szálak (Kevlar)	70–190
Poli(etilén-tereftalát), PET	2,7
Poli(vinil-klorid), kemény PVC	2,4–4,1
Gumi	0,01–0,1

3-1. táblázat: Néhany anyag Young-modulusa

A szerkezeti anyagok felhasználói számára nagyon lényeges az anyagok sűrűsége. Amikor egy jármű, pl. egy kerékpár tömegének csökkentése a cél azért, hogy jobban gyorsuljon, és a beépített anyag mennyiségét nem lehet csökkenteni, akkor csak a sűrűség csökkentése marad mint megoldás. Ugyanakkor nem lehet eltekinteni attól, hogy a szerkezeti anyagok sűrűségének csökkenése erősen kihat a rugalmassági modulusra; ezt mutatja nagyon szemléletesen az Ashby-féle tulajdonságtérképek talán legismertebb fajtája, amely a 3-5. ábrán látható. A társított (hibrid, összetett, kompozit) anyagoknak éppen az a legfőbb sajátosságuk, hogy ezt a két fizikai anyagjellemzőt – a rugalmassági modulust és a sűrűséget – együttesen tudják kedvező értéken tartani.

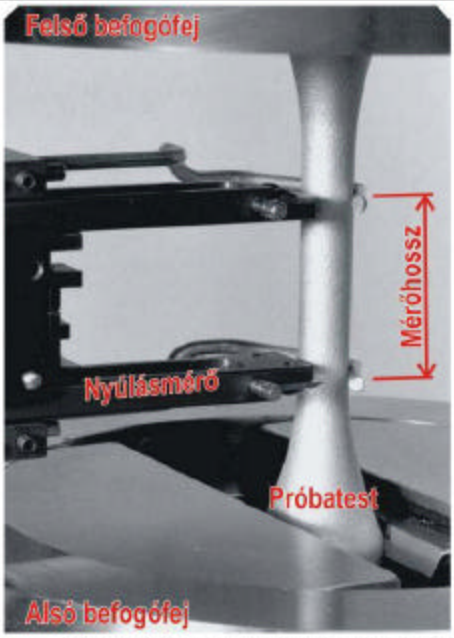
Amint említtetett, a rugalmassági modulus a feszültség-alakváltozás diagram egyenesének meredeksége, ezért pl. a Young-modulus meghatározásának legegyszerűbb gyakorlati módja a diagram felvétele egytengelyű húzással. Az igazán pontos modulusmeghatározás a hang terjedési sebességének vagy a természetes rezgések frekvenciájának meghatározása alapján történik. Ennek az az oka, hogy a modulus (és ugyanúgy a sűrűség) nagyon erősen függ az anyag atomi szerkezetétől (atomátmérő, atomtávolság, kristályosság) és a kémiai kötés erősségétől (jele: Σ).



3-5. ábra – A fő anyagcsoportok rugalmassági modulusának, sűrűségének és a kötéstípusnak a kapcsolata

3.3.2. A szilárdság és mérőszámai

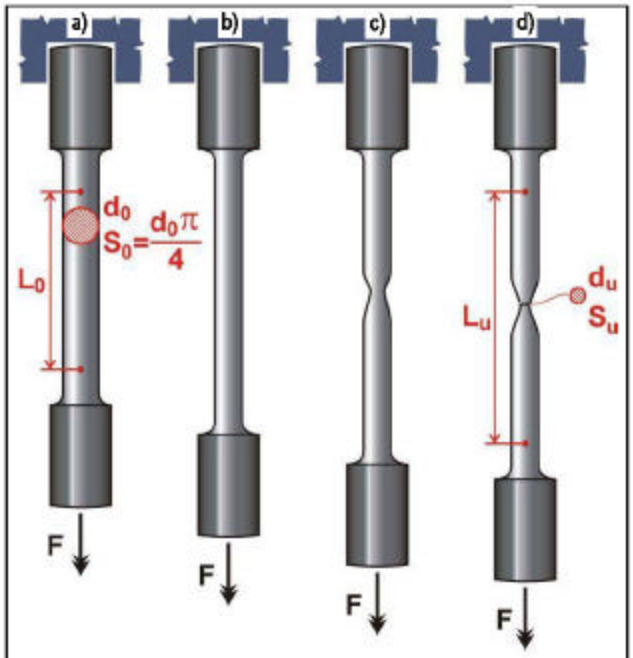
A szilárdság (kissé leegyszerűsítve: teherbírás) számszerű kifejezésére szolgál a *folyáshatár* és a *szakítószilárdság* mint a legáltalánosabban használt szilárdsági mérőszámok. Meghatározásukra a *szakítóvizsgálat* szolgál. A szakítóvizsgálati szabványok száma kb. 50; számos szempont szerint egyedi feltételeket írnak elő. Közös bennük, hogy a vizsgált anyagot egytengelyű húzással törésig (szakadásig) terhelik. A fémekre vonatkozóan az MSZ EN ISO 6892-1:2010 V számú és „Fémek. Szakítóvizsgálat. 1. rész: Vizsgálat szobahőmérsékleten" című szabvány a mértékadó.



3-6. ábra – Szakítógépbe fogott próbatest a részerelt nyúlásmérővel. A vizsgálatot érintéses nyúlásmérő nélkül is el lehet végezni, ilyenkor optikai úton mérhető a nyúlás, vagy pedig a próbatestre jelölt mérőhossz hosszúságváltozását utólag lehet lemérni

A szakítóvizsgálatnál a vizsgálandó anyagból próbatestet készítenek, és ezt szakítógépbe fogva elszakítják (3-6. ábra). A szakítás egyenletes sebességű, egytengelyű húzással történik, miközben mérjük az erőt és a próbatest mérőhosszának változását. A szakításkor a próbatest (3-7. ábra):

- először rugalmasan nyúlik (3-7.a).
- A rugalmassági határt kellően meghaladó feszültségen a lágyacél *megfolyik*; „folyás" közben még csökkenő erő hatására is nyúlhat. Az alumínium viszont nem folyik meg.
- A rugalmas alakváltozás után kezdődik az egyenletes képlékeny alakváltozás, és tart az erő legnagyobb értékének elérésig (3-7.b).
- Az erő ezután általában csökken. Ekkor az alakváltozás a próbatest egy szűk szakaszára lokalizálódik: ez a kezdete a kontrakciónak (c).
- Végül a próbatest eltörik, elszakad (3-7.d).

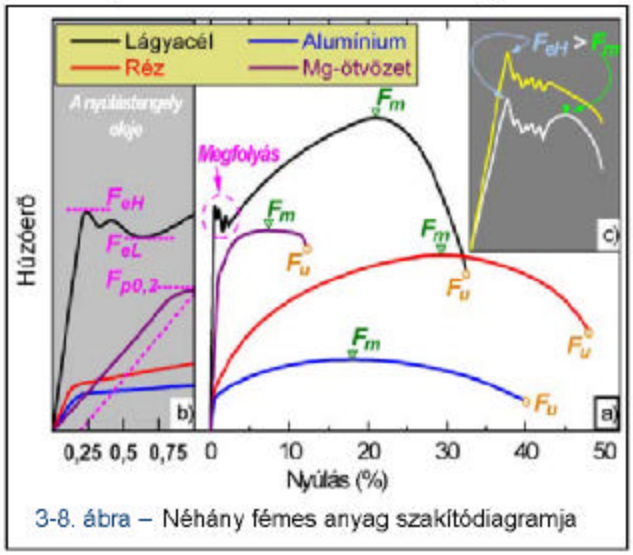


3-7. ábra – A próbatest alakváltozásának fő állomásai a szakítóvizsgálat közben

A szakítóvizsgálat közben rögzített erő és megnyúlás alapján rajzolható meg a *szakítódiagram;* a 3-8.a-b ábrán látható ez a TKK kristályrácsú lágyacél, a LKK Al és Cu s egy hexagonális kristályrácsú Mg-ötvözet esetére. A szakítódiagram alapján az R_m szakítószilárdság, az R_{eH} *folyáshatár* és az $R_{p0,2}$ *egyezményes folyáshatár* értéke:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \qquad R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} \qquad R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0}$$

A számítási képletekben lévő erőket a diagram mutatja, S_0 pedig az eredeti keresztmetszetet jelöli. A folyáshatárok számításához használt erő a képlékeny alakváltozás kezdetéhez közeli erőt jelöl, amelynél biztosan megkezdődik az anyag képlékeny alakváltozása, vagy megfolyik. A töréshez tartozó F_U erő és az S_U törési keresztmetszet hányadosa a *valódi törési feszültség.*



3-8. ábra – Néhány fémes anyag szakítódiagramja

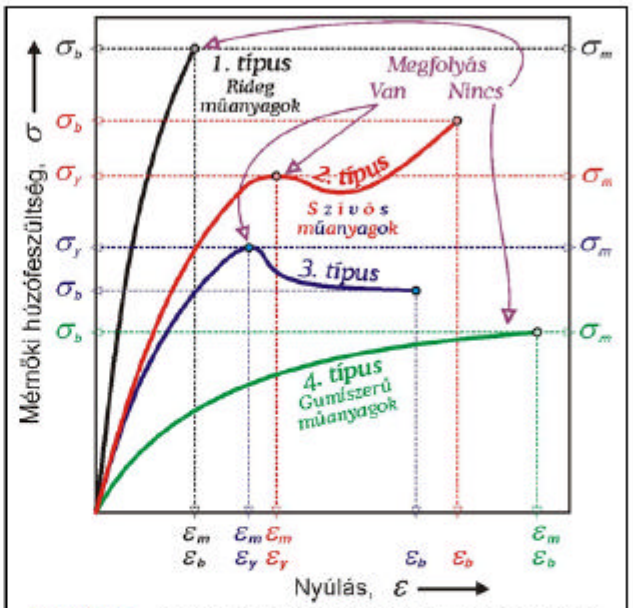
A szakítóvizsgálattal meghatározható szilárdsági anyagtulajdonságok dimenziója MPa vagy N/mm^2. A folyáshatárok és a szakítószilárdság egyezményes mérnöki mérőszámok, nem pedig valós fizikai tartalmat hordozó anyagjellemzők. Ezt könnyű belátni, hiszen a kiszámításukhoz használt erők felléptekor – főként a szakítószilárdság esetében – a próbatest már jócskán megnyúlt, s így az eredeti keresztmetszete lecsökkent a térfogat-állandóságból következően.

A 3-8. ábra azt is megmutatja, hogy a különböző fémek szakítódiagramja jelentősen eltérő jellegű lehet, jelen esetben a kristályszerkezet hatása figyelhető meg. A TKK kristályrácsú fémekre és ötvözetekre jellemző a jól észlelhető megfolyás, amikor akár csökkenő erő mellett is képes nyúlni az anyag; azt mondjuk, hogy van *kifejezett folyáshatáruk*. Az ilyen anyagokra meghatározható az *ReH* felső és az *ReL* alsó folyáshatár. Amely anyagoknak nincs kifejezett folyáshatáruk, azokra nézve az *Rp0,2* egyezményes folyáshatárt kell meghatározni, amelyhez a 0,2% maradó alakváltozáshoz tartozó *Fp0,2* erő ismerete szükséges.

Ellentétben a 3-8.a-b ábrán a lágyacélra vonatkozó szakítódiagrammal, a szakítószilárdsághoz tartozó *Fm* erő nem feltétlenül nagyobb, mint a folyáshatárhoz tartozó *FeH* erő; ebben az esetben a megfolyás utáni lokális erőmaximumot kell *Fm*-nek tekinteni – ha van. Ha nincs ilyen lokális erőmaximum (3-8.c ábra), hanem a szakítógörbe eme szakasza monoton csökken, akkor az adott anyagnak nincs szabványos szakítószilárdsága!

A műanyagok között gyakoriak azok a fajták, amelyeknek a szakítóvizsgálat során mért erőből, a próbatest eredeti keresztmetszetéből és a nyúlásból meghatározott *feszültség-nyúlás diagramja* olyan, mint a 3-9. ábrán látható 2. vagy 3. típusú görbe. Ezért a műanyagoknál – amellett, hogy másként is jelölik a szilárdsági mérőszámokat – a σ_y *folyási feszültség* és a σ_m *szilárdság* mellett még a σ_b *törési feszültséget* is alkalmazzák mint szilárdsági jellemzőt *.

Mind a fémek, mind a műanyagok szakítóvizsgálatában a szilárdsági mérőszámokat mérnöki feszültséggel fejezzük, vagyis az erőt az eredeti keresztmetszetre vonatkoztatjuk. A szakadás után pontosan megmérhető keresztmetszetre vonatkoztatott törési feszültség viszont valódi feszültség.



3-9. ábra – A műanyagok feszültség-megnyúlás diagramjainak jellegzetes típusai:
1. rideg, megfolyás nélkül szakadó műanyagok
2-3. megfolyás után szakadó, szívós műanyagok
4. folyás nélkül szakadó szívós, gumiszerű műanyagok
Az indexben használt betűk jelentése: y = folyásnál, m = szakítószilárdságnál, b = szakadásnál

A nagyon rideg kerámiák és üvegek szilárdságát a nyomószilárdsággal és a hajlítószilárdsággal fejezzük ki, de ezeket nem részletezzük. A szakítóvizsgálatot a kerámiák anyagcsaládjában csak kerámiaszálak és kerámiamátrixú kompozitok vizsgálatára alkalmazzák.

3.3.3. A merevség

A modulust úgy definiáltuk, hogy az kifejezi az anyagnak azt a képességét, hogy a rá ható igénybevételnek maradó alakváltozás nélkül áll ellen. A merevség az anyagnak a rugalmas alakváltozással szembeni ellenállását fejezi ki. Ebben a megközelítésben a merevség ellentett tulajdonságpárja a rugalmasságnak, de mint szóba került, ez utóbbi kifejezésnek a használata az anyagoknál nem igazán szerencsés (viszont emberi tulajdonságként nagyon is értékelhető).

A húzó- vagy nyomóterheléseknél az anyagra ható F erő $\sigma = F/S_0$ feszültséget és $\varepsilon = \Delta L/L_0$ rugalmas alakváltozást okoz. A $\sigma = E \cdot \varepsilon$ Hooke-törvénybe helyettesítve ezeket, kifejezhetjük a ΔL hosszváltozást, és abból a B húzómerevséget:

$$\Delta L = \frac{L_0 \cdot F}{S_0 \cdot E} \rightarrow B = \frac{F}{\Delta L} = \frac{S_0 \cdot E}{L_0} \text{ (N/m)}$$

Húzásnál vagy nyomásnál a keresztmetszet alakja – pl. kör, négyzet, cső stb. – nem lényeges, hiszen a feszültség egyenletes, ám hajlítás és csavarás esetén már nagyon jelentősen befolyásolja a merevséget ugyanannál az anyagnál.

* *Az érvényes szabvány (MSZ EN ISO 527-1:2012) új jelöléseket és új megnevezéseket tartalmaz! Meg kell jegyezni, hogy a régi, MSZ EN ISO 527-1:1999-es szabvány hibás fordítás miatt felcserélte az ott szereplő σ_M és σ_B meghatározását.*

3.3.4. A keménység

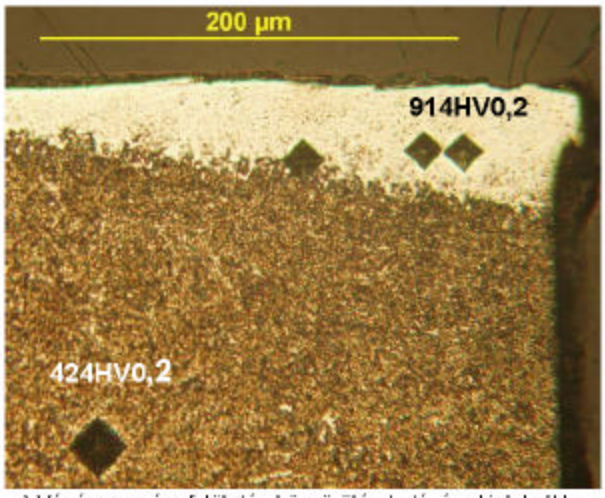
A keménység a szilárd testek azon tulajdonsága, hogy milyen mértékben állnak ellen a felületükre ható (főleg nyomó-) terhelésnek. A keménység és a szilárdság gyakorlatilag rokon értelmű fogalmak, de ez nem jelenti azt, hogy szabadon felcserélhetők lennének. Arra is célszerű ügyelni, hogy a nem kemény szerkezeti anyagokat nem puhának nevezzük, hanem lágynak.

A keménységi mérőszám megadása mindig az éppen alkalmazott vizsgálati módszer szerint szükséges, ugyanakkor a különféle keménységi skálák (miként, pl. a hőmérsékletskálák) átválthatók egymásba – amennyiben átfedik egymást.

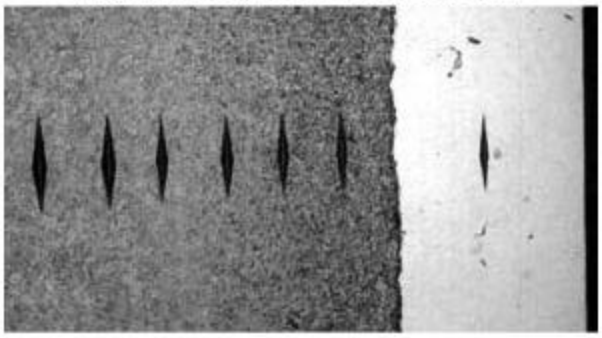
A mérési módszerek leginkább azon az elven alapulnak, hogy a vizsgálandó anyag felületébe nyomott behatolótest lenyomatának méretét vagy benyomódásának mélységét határozzák meg, de vannak különleges mérési módszerek, amelyek pl. az ultrahanghullámok terjedési vagy merev testek visszapattanási jellemzőit használják fel keménységi mérőszám képzésére.

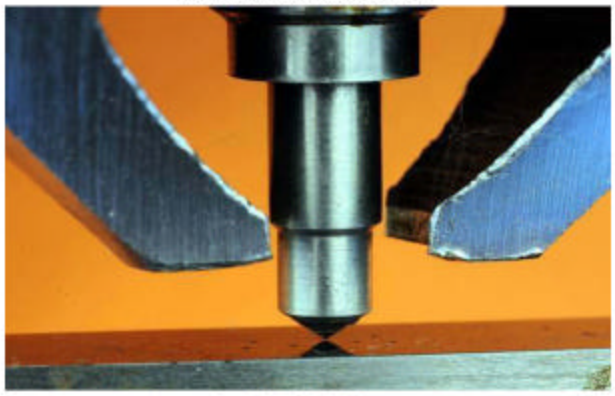
A keménység vizsgálatára legelterjedtebb keménységi mérőszámok és a mérésük alapelve:

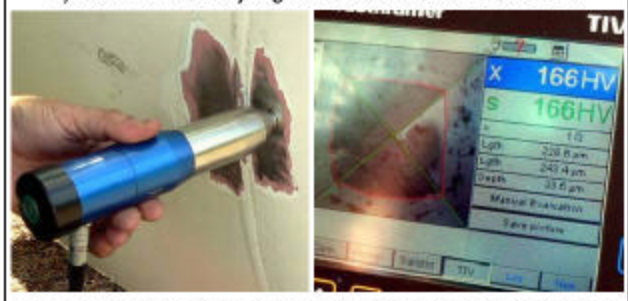
- Brinell-keménység, HBS vagy HBW: a felületbe nyomott acél- vagy keményfémgolyó kör alakú lenyomata átlójának mérése alapján számítható.
- Vickers-keménység, HV: a felületbe nyomott négyzetes gyémántgúla lenyomatának két átlójából számítható a keménység (3-10.a ábra).
- Knoop-keménység, HK: felületbe nyomott rombuszos gyémántgúla lenyomatának két átlójából számítható a keménység (3-10.b és 3-10.d ábra).
- Rockwell-keménység: fémeknél a felületbe nyomott, 1/16 inch átmérőjű acélgolyó (HRB) vagy 120°-os gyémántkúp (HRC, 3-10.c ábra) benyomódási mélységét méri egy mérőóra, és ebből származik a keménységi mérőszám. A terhelőerő és a golyóátmérő változásával további 13 keménységtípus adható meg, pl. a műanyagok keménységének (HRR) mérésére 1/2 inch átmérőjű golyót használnak.
- Nanokeménység: gyémánttű (nanointender) benyomódásának erő-idő függvénye (ultravékony felületi rétegek jellemzésére.
- Shore-keménység: a gumik keménységének meghatározására a Shore-durométert használják, amely hegyesszögű kúpos behatolótestet vagy kis átmérőjű gömböt nyom be a felületbe meghatározott erővel és ideig.



a) Vágószerszám felületén köszörülés hatására kialakult kemény felületi réteg keresztmetszeti csiszolaton


b) Knoop-keménységi lenyomat keménykrómozott felület keresztmetszeti csiszolatán


c) Rockwell-keménységmérőcsúcs a felületre ereszve



d) Pébégáztartály anyagának helyszíni keménységvizsgálata

3-10. ábra – Keménységi lenyomatok metallográfiai csiszolatokon (a és b), Rockwell-mérőcsúcs mérési helyzetben (c), Vickers-mérés hordozható műszerrel (d)

3.3.5. A képlékenység és mérőszámai

Egy anyag képlékenysége alatt legegyszerűbb esetben – egytengelyű húzás hatására – azt értjük, hogy milyen mértékű képlékeny alakváltozásra képes törés nélkül.

A fémes anyagoknál a szakítóvizsgálat során elszakított próbatest L_0 mérőhosszúságának ΔL megváltozását elosztva az eredeti hosszúsággal, meghatározható a *szakadási nyúlás (A)*. Ha a próbatest nem a szabványban előírtak szerint arányos méretű, a szakadási nyúlás jeléhez indexben meg kell adni a mérőhosszúságot mm-ben. A szakadási nyúlás kiszámítása:

$$A = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \quad (\%)$$

A *fajlagos keresztmetszet-csökkenés* (másként: kontrakció) az S_0 keresztmetszet megváltozásából számítható az egyenletes nyúláshoz hasonlóan:

$$Z = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100 \quad (\%)$$

A műanyagoknál a képlékenységet csak a különféle nyúlásokkal fejezzük ki; ezek jelölését és értelmezését a 3-9. ábra tartalmazza.

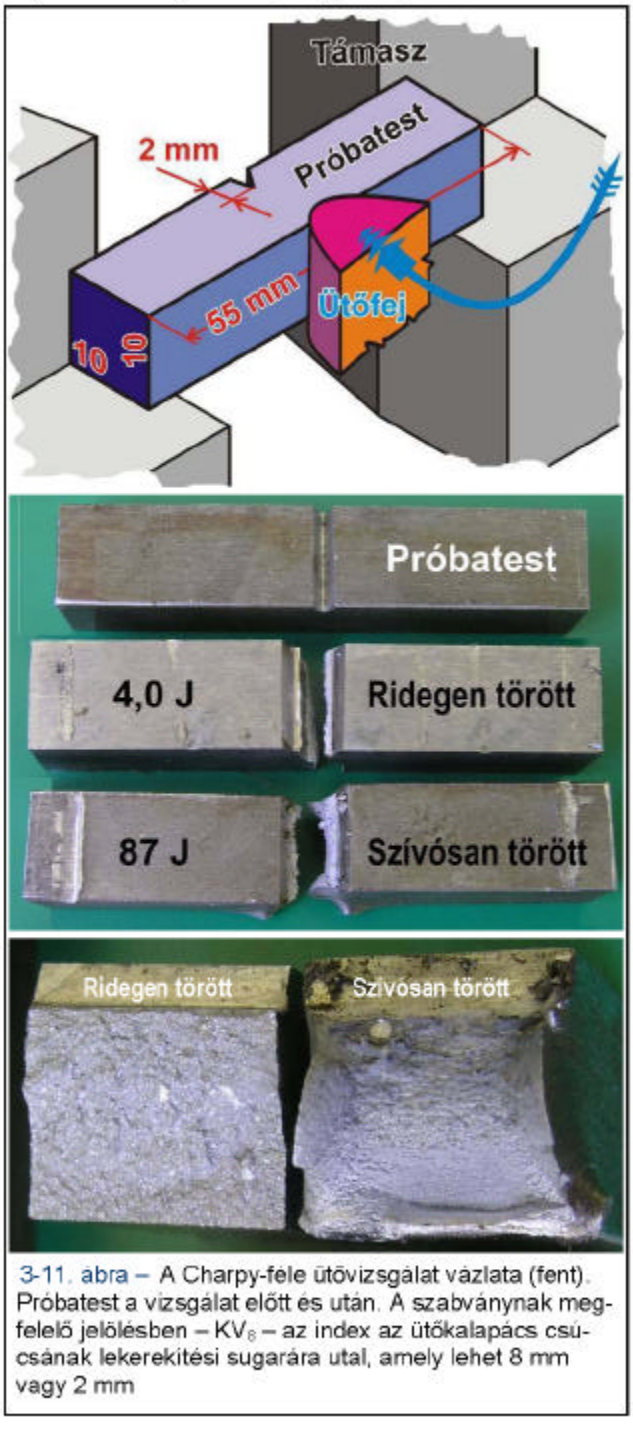
3.3.6. A szívósság és az ütőmunka

A szívósság mint mechanikai anyagtulajdonság az anyagnak azt a képességét fejezi ki, hogy mennyire képes ellenállni a törésnek, mégpedig a váratlanul bekövetkező, ún. ridegtörésnek. A szívósság fő anyagvizsgálati mérőszámaként az *ütőmunka* arra szolgál, hogy az anyagoknak a ridegtörést okozó hatásokkal szembeni ellenállását jellemezze egy erre a célra szolgáló szabványosított vizsgálat, a Charpy-féle ütővizsgálat segítségével. A fémekre az MSZ EN ISO 148-1:2011 „Fémek. Charpy-féle ütővizsgálat. 1. rész: Vizsgálati módszer", a műanyagokra pedig az MSZ EN ISO 179-1:2010 „Műanyagok. A Charpy-féle ütési jellemzők meghatározása. 1. rész: Nem műszeres ütésvizsgálat" szabvány a legáltalánosabban használt előírás.

Az ütővizsgálat *Georges Charpy* Budapesten 1901-ben tett javaslatára vált nemzetközileg elfogadottá. Az ütőmunka – jelölése (3-11. ábrán látható, V-bemetszésű próbatestnél) KV_8, dimenziója J (joule) – annak az energiának felel meg, amely egy szabványos próbatest eltörésekor a törésre fordítódik.

Az ütőmunka mellett az ugyancsak szabványos, oldalirányú kiszélesedéssel (jele: *LE*) is jellemezhető a töréssel járó képlékeny alakváltozás.

A vizsgálatot különböző hőmérsékleteken elvégezve meghatározható az ún. *átmeneti hőmérséklet* (jelölése T_t), amelyet lefelé átlépve az anyag addig szívós (törésnek jól ellenálló) viselkedését rideg (törésre hajlamos) viselkedés váltja fel. Ez az ún. elridegedés fokozott jelentőséggel bír a kis hőmérsékleten üzemelő, ill. a besugárzásnak kitett anyagoknál. Az elridegedést akként lehet ellenőrizni, hogy az anyagtól és a terhelési feltételektől függően megválasztott, elvárt minimális ütőmunkaértékkel vetjük össze a vizsgálati eredményeket. A szerkezeti acélokra ez az érték leginkább KV_I = 27 J vagy 40 J.

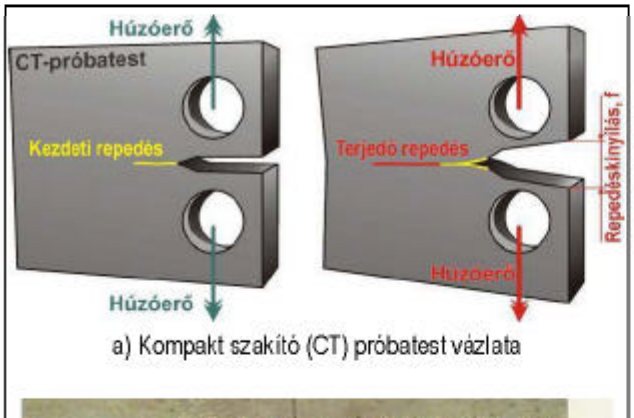


3-11. ábra – A Charpy-féle ütővizsgálat vázlata (fent). Próbatest a vizsgálat előtt és után. A szabványnak megfelelő jelölésben – KV_8 – az index az ütőkalapács csúcsának lekerekítési sugarára utal, amely lehet 8 mm vagy 2 mm

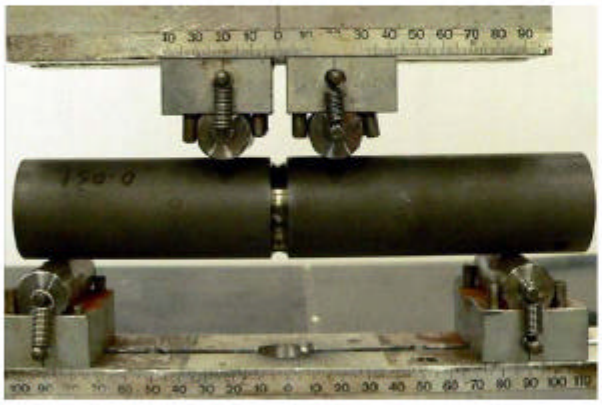
3.3.7. A repedésterjedéssel szembeni ellenállás

A 3.6. fejezet részletesebben is bemutatja majd a törési folyamatot, de már itt hangsúlyozni érdemes, hogy a törés soha nem egy előzmények nélküli, pillanatszerű esemény, bár kétségkívül váratlan és gyors az esetek nagy többségében. A törés mindenkor egy folyamat, amelyben a végső törési eseményt megelőzi egy repedésképződési és egy repedésterjedési folyamat. A repedésképződés kimaradhat, ha az anyag már eleve tartalmaz gyártási eredetű repedéseket vagy repedésnek minősülő anyaghibákat.

A repedést már tartalmazó anyag nem feltétlenül törik el, ha terhelés alá kerül, ugyanis ellenáll a repedésterjedésnek. Az anyagnak ezt a képességét fejezi ki a *törési szívósság*, jelölése: K_{Ic}. Ezt az anyagjellemzőt csak törésmechanikai alapismeretek birtokában lehetne pontosan értelmezni, ám ez nem része a könyv témaköreinek. A törési szívósságot előzetesen berepesztett törésmechanikai próbatesteken határozzák meg, pl. szakítással (3-12.a ábra) vagy hárompontos hajlítással. A valódi repedést előfárasztással hozzák létre, pl. a 3-12.b ábrán látható négypontos terhelés révén.



a) Kompakt szakító (CT) próbatest vázlata



b) Négypontos hajlítással végzett előfárasztás

3-12. ábra – Törésmechanikai vizsgálatokra használt próbatestek. A repedéskinyílást finomnyúlásmérővel kell mérni (ez nincs rajta az ábrán)

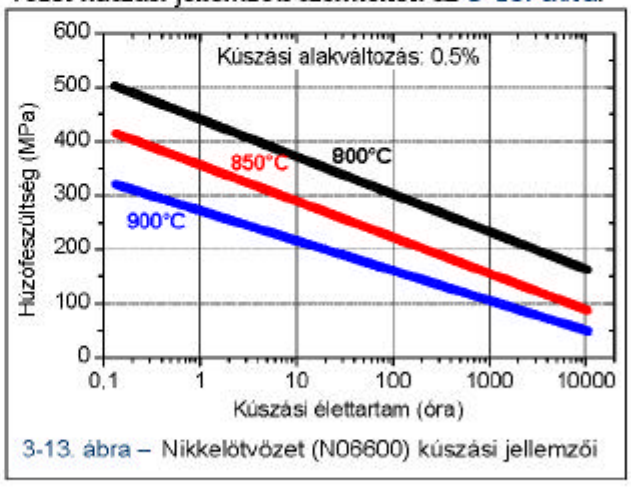
3.3.8. A kifáradással szembeni ellenállás

Kifáradásnak azt a károsodási folyamatot nevezzük, amelyet a folyáshatárnál kisebb (tehát csak rugalmas alakváltozást okozó) feszültség nagyságának / előjelének – lüktetés / lengés – ciklikus váltakozása okoz. A kifáradás sokszor nagyon lassan megy végbe, a repedés(ek) fokozatos terjedésével, és végül törést okoz. Gyakran fordul elő a járműipar különféle szerkezeteiben, alkatrészeiben, pl. tengelyek, fogaskerekek, sínek stb.

A *kifáradási határ* a szimmetrikus lengőterhelés olyan feszültségamplitúdója, amelynél kisebb igénybevétel esetén az anyag bizonyosan nem fog eltörni. Ha ilyen kifáradási határa nincs az anyagnak, úgy a *kifáradási szilárdság* jellemzi, amelyen egy elvárt terhelési ciklusszámot képes törés nélkül elviselni. Ha ennél kisebb üzemidővel is megelégszünk, akkor növelhető a megengedett ciklikus terhelés, amelyhez meghatározható a *kifáradási élettartam*.

3.3.9. A kúszással szembeni ellenállás

A kúszás olyan képlékeny alakváltozási folyamat, amelyet a folyáshatárnál kisebb – tehát elvileg csak rugalmas alakváltozást okozni képes –, tartósan ható feszültség idéz elő. Ezért a kúszást a szerkezeti anyagok károsodási folyamatai közé soroljuk. Ahhoz, hogy a kúszás fellépjen, jellemzően az olvadáspont (K) felénél nagyobb hőmérséklet szükséges. A *kúszáshatár* fontos mechanikai tulajdonsága az anyagnak; megmutatja, hogy legfeljebb mekkora feszültséggel terhelhető egy adott hőmérsékleten ahhoz, hogy a maradó alakváltozás ne haladja meg a megszabott határalakváltozást – 0,5% vagy 1% – egy bizonyos idő (10, 100 vagy 200 ezer óra) alatt. A *kúszási szilárdság* a töréskor mért feszültség. Egy nikkelötvözet kúszási jellemzőit szemlélteti az 3-13. ábra.



3-13. ábra – Nikkelötvözet (N06600) kúszási jellemzői

3.4. A szilárdságnövelés mechanizmusai

A szilárdságot az előző szakaszok szerint többféle mechanikai tulajdonság is jól jellemzi, de azt kell megállapítanunk, hogy elsősorban a folyáshatárt szokták figyelembe venni, ugyanis a gépek, berendezések, alkatrészek tervezésénél a leggyakoribb méretezési paraméter a folyáshatár. Ebből a szempontból vizsgálva a szilárdságnövelést, azt úgy tekinthetjük mint tudatos beavatkozást egy anyag folyáshatárának növelésére.

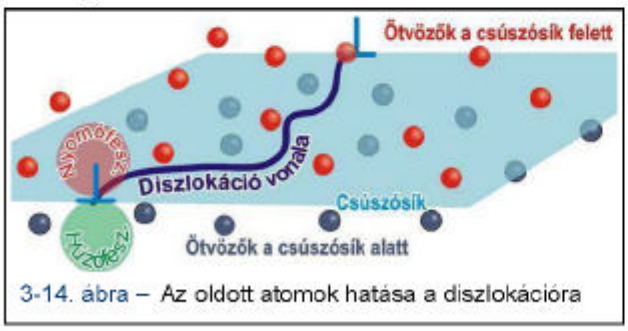
3.4.1. A Peierls-feszültség

Az anyagok folyáshatára a makroskálán nem más, mint a rugalmas és a képlékeny alakváltozás közötti határfeszültség. A képlékeny alakváltozásról már megállapítottuk, hogy – csak mechanikai feszültségeket engedve meg – arról attól a pillanattól kezdve beszélhetünk, amikor a diszlokációk a kristályrács csúszósíkjain mozogni kezdenek, a külső terhelésnek a csúszósíkban ható csúsztatófeszültségi komponense hatására. Ez a feszültség az ún. Peierls-feszültség; a fémek között a TKK fémeké általában nagy, míg az LKK és a hexagonális kristályrácsúaké kicsi. A folyáshatár pedig a krisztallitok szintjén az a feszültség, amely képes a diszlokációk mozgását fenntartani.

A szilárdságnövelés alapmechanizmusai közé mindezek után azokat a mikroskálán érvényesülő folyamatokat soroljuk, amelyek végeredménye az, hogy a diszlokációk mozgásának fenntartásához szükséges feszültség általuk növekedik.

3.4.2. A szilárdoldatos keményedés

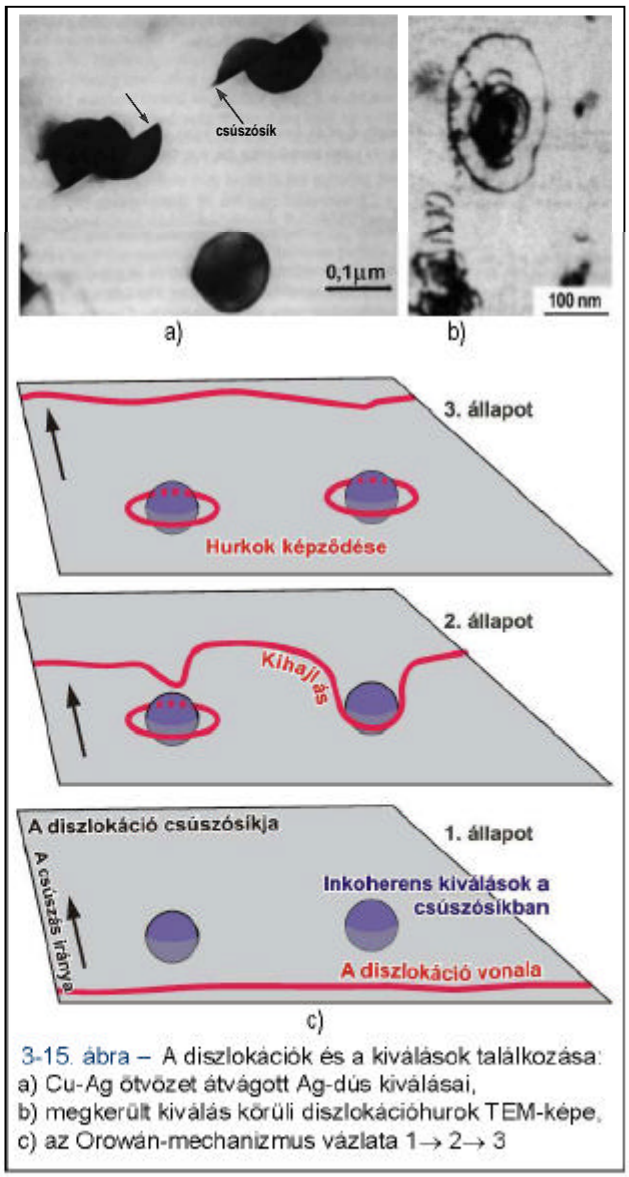
Ha a fém atomjai közé idegen atomok kerülnek (ötvözéssel vagy szennyezőként), azok rácstorzulást okoznak maguk körül. Ezek a feszültségterek nehezítik a diszlokációk mozgását, azokat kihajlásra, azaz meghosszabbodásra kényszerítik (3-14. ábra). A szilárdságnövelés szempontjából rendkívül hatásosak a kis atomátmérőjű atomok, melyek intersztíciósan oldódnak, pl. H, B, C, N, O. Az egyenletesen eloszló ötvözők az alapfémmel szilárd oldatot képeznek, innen ered a szilárdságnövelési mechanizmus elnevezése is.



3-14. ábra – Az oldott atomok hatása a diszlokációra

3.4.3. A kiválásos keményedés

A tapasztalatok alapján elmondható, hogy a kiválásos keményedés az egyik leghatékonyabb szilárdságnövelési mechanizmus, különösen az Al-ötvözetek esetében. A 2.3. szakaszban már bemutattuk, hogy a kiválások milyen határfelületet tudnak képezni a mátrixszal. Azt kell az ott leírtakhoz hozzátenni, hogy a diszlokációk mozgását a legnagyobb mértékben a kicsiny, de nagyszámú és egyenletes eloszlású, a mátrixszal koherens fázishatárt alkotó, ún. diszperz kiválások akadályozzák. A diszlokációk e koherens kiválásokon „átvágják" ugyan magukat (3-15.a ábra), de ez többletfeszültséget igényel, ami a makroskálán már összegeződve a folyáshatár növekedésében mutatkozik meg. A nagyobb, de kevesebb inkoherens kiválás a diszlokációk ugyan fennakadnak, viszont a diszlokációk képesek az akadályokat „megkerülni" az Orowán-mechanizmus révén (3-15.b–c ábra), így a szilárdság is kisebb lesz.



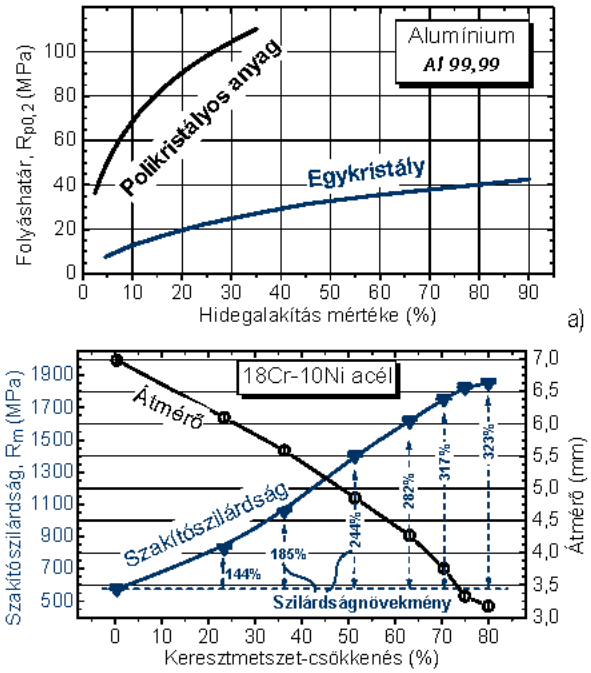
3-15. ábra – A diszlokációk és a kiválások találkozása:
a) Cu-Ag ötvözet átvágott Ag-dús kiválásai,
b) megkerült kiválás körüli diszlokációhurok TEM-képe,
c) az Orowán-mechanizmus vázlata 1→ 2→ 3

3.4.4. Az alakítási keményedés

A folyáshatár növelésének ugyancsak nagyon hatékony eszköze a képlékenyalakítás, mégpedig az ún. hidegalakítás, amelynél az alakítási hőmérséklet a kelvinben megadott olvadáspont fele alatti. A keményedést az okozza, vagyis a diszlokációmozgást az teszi nehezebbé, hogy megnő a diszlokációsűrűség, és gátolják egymást. Mint láttuk a vonalszerű kristályhibákat bemutató szakaszban, a diszlokációsűrűség a hidegalakítás hatására nagyságrendekkel növekedhet.

A hidegalakítás hatására tehát jelentősen megnő a fémek és ötvözetek szilárdsága, amint a 3-16.a ábra mutatja ezt a tiszta alumíniumra vonatkozóan. Az ausztenites acélok szilárdsága akár az eredeti, lágy állapotban mért értéknek a négyszeresére is növekedhet. A 3-16.b ábra azt illusztrálja, hogy a hét lépésben végzett huzalhúzás közben miként növekedik egy ausztenites rozsdamentes acél szakítószilárdsága.

A szilárdságnövekedés akkor kedvező, ha fel tudjuk használni a kisebb falvastagságú anyagot a szerkezet tömegének csökkentésére. Ámde kedvezőtlen is lehet, ha a felkeményedett anyagot további megmunkálással kell feldolgozni, pl. forgácsolni vagy továbbalakítani, ill. ha villamos vezetékanyagról van szó, amelynek az alakítással romlik a vezetőképessége. A hidegalakítás okozta keményedést az ún. *újrakristályosító hőkezeléssel* lehet megszüntetni.



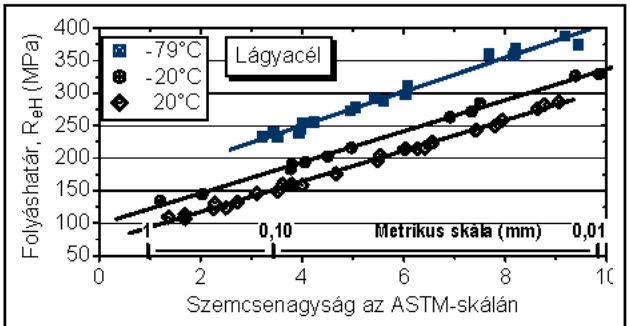
3-16. ábra – ábra – A képlékenyalakítás hatása a tiszta alumínium és az AISI 304 ausztenites acél huzal (lent) szilárdságára

3.4.5. A szemcsefinomítás

A külső terhelés hatására az egyes krisztallitokban megindul a diszlokációs csúszás, viszont a diszlokációk továbbhaladásának útját állják a krisztallithatárok. Könnyű belátni, hogy a szemcsehatárok diszlokációmozgást akadályozó hatása annál jelentősebb, minél nagyobb az összfelületük, vagyis minél kisebb szemcsékből épül fel az anyagnak ugyanaz a térfogata. A σ folyási feszültség és a d átlagos szemcseméret közti összefüggést a *Hall–Petch-egyenlet* írja le. Melyben a σ_0, a Peierls-feszültség, a k pedig konstans:

$$\sigma = \sigma_0 + k \cdot d^{-0,5}.$$

Ennek az összefüggésnek az alapvető jelentése tehát az, hogy a szemcsefinomítással – amelyet a gyártás folyamán az ötvözéssel és a meleghengerléssel, a későbbi feldolgozásnál pedig a szemcsefinomító hőkezelésekkel lehet elémi – hatékony eszköz áll rendelkezésre a fémes szerkezeti anyagok folyáshatárának, szilárdságának növelésére. Jól példázza ezt a 3-17. ábra is, amelyen ötvözetlen acél szakítóvizsgálatának eredményei mutatják: a szemcsefinomodás minden vizsgálati hőmérsékleten jelentős szilárdságnövekedést eredményezett. Azt is meg kell jegyezni, mivel az ábrából ez nem derül ki, hogy ez a szilárdságnövekedés a képlékenységi mutatók, pl. a nyúlás csökkenésével jár együtt.



3-17. ábra – A szemcseméret, a folyáshatár (és a vizsgálati hőmérséklet) összefüggése lágyacél lemezeknél

3.4.6. Szilárdságnövelés fázisátalakulással

A felhevített állapotból végzett gyors lehűtés, amelyet edzésnek nevezünk, néhány anyagnál alkalmas arra, hogy az edzett anyag szilárdsága lényegesen nagyobb legyen a lassú hűtéssel nyert állapothoz képest. Csak olyan ötvözetekben alkalmazható, amelyekben a lehűléskor allotrop átalakulás megy végbe, és ennek mind a diffúziós mind pedig a martenzites típusa lehetséges. Az edzést az acélok leghatásosabb szilárdságnövelési módszerének tekinthetjük.

3.5. A szerkezeti anyagok károsodása

A szerkezeti anyagok tönkremenetele az üzemelés közben őket érő környezeti hatások, terhelések következménye. A szerkezeti anyagok és az élő szervezetek károsodási folyamatai kapcsán olykor meglepő párhuzamokkal lehet találkozni: pl. a fémeknél is beszélünk öregedésről, amely az oldott gázoknak a diszlokációmozgást gátló hatására kialakuló ridegedését jelenti.

Az anyagok minden fajtájára nézve léteznek általános károsodási mechanizmusok, amelyeket belsőleg is tagolt, önálló tudományterületként tartunk számon. Ebben a szakaszban csak egy nagyon rövid pillantást vetünk a legfontosabb károsodástípusokra, amelyek a következők.

- Törés
  Állandónak tekinthető statikus vagy dinamikus mechanikai terhelés idézi elő. A tönkremenetel az anyag eltörésében vagy az üzemelést gátló repedés kialakulásában jelentkezik.
- Kifáradás
  Periodikusan ismétlődő mechanikai terhelés okozza. Amennyiben a hőmérséklet-ingadozás a fő terhelés (amely a hőtágulás miatt mechanikai terhelést is kivált), termikus fáradásról beszélünk. A károsodás az anyag eltörésében vagy az üzemelést gátló repedés kialakulásában jelentkezik.
- Kúszás
  Mechanikai terhelés, jellemzően húzás idézi elő, de a növelt, ill. nagy hőmérsékletnek meghatározó szerepe van a folyamatban. A tönkremenetel az anyag eltörésében vagy az üzemelést gátló alakváltozásként jelentkezik.
- Korrózió
  A szerkezeti anyaggal a felületén érintkező közeg, környezet kémiai vagy elektrokémiai hatása idézi elő, de a mechanikai terhelés is közrejátszhat a folyamatban. A károsodás felületi roncsolódás, kilyukadás, törés vagy repedés formájában jelentkezik.
- Kopás
  A felületre ható és relatív elmozdulást okozó szilárd vagy folyadék közeg mechanikai hatása. A kopás a felület fokozatos fogyásával jár.

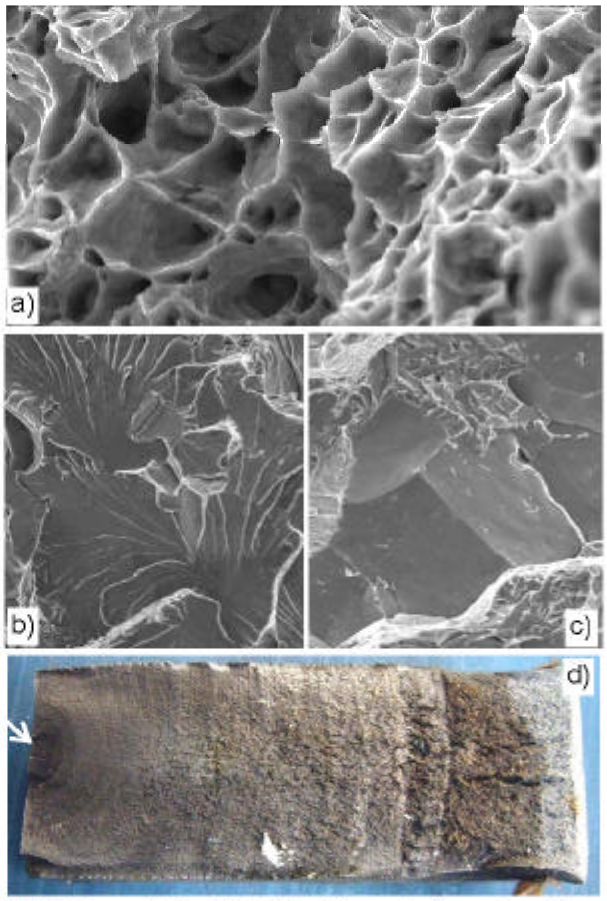
A fenti károsodások csak a legalapvetőbb tönkremeneteli típusok, amelyeken kívül, de gyakran hozzájuk társulva számos egyéb leromlási folyamattal kell számolni. Nagyon gyakoriak a szövetszerkezet termikus károsodási folyamatai: szemcsedurvulás, dekarbonizálódás, grafitosodás. Különleges károsodásokat okoz a neutronsugárzás: pl. keményedést, duzzadást.

3.6. A törés fő típusai

– **Törés folyamatos repedésterjedéssel.**
- Szívós törés: létrehozása nagy energiát igényel, a töretfelület a 3-18.a ábrán látható.
- Ridegtörés: létrejötte nagyon kis energiát igényel, a töretfelület a 3-18.b–c. ábrán látható.
- Vegyes jellegű törés: a szívós és a ridegtörés közötti átmenet jellemzi.

– **Törés fokozatos repedésterjedéssel**
- Ismétlődő terhelés hatására: fáradásos törés; 3-18.d. ábra (idetartozik a korróziós kifáradás is, amelyet ismétlődő mechanikai terhelés és korróziós hatás együttesen okoz).
- Statikus terhelés hatására: kúszási törés (idetartozik a korróziós kúszás is), feszültségkorróziós törés (húzófeszültség + korrózió).

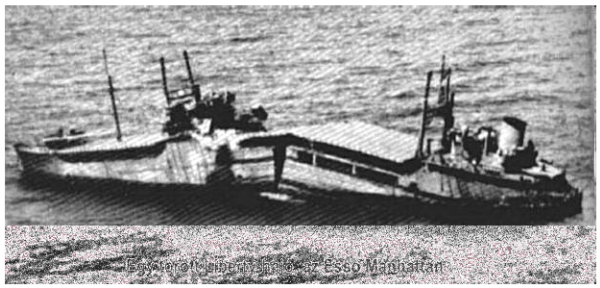
– **A törés a repedésterjedési útja szerint lehet:**
- transzkrisztallin vagy „hasadásos” (a szemcséken átmenő, 3-18.b ábra) vagy
- interkrisztallin (szemcsehatármenti, 3-18.c).



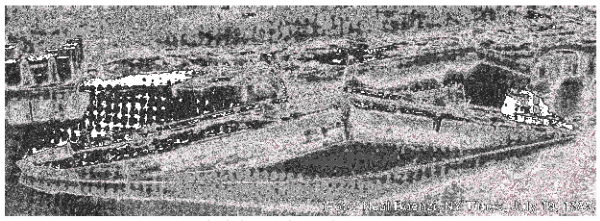
3-18. ábra – A töretfelületek jellegzetes tipusai: szívós törés (a), hasadásos ridegtörés (b), interkrisztallin törés (c), fáradásos törés (d); ez utóbbin a repedésképződés helyét nyil jelöli

Az acélszerkezetek rohamos mértékű elterjedése az 1900-as évek elejétől datálható, és a törés, különösen a ridegtörés ezzel együtt vált az acélszerkezetek károsodásai között az egyik „legfélelmetesebb” veszéllyé. Gyakorlatilag nincs előre észlelhető fázisa, hanem váratlanul következik be. A törés jelenségére koncentráló anyagtudományi szakma, a törésmechanika jó néhány híres ridegtörési esetet tart számon, amelyek megoldása jelentős előrehaladást jelentett. Néhány ilyen híres ridegtörési esetet mutatnak a 3-19. ábra képei.

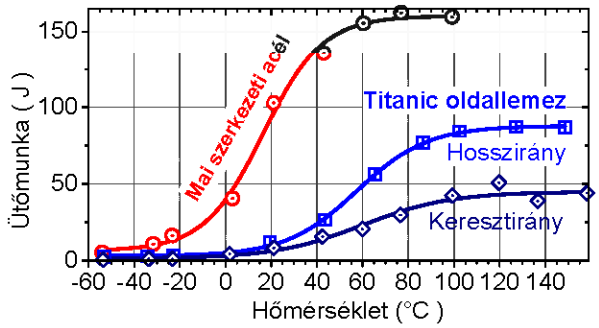
Egy törött Liberty-hajó, az S.S. Schenectady, 1943., január 16.



Az 1941-től 1945-ig 2710 példányban gyártott, 9000 tonnás Liberty-hajók közül 400 hajó törött jelentős mértékben. Hegesztéssel gyártották, némelyik 4 nap 15 ó 29 p alatt készült



Olajszállító hajó törése 1989-ben



A Titanic egy 1986-ban felszínre hozott oldallemezén végzett ütővizsgálat eredménye (*Felkins*: Journal of Materials, 1998)

3-19. ábra – Híres ridegtörési esetek a hajózásból

3.7. Anyagvizsgálati eljárások

Az anyagvizsgálat alapvető célja az, hogy a gyártmányok felhasználói igényeknek való megfelelését ellenőrizze. Az igények igen sokrétűek, és gyakorlatilag minden olyan termékkel kapcsolatban felmerülnek, amely az emberek mindennapi életéhez hozzátartozik. A szerkezeti anyagokra, ill. a belőlük készített termékekre leszűkített területen is sok százra rúg az anyagtulajdonságok vizsgálatát meghatározó szabványok száma.

– **A mechanikai tulajdonságok vizsgálata**

A mechanikai tulajdonságokat áttekintő fejezetben megismertük azok anyagvizsgálati módszereit; itt csak felsorolunk néhány szabványosat.

- Szakítóvizsgálat; MSZ EN ISO 6892-1:2010, MSZ EN ISO 527-1:2012.
- Hajlítóvizsgálat; MSZ EN ISO 7438:2006, MSZ EN 2746:1999.
- Nyomóvizsgálat; MSZ EN 12290:2005, MSZ EN ISO 604:2003.
- Keménységmérés; MSZ EN ISO 6507-1:2006, MSZ EN 843-4:2005.
- Ütővizsgálat: MSZ EN ISO 148-1:2011, MSZ EN ISO 179-1:2010.
- Törésmechanikai vizsgálatok: MSZ EN ISO 12737:2011, MSZ EN ISO 15653:2010.
- Fárasztóvizsgálat: MSZ EN 6072:2010, MSZ EN ISO 11782-1:2008.
- Kúszásvizsgálat: MSZ EN ISO 204:2009, MSZ EN 2002-005:2008

– **Mikroszerkezetvizsgálati módszerek**

- Optikai mikroszkópos vizsgálat a szövetszerkezet megismerésére.
- Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat: töretfelületek vizsgálata és az anyagot alkotó kémiai elemek meghatározása.
- Transzmissziós elektronmikroszkópos vizsgálat a nanoszerkezet tanulmányozására.
- Röntgendiffrakciós vizsgálatok az anyagot alkotó fázisok azonosítása.

– **Roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerek**

E módszerek célja az üzemelő szerkezetek állapotellenőrzése, azok roncsolása nélkül, alapvetően a törés veszélyével fenyegető anyaghibák kimutatására; néhány fontosabb közülük:

- vizuális vizsgálat,
- röntgensugaras átvilágításos vizsgálat,
- ultrahangos vizsgálat,
- akusztikus emissziós vizsgálat,
- örvényáramos vizsgálat,
- mágneses hibakereső vizsgálat.

4. fejezet
Az alapvető gyártási eljárások

Öntött hajócsavar és horgony a helsinki Ravintola Nokka étterem homlokzatán

4. Az alapvető gyártási eljárások

Az ipar a jelenkori gazdaság meghatározó szektora. Csak az ipar és a mezőgazdaság – vagyis a termelés – állít elő közvetlenül, kézzel fogható, valódi terméket; minden más gazdaságilag is hasznosuló szolgáltatási tevékenység a termeléshez kötve vagy a kultúra gazdagításával hoz létre értéket. A termelés azokat a termékeket állítja elő, amelyek a legkülönfélébb emberi tevékenységek gyakorlásához szükségesek.

Az egy teljesen más – de igen fontos – kérdés, hogy szükség van-e egy sor, ma mindennapos és természetesnek tekintett tevékenység gyakorlására, amelyhez a termelés ugyanúgy biztosítja a szükséges termékeket, mint a létszükségleti cikkeket. Különösen annak fényében mérlegelendő e kérdés, hogy egyre nyilvánvalóbb: a jelenkori globális fogyasztási rendszer önpusztító az egész civilizációra. A választ lehet halogatni ideig-óráig, de hamar eljön az az idő, amikor szembesülünk mind a közös, mind az egyéni felelősséggel.

Az ipari termelés sokrétű rendszerét nem illendő túlságosan leegyszerűsíteni, de mivel ez egy tananyagközpontú könyv, mégis ezt kell tennünk. Csak arra szorítkozunk, hogy a továbbiakban bemutatandó szerkezeti anyagoknak a felhasználását nagyban befolyásoló gyártási eljárások rendszerét megismerjük, és néhányat a gyártási eljárások osztályai közül röviden áttekintsünk. A gyártási eljárások lényegi jellemzőik szerint családokba (3) és osztályokba sorolhatók:

– **Alakadási eljárások családja**

Elsődleges alakadási eljárások:
- öntési eljárások osztálya,
- fröccsöntési eljárások osztálya,
- porformázási eljárások osztálya,
- képlékenyalakítási eljárások osztálya,
- kompozit-előállítási eljárások osztálya,
- különleges eljárások (pl. prototípusgyártás).

Másodlagos, alakmódosító eljárások:
- forgácsolási eljárások osztálya.

– **Kötési eljárások családja**
- kötőelemes kötési eljárások osztálya,
- ragasztási eljárások osztálya,
- forrasztási eljárások osztálya,
- hegesztési eljárások osztálya.

– **Tulajdonságmódosító utólagos kezelési eljárások családja**
- hőkezelési eljárások osztálya,
- mechanikai felületkezelések (pl. polírozás),
- festési eljárások osztálya,
- elektrokémiai felületkezelések (galvanizálás).

4.1. Öntési eljárások

Az öntési eljárások alapelve az, hogy a gyártandó alkatrész alakjával megegyező *minta* (lehet fém, fa, viasz stb.) alapján elkészítenek egy *öntőformát*, és ezt a formát kitöltik az előre *teljesen megolvasztott* anyaggal, amely a formában szilárdul meg. Az öntéssel feldolgozott anyagnak az olvadék (ömledék) fázisba hozása tetszőleges módon végezhető, az öntési folyamattól gyakorlatilag függetlenül. A minta olykor hiányozhat, de a forma sohasem. Az öntési eljárásokat leggyakrabban a formakitöltés módja és az öntőforma anyaga (formázás) alapján csoportosítjuk:

– **A formakitöltés módja szerint**
- folyamatos öntés,
- gravitációs öntés (fejezetcímlap, 4-1–2. ábra),
- nyomásos öntés,
- kiszorításos öntés, présöntés, sajtolóöntés,
- félszilárd öntések: tixotrop állapotú anyag tixoöntése hevítéssel vagy reoöntése hűtéssel,
- vákuumos öntés,
- pörgetéses öntés.

– **Formázás osztott formákkal**
- homokforma: homok + kötőanyag,
- héjforma: a formázóanyag mennyisége jelentősen csökken,
- fémforma (kokilla), többször felhasználható,
- kerámiaforma.

– **Formázás osztatlan formával**
- pörgetéses (centrifugál- vagy rotációs) öntés,
- precíziós öntés vagy viaszveszejtéses öntés; lépéseit a 4-3. és a 4-4. ábra vázolja,
- különleges formák (pl. rugalmas anyagból).

A magyar szakmai nyelvben a *vasöntészet* a vas- és az acélöntvények gyártását, a *fémöntészet* pedig a nemvasfémek öntési technológiáit jelöli. A polimereknek a fentebbi öntésdefiníció szerinti öntése ritka az iparban, de pl. a gyertyaöntés vagy a pudingkészítés klasszikus gravitációs öntés! A nagy átmérőjű csövek gyártására szolgáló rotációs (pörgetéses) öntés viszont nem öntés ebben az értelemben, hiszen nem előre megolvasztott anyag kerül a forgatható szerszámba, hanem granulátum, amely ott ömlik meg. Ugyanakkor a kalanderezés – fűtött hengerek között vékonyítják az előzetesen megömlesztett anyagot – öntési eljárásnak tekinthető. Közeli rokona ennek az alumíniumszalagok hengerléses folyamatos öntése és a nem kör keresztmetszetű alumíniumhuzalok gyártására szolgáló Properzi-eljárás. Az üvegek (amorf kerámiák) öntése az üvegiparban régóta és gyakran alkalmazott alakadási eljárás.

4-1. ábra – Márai Sándor szobra Kassán; gravitációs öntéssel készült (*Gáspár Péter* alkotása)

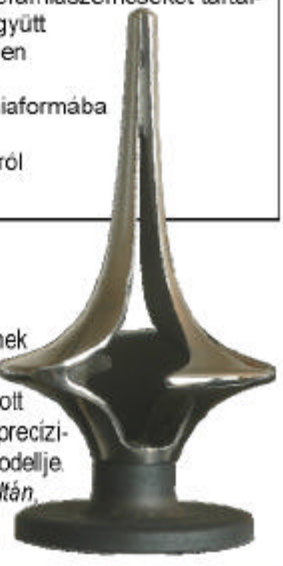
4-2. ábra – Sárgaréz palackszelep (gravitációs öntés)

A folyamatos öntés csak nagytömegű, nagysorozatú és további feldolgozásra kerülő gyártmányok – hengerlési bugák, brammák és sajtolási tuskók – előállítására szolgál az olvadék állapotban való gyártási folyamatuk utolsó művelete, a megszilárdítás műveleteként.

A gravitációs öntésnél az olvadt anyag a felső részén nyitott formát csak a gravitáció hatására tölti ki, minden egyéb rásegítés nélkül.

4-3. ábra – Precíziós öntés nyersöntvénye és formája

4-4. ábra – A precíziós öntés lépései:
1. Viaszminta sajtolása a fémformában
2. Viaszminták bokrosítása
3. Többszöri bemártás finom kerámiaszemcséket tartalmazó emulzióba, szárítással együtt
4. Viasz kiolvasztása forró vízben
5. A kerámiaforma kiégetése
6. Fémolvadék öntése a kerámiaformába
7. A kerámiahéj széttörése
8. A darabok levágása a bokorról
9. Készre munkálás



A Bolyai János születésének 200. évfordulóján (2002), Marosvásárhelyen felavatott Pszeudoszféra-emlékmű precíziós öntéssel készült díszmodellje. Készítette: *Kolozsváry Zoltán*, Plasmaterm, 2008.

4.2. Fröccsöntési eljárások

Eme eljárásokban az a közös, hogy az anyagnak alakot adó zárt szerszámba dugattyúval való beinjektálást megelőzi az előzetesen beadagolt *szilárd anyag* folyóképes állapotba hozása. Műanyagoknál ez megömlesztést jelent, a fémek és a kerámiák esetében a poraikat folyadékban szuszpendáltatva válnak jól formázhatóvá.

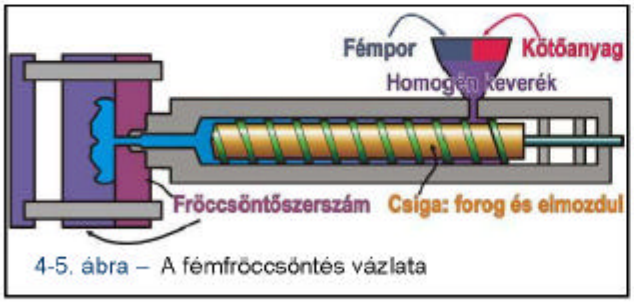
– A műanyagok fröccsöntési eljárásai

A polimer ömledéket zárt szerszámba juttató műveletek közé számos műanyag-feldolgozási eljárás tartozik, pl. a fröccsöntés, az extruziós és a fröccsfúvás vagy a rotációs öntés. Azonban ennek a fontos témakörnek az ismeretanyaga nem része e könyvnek, mivel mindezt külön és kitűnően részletezik *Czvikovszky Tibor* és *Bárány Tamás* tankönyvei és műegyetemi előadásai.

– Fémfröccsöntés

A fémfröccsöntés bonyolult, nagypontosságú és kisméretű fémalkatrészek gyártására szolgál. Főként olyankor kerül előtérbe ez a gyártási mód, ha a gyártmány anyaga különleges anyag, pl. gyógyászati implantátum, Co- vagy Ti-ötvözet. A fémfröccsöntés kivitelezése azonos a műanyagok fröccsöntésével (de a szerszámok anyaga eltérő): egy forgó- és egyenes vonalú mozgást végző szerszám, a csiga lövi be a *zárt szerszámba* az anyagot, mely jelen esetben fémpor és kötőanyag keveréke (4-5. ábra). Az alakadás után ki kell oldani, olvasztani, párologtatni a kötőanyagot, majd a nyersdarabokat vákuumkemencében, az olvadáspont közeli hőmérsékleten zsugorítják. A zsugorodás mértéke akár 20–25% is lehet.

A fémfröccsöntés ötvözi a műanyagfröccsöntés és a porkohászati gyártás előnyeit: bonyolult alkatrészek hozhatók létre nagy sorozatban, amelyek finomszemcsések maradnak. Így szívósságuk és szilárdságuk meghaladja a precíziós öntéssel készült gyártmányokét (4-5. ábra).

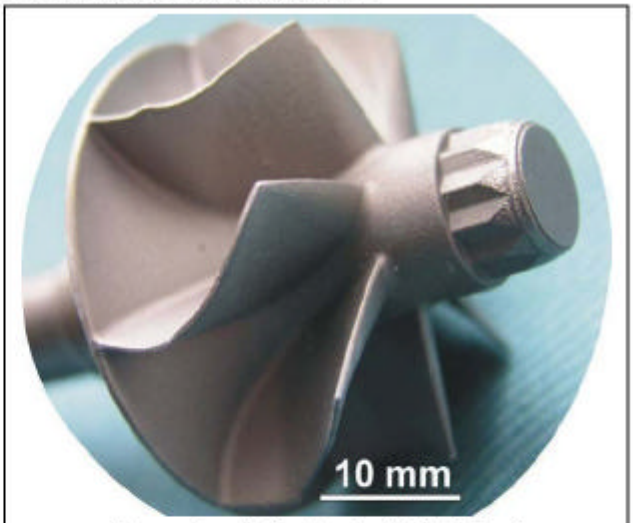


4-5. ábra – A fémfröccsöntés vázlata

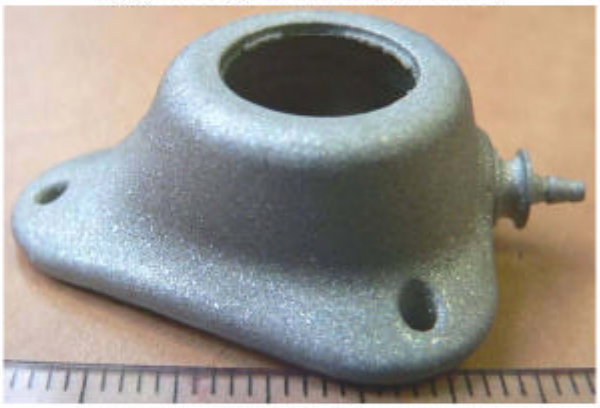
– Kerámiafröccsöntés

Nagyon finom kerámiaport és kötőanyagot (amelynek anyaga hőre lágyuló műanyag) kevernek össze, majd az erősen kopásálló szerszámmal felszerelt, nagynyomású fröccsöntőgéppel, a műanyag- és a fémfröccsöntéshez hasonlóan készül el a munkadarab. Az alakadás után itt is szükség van a zsugorodással járó kiégetésre (4-6. ábra).

A fémfröccsöntést és a kerámiafröccsöntést együtt porfröccsöntésnek nevezik. A porokon alapuló gyártási technológiák egészét régóta nevezik porkohászatnak, ami nem igazán szerencsés; a kohászat mindenkor a folyékony fém kezelésén alapult, ilyen viszont a porfröccsöntési és a porformázási eljárásokban egyáltalán nincs jelen a gyártási folyamat során.



Nagypontosságú turbinakerék (Ni-ötvözet)



Szívbillentyűkeret (Ti-ötvözet)

Alkatrész a fémfröccsöntés három gyártási fázisában; a szinterelt készdarabon jól látható a zsugorodás mértéke

4-6. ábra – Porfröccsöntéssel készített gyártmányok

4.3. Porformázási eljárások

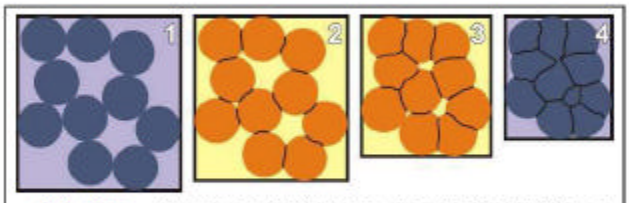
A porformázási eljárások lényege, hogy a gyártmányt az alapanyag megolvasztása nélkül, annak finomszemcsés porából formázzák, majd a kiégetési fázisban stabilizálják.

A porfröccsöntési eljárások abban térnek el a hagyományos porformázási eljárásoktól, hogy ez utóbbiaknál az előzetesen kiadagolt port, keveréket egy nyitott szerszámba helyezik, majd a szerszám zárásával veszi fel alakját a gyártmány a préselés, sajtolás vagy kovácsolás műveletében.

A porformázási eljárások osztályából a következő gyártási eljárásokat említjük meg:

- szinterelés,
- izostatikus melegsajtolás (rövid jele: HIP),
- izostatikus hidegsajtolás (CIP),
- öntőpépes öntés (csak a nevében öntés).

A szinterelés az előkészített por vagy porkeverék présformába helyezése, sajtolása és ezt követő kiégetése lépésekből tevődik össze. Szűkebb értelemben csak ezt a kiégetési fázist nevezik szinterelésnek, amikor a felhevített nyersdarabban az érintkező porszemcsék között a diffúzió révén kohéziós kapcsolat alakul ki. A kiégetés közben jelentősen csökken a nyersdarabok porozitása és mérete, hiszen a pórusok eltűnésével a gyártmány zsugorodik; ezt szemlélteti a 4-7. ábra. A szinterelés tágabb értelemben nem csak a kiégetést jelenti, hanem az alaknak sajtolással való előzetes létrehozását is.



4-7. ábra – A szinterelés közben, nagy hőmérsékleten végbemenő mikroszerkezetváltozás:
1) összeérő porszemcsék a nagyporozitású, sajtolással előállított nyersdarabban,
2–3) az izzítás hatására beindul a diffúzió és a porszemcsék összenövése, csökken a porozitás, a nyersdarab fokozatosan zsugorodik, akár 20–25%-kal,
4) kialakul a kisporozitású, szinterelt termék

Az izostatikus melegsajtolás (HIP) elsősorban a porozitásmentes kerámiatermékek gyártására szolgál. A 100–300 MPa nyomást 1000–2000°C hőmérsékletű semleges gáz biztosítja, nem pedig valamilyen szerszám, ennek nyomán izostatikus a nyomás, azaz állandó értékű a test felületének minden pontjában. Az izostatikus hidegsajtolás szobahőmérsékleten végezhető, a nyomásszükséglet viszont lényegesen nagyobb: 250–700 MPa. Mindként eljárás meglehetősen drága.

4.4. Képlékenyalakítási eljárások

A képlékenyalakítás a szilárd fázisban lévő anyagnak a felületére ható erők hatására végbenő maradó alakváltozásán alapul. A képlékenyalakítás lényege tehát az, hogy az anyag eredeti alakja külső erő hatására véglegesen megváltozik. Ehhez az szükséges, hogy az alakítás kezdetén és közben ható erő a pillanatnyi folyáshatárt (folyási feszültséget) meghaladó feszültséget ébresszen az anyagban.

A képlékeny alakváltozást az alakítógépekben rögzített alakítószerszámok kényszerítik rá a munkadarabra. A szerszámok többnyire egyenes vonalú vagy forgómozgást végeznek. Ha csak egyetlen szerszám mozog, akkor a munkadarabot meg kell támasztani egy passzív szerszámmal (zömítés, szabadalakító kovácsolás). Ha a szerszám nem mozog, akkor a munkadarabot kell mozgatni (huzalhúzás, rúdhúzás, csőhúzás, sajtolás).

A megmunkálás hőmérséklete szerint megkülönböztetünk melegalakítást, félmeleg- és hidegalakítást; fémes anyagoknál a melegalakítási határ általában az anyag olvadáspontjának (K) fele, ezt *újrakristályosodási hőmérsékletnek* is nevezik.

A kerámiák és üvegek szinte mindegyike, és a fémek egy része csak az olvadásponthoz közeli hőmérsékleten alakítható. A hőre lágyuló műanyagok (különösen az amorfok) és a LKK kristályrácsú fémes anyagok kitűnően alakíthatók, ez utóbbiak hidegalakítással is.

A képlékenyalakítási eljárások száma igen nagy. Alkalmazási területüket tekintve jól elválnak egymástól az előgyártmányok gyártására és az ezekből készülő végtermékek gyártására alkalmazott képlékenyalakítási eljárások. A képlékenyalakítással gyártott főbb előgyártmányok:

- Lapostermékek: lemez (tábla és tekercs), szalag (széles, keskeny). Hengerléssel készülnek.
- Hosszú termékek: rúd, cső, huzal, profil, sín. A hengerlés mellett főleg kovácsolással, húzással és lyukasztással készülnek.

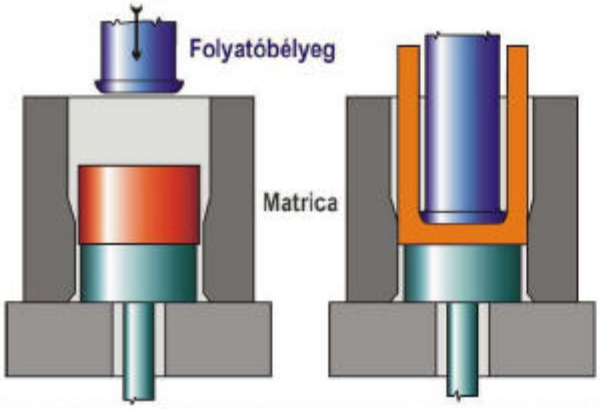
Az előgyártmányok feldolgozásán alapuló képlékenyalakítási eljárásokat – ezek főként gépészeti alkalmazások – be lehet sorolni két nagy csoportba aszerint, hogy a megmunkált anyag lemezszerű-e (tehát a vastagságához képest nagy kiterjedésű és sík felületű): a lemezalakítási és a térfogat-alakítási eljárások csoportjába. A fémes anyagok megmunkálására legelterjedtebben alkalmazott képlékenyalakítási eljárásokat csak felsoroljuk, és néhány, velük előállítható terméktípust ábrákon is szemléltetünk.

- **Térfogat-alakító eljárások**
  - szabadalakító kovácsolás: lapítás, nyújtás, tágítás, hasítás stb. (4-8. ábra),
  - zömítés, duzzasztás (4-9. ábra),
  - süllyesztékes kovácsolás (4-10. ábra),
  - folyatás, előrefolyatás, hátrafolyatás (4-11.),
  - kisajtolás, melegsajtolás, extrudálás (4-12.)
  - húzás: huzalhúzás (4-13. ábra), csőhúzás.
- **Lemezalakító eljárások**
  - hengerlés: lemez, profil, cső, fólia (4-14.),
  - mélyhúzás (4-15. ábra),
  - hajlítás, élhajlítás (4-16. ábra),
  - domborítás, fémnyomás, mángorlás (4-17.),
  - lyukasztás, kivágás, finomkivágás (4-18.),
  - robbantásos alakítás.

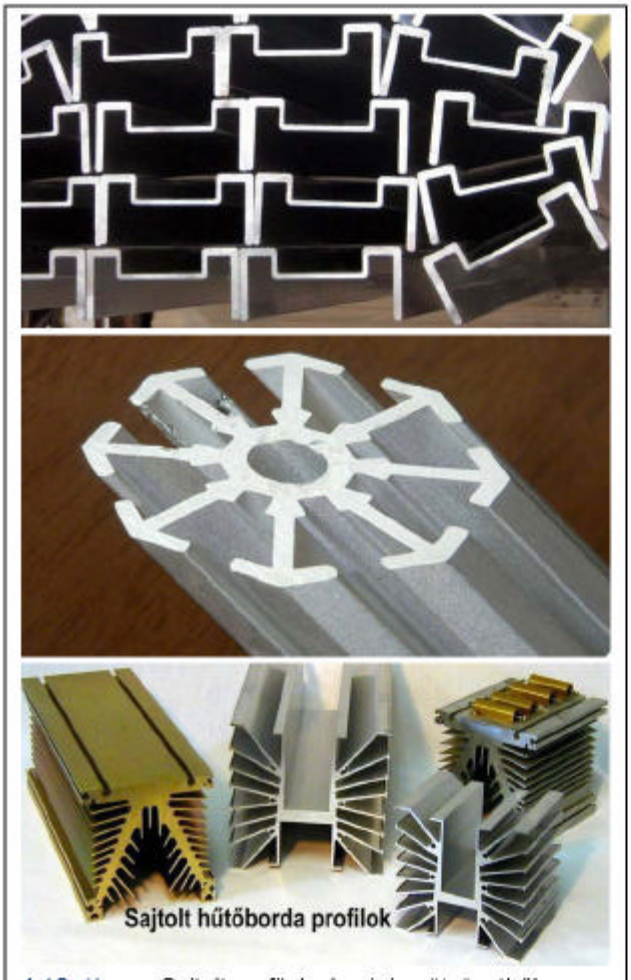
4-8. ábra – Szabadalakító kovácsolás (felső kép) és tengely előkovácsolása gépkalapácson (alsó kép)

4-9. ábra – A csavargyártás része a fejzömítés

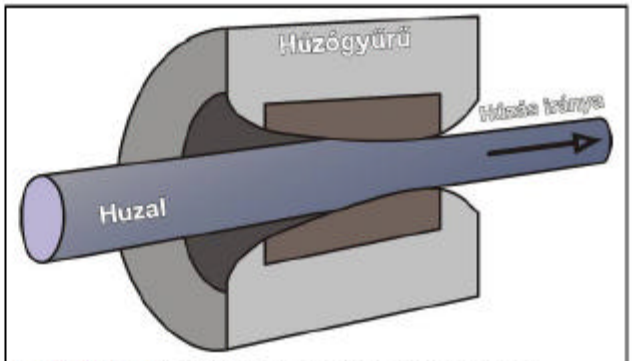
4-10. ábra – A süllyesztékes kovácsolás vázlata és kovácsolással készült gyártmányok



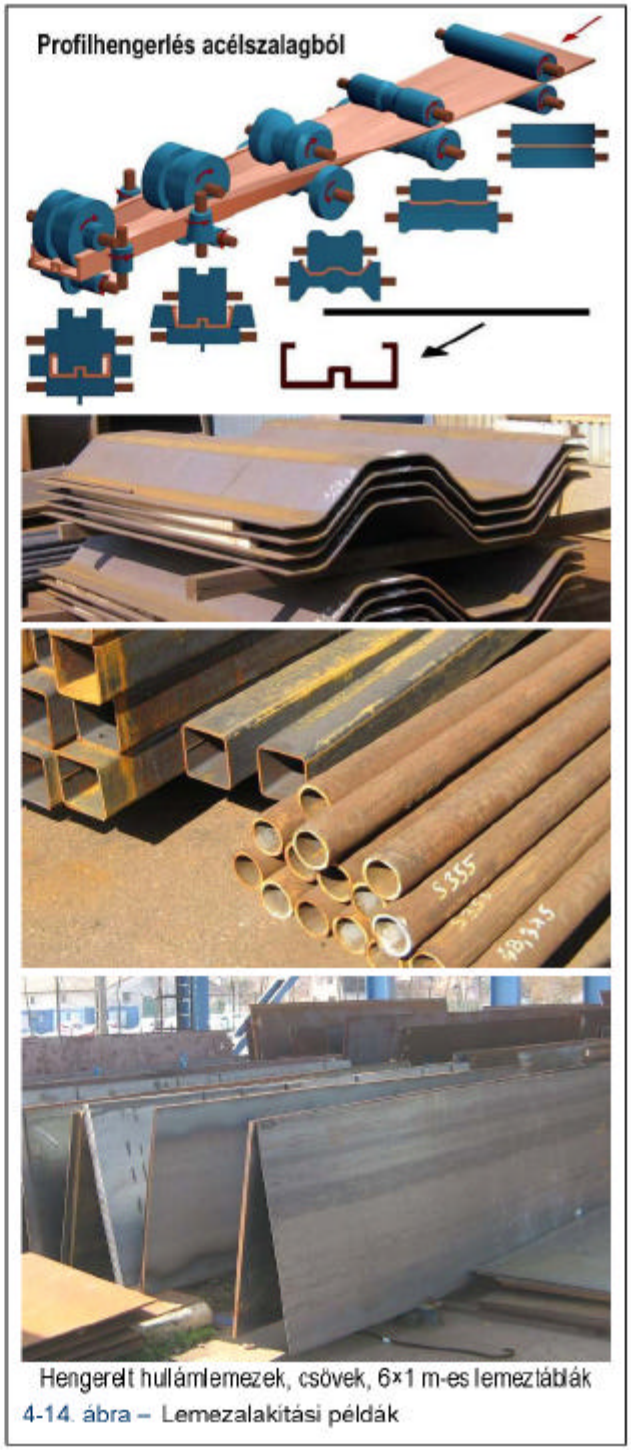
4-11. ábra – A hátrafolyatás vázlata, hátrafolyatott italos dobozok alumíniumötvözetből és mélyhúzott bögre



4-12. ábra – Sajtolt profilok alumíniumötvözetből

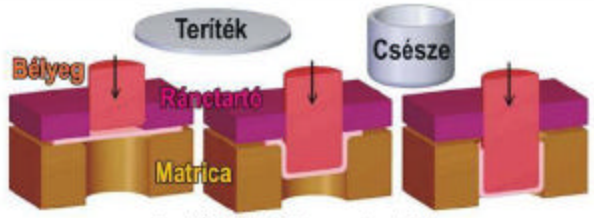


4-13. ábra – A dróthúzás szerszámának vázlata



Hengerelt hullámlemezek, csövek, 6×1 m-es lemeztáblák

4-14. ábra – Lemezalakítási példák



A mélyhúzási folyamat vázlata

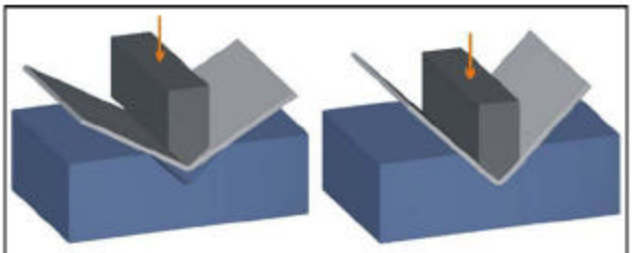
Alkatrész a még le nem vágott gallérral

Egy alkatrész a gyártás több állomásán

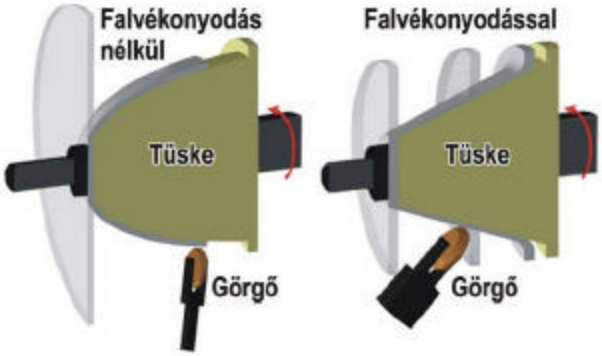
Pébégázpalack a gyártási fázisainak szemléltetése

Alumíniumötvözetből mélyhúzott konyhai edény

4-15. ábra – Mélyhúzott alkatrészek



4-16. ábra – Az élhajlítás vázlata



4-17. ábra – A fémnyomás vázlata és egy jellegzetes alkalmazási példája, a keréktárcsa

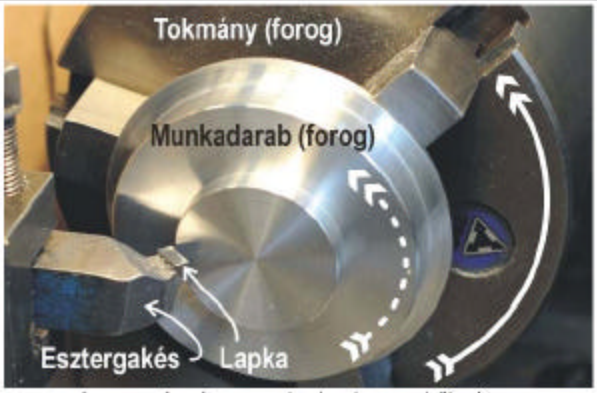
4-18. ábra – Acélszalag fogazása lyukasztással

4.5. Forgácsolási eljárások

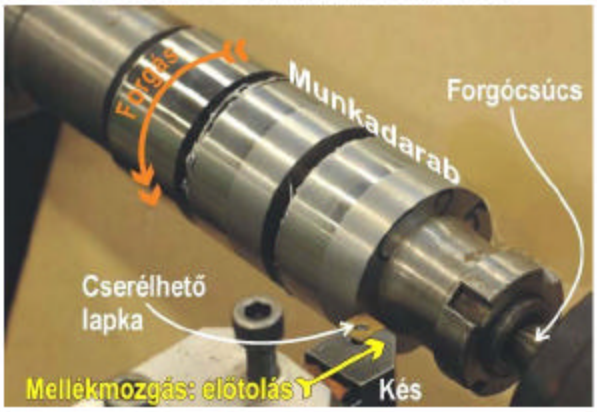
A forgácsolás rendkívül széles körben alkalmazott gyártási eljárás, amely az alkatrészek végleges alakjának és méreteinek nagypontosságú megmunkálását biztosítja. Lényege az, hogy a munkadarab és a forgácsolószerszám közötti relatív elmozdulás közben a szerszám kisméretű forgácsokat választ le mindaddig, amíg a végleges alakot és méretet el nem érjük. A forgácsleválasztást végző szerszám alakja lehet pontosan meghatározott, szabályos, mint pl. egy fúró, és lehet szabálytalan, csak a mikroskálán mérhető, mint pl. egy csiszolótárcsa kerámiaszemcséi.

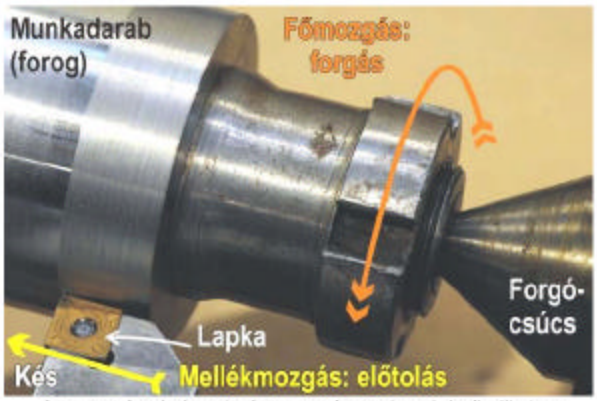
A forgácsolási eljárások osztályába tartozó fontosabb típusokat felsoroljuk. Megadjuk a szerszám és az adott forgácsolási eljárást végző szerszámgép megnevezését, valamint a szerszám–munkadarab rendszerben a főmozgás jellegét (csak az legegyszerűbb típusokra, az alapesetekre térünk ki).

- *Esztergályozás*: az eszterga a munkadarabot vízszintes tengely körül forgatja: ez a főmozgás, vagyis a forgácsleválasztást biztosító mozgás. Az előtolásból adódó mellékmozgást végző esztergakés vágóéle(i) választják le a forgácsot. Külső és belső hengeres felületek és a forgástengelyre merőleges síkfelületek munkálhatók meg; 4-19. ábra. Csavarmenetek is készíthetők esztergályozással. Az esztergakések anyagait a Szerszámanyagok című fejezet ismerteti.
- *Marás*: a marógép a marót annak hossztengelye körül forgatja, a munkadarab csak az előtolási mellékmozgásokat végzi; amelyet a 4-20. ábra szemléltet. Alapesetben a maróval síkfelületek készíthetők, de alakos szerszámmal (profilmaróval) és a munkadarab forgatásával akár bonyolult térbeli felületek is.
- *Fúrás*: a furatkészítés legelterjedtebb módja. A fúrás és a *dörzsölés* szerszámait a 4-21. ábra szemlélteti. A munkadarab áll. Forgácsolási főmozgásként a fúró forog és a forgástengelye mentén előremozog. A forgácsolást csak a fúró kúpos hegyén kialakított két vágóél végzi. A fúrót különféle fúrógépekbe, esztergába és marógépbe is be lehet fogni. A már kifúrt furatok méretpontosságának és felületi érdességének javítására szolgál a dörzsölés, amelynek szerszáma a csak a palláston futó élekkel dolgozó dörzsár.
- Gyalulás, hornyolás, horonyvésés; 4-22. ábra.
- Üregelés; 4-23. ábra.
- Fogazás; 4-23. és 4-24. ábra.
- Fűrészelés; 4-26. ábra.

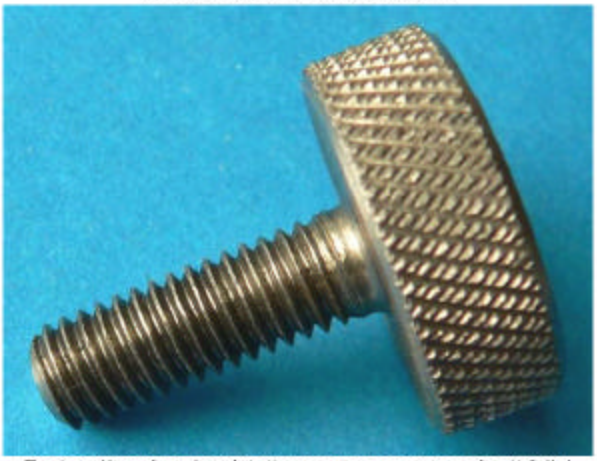


A szerszám és a munkadarab szemből nézve

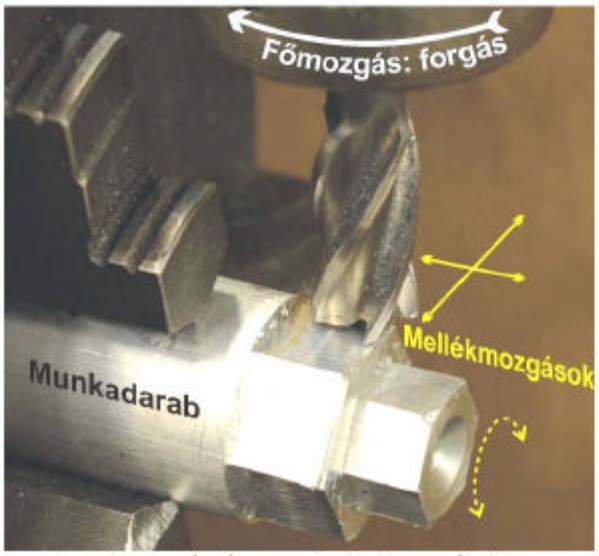




A szerszám helyzete és mozgása a homloksík, illetve a palást megmunkálása közben


Esztergályozással gyártott menetes csavar recézett fejjel

4-19. ábra – Az esztergályozás szemléltetése



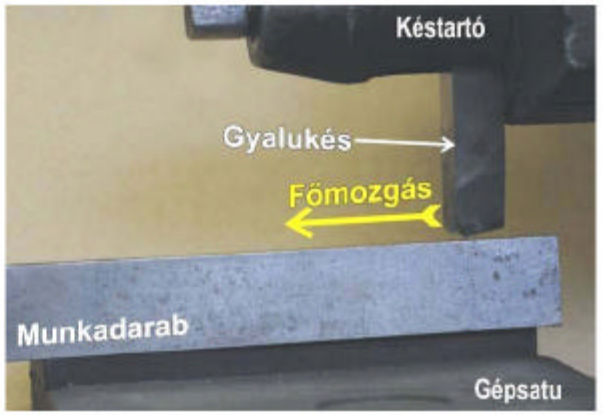
A szerszám és a munkadarab mozgásai

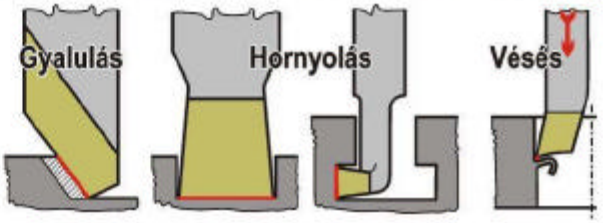
Különféle marók: ujjmarók, lapkás palástmaró, fűrésztárcsa

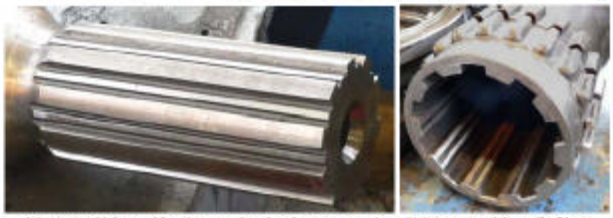
4-20. ábra – A marás szemléltetése

A harántgyalugépen a gyalukés vízszintes pályájú, egyenes vonalú mozgást végez, és csak síkfelületek megmunkálása lehetséges vele; ezt szemlélteti a 4-22. ábra. A gyalukés helyébe profilos hornyolókések foghatók, amelyekkel a munkadarab teljes hosszán átmenő hornyok készíthetők. Fogaskoszorúk furatába a tengelyen való elfordulás elleni rögzítésüket biztosító reteszhornyok horonyvésőgépen készülnek; a véső egyenes vonalú, függőleges irányú mozgást végez.

4-21. ábra – A fúrás és a dörzsölés szerszámai: a csigafúró és a dörzsár





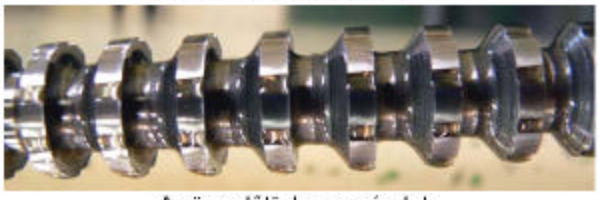


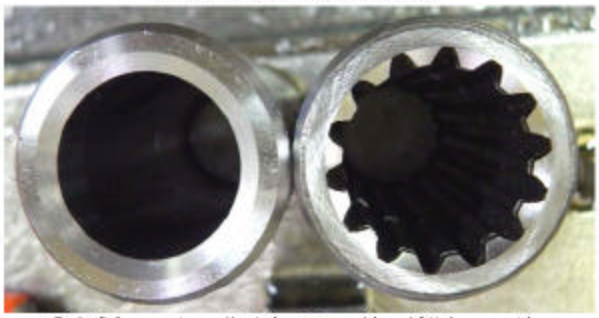
Hornyolt bordás tengely és horonyvésett kapcsológyűrűje.

4-22. ábra – A gyalulás és a vésés szemléltetése

A 4-22. ábrán látható kapcsológyűrű bordás furatának megmunkálása egyetlen lépésben is elvégezhető üregeléssel. Ilyenkor a készméretet fokozatosan megközelítő, egymás mögött elhelyezett fogakkal ellátott üregelőtüske (4-23. ábra) forgácsol.

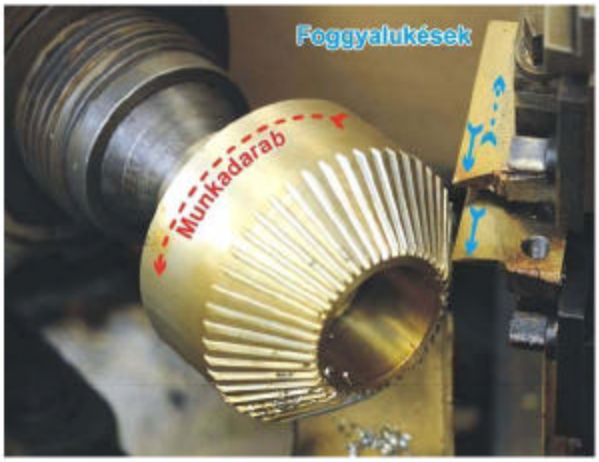
Az üregelőgép munkaasztala


Az üregelőtüske egy részlete

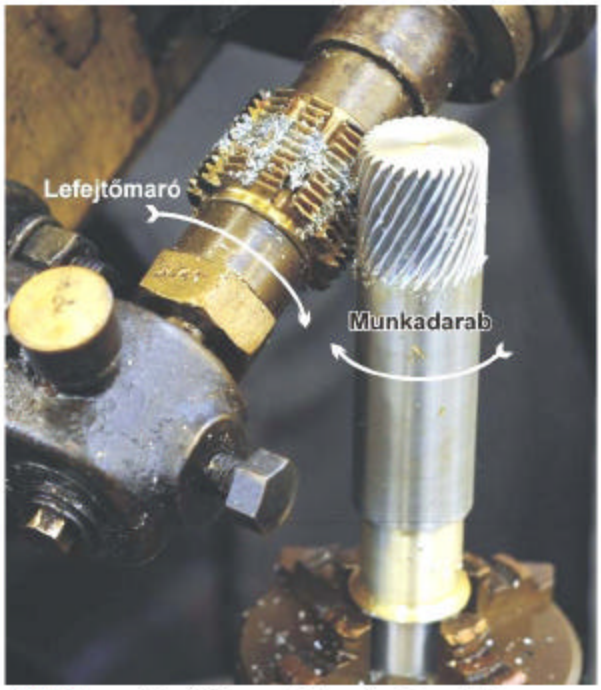

Belső fogazatos alkatrész üregelés előtt és az után

4-23. ábra – Az üregelés szemléltetése

A fogazás a fogaskerekek, fogazott tengelyek forgácsolási technológiáit összegzi, amelyek közül néhány példát mutatunk. A 4-24. ábrán látható fogvésés és a 4-25. ábrán látható lefejtőmarás mellett más forgácsolási eljárások is ismertek, de ezeket nem említjük.



4-24. ábra – Kúpfogaskerék gyártása foggyalulással



4-25. ábra – Ferde fogazatú tengelyvég gyártása lefejtőmaróval

A fűrészelés történhet egyenes vonalban oda-vissza mozgatott vonófűrésszel, forgómozgást végző körfűrésszel és két kerék által hajtott szalagfűrésszel (4-26. ábra).

4-26. ábra – Fémszalagfűrész vágószakasza munka közben (fent), illetve körfűrészlap (lent)

A hőkezelési és a felületkezelési eljárásokat a könyv ebben a fejezetben külön nem tárgyalja, ám az 5. fejezetben kellő részletességgel áttekintjük az acélok és az öntöttvasak alapvető hőkezeléseit. Más anyagosztályok bemutatásakor a fontosabb hőkezelési eljárásaikra is kitérünk.

4.6. Az anyagok közötti kötési eljárások

A gyártási folyamatokban az alkatrészek egymáshoz kötésére különféle kötési eljárásokat lehet alkalmazni. Ezek lehetnek állandó vagy ideiglenes, illetve oldható vagy oldhatatlan kötések. Az oldhatatlan kötéseket nem lehet szétszerelni az alkatrészek vagy a kötést biztosító anyagrész roncsolása nélkül; pl. egy szegecselt kötést csak a szegecs kifúrásával lehet oldani, egy forrasztott kötést pedig csak szétvágással lehet oldani.

A két alkatrész közötti kötést létrehozhatja: összeszorító erő, alakos test és végül kötőanyag; vagyis a kötés lehet erővel, alakkal vagy anyaggal záró, illetve ezek kombinációja.

Az oldható kötések közül a legismertebbek a csavar-, a csapos és a reteszkötések, de jól ismert pl. a szorítópántos kötés. Az oldhatatlan kötések között gyakran alkalmazzák a szegecselt, a ragasztott, a forrasztott és a hegesztett kötéseket. Mindezen kötéstípusok közül csak a forrasztott és a hegesztett kötések készítésére szolgáló legfontosabb technológiákat tekintjük át.

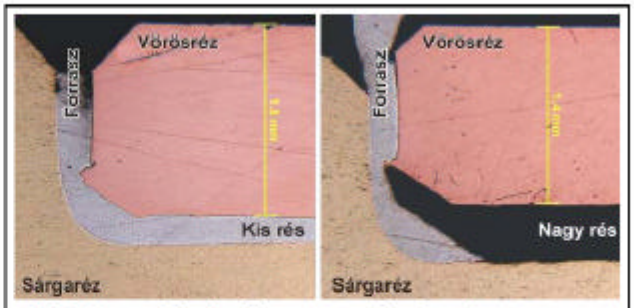
4.6.1. A forrasztás

A forrasztás olyan kötéslétesítő eljárás, amelyben a megolvadt forraszanyag nedvesíti és beteríti az összekötendő felületeket, majd a megszilárdulása után erős adhéziós kötést képez. Amikor a forraszanyag olvadáspontja nagyobb, mint 450°C, az eljárást *keményforrasztásnak* nevezzük, egyébként pedig *lágyforrasztásnak*. A forrasztás fő sajátosságai:

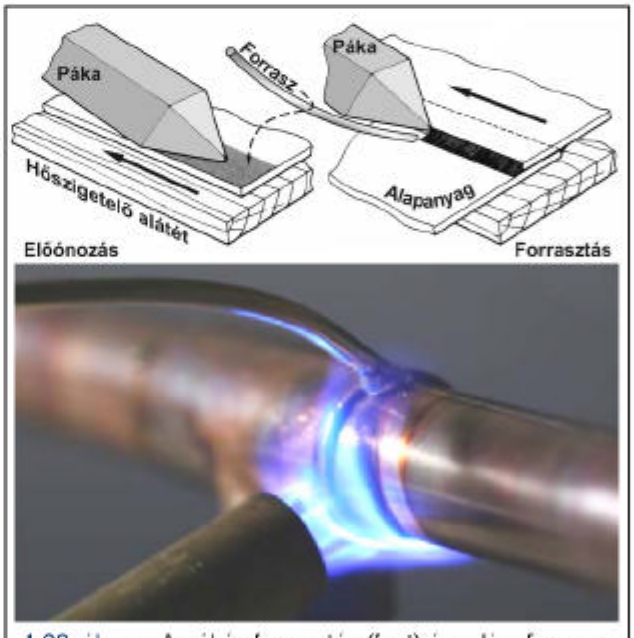
- A forraszanyag olvadáspontja – olvadási hőmérséklet-tartománya – kisebb, mint az összeforrasztandó anyagoké, legalább 50°C-kal.
- Bár nem olvad meg az alapanyag, diffúzió végbemegy benne; ezért a forraszanyag és az alapanyag között az oldódás kívánatos.
- A megolvadt forrasznak nedvesítenie kell az alapanyag felületét. Minél jobb a nedvesítés, annál jobban terül, folyik a forrasz.
- A forrasz a *kapilláris erő* hatására tölti ki a rést a forrasztandó felületek között. Az optimális résméret általában 0,01–0,1 mm (4-27. ábra).
- A felületi érdességnek van olyan optimuma, amely elősegíti a forrasz terülését és folyását.

A lágyforrasztás hagyományos forraszanyagai a Pb-Sn ötvözetek. Néhány éve viszont erősen gátolják alkalmazásukat a környezetvédelmi előírások, amelyek a Pb-tartalom miatt tiltólistás veszélyes anyagnak minősítették ezeket a forraszokat olyan alkalmazásokban, amelyek egészségi ártalmat okozhatnak. A lakások fűtési rendszerének szerelésére alkalmazható, de nem használható ivóvízvezetékek szerelésére. Bár az emberi fogyasztási körön kívül esik a háztartási gépek zöme, számítógépek, tévék, ezek mikroelektronikai paneljei is ma már ólommentes forrasszal készülnek. A gyártóknak egyszerűbb inkább mindent ólommentes forrasszal – Sn-Cu ötvözettel – készíteni, mint váltogatni a termékek jellege szerint.

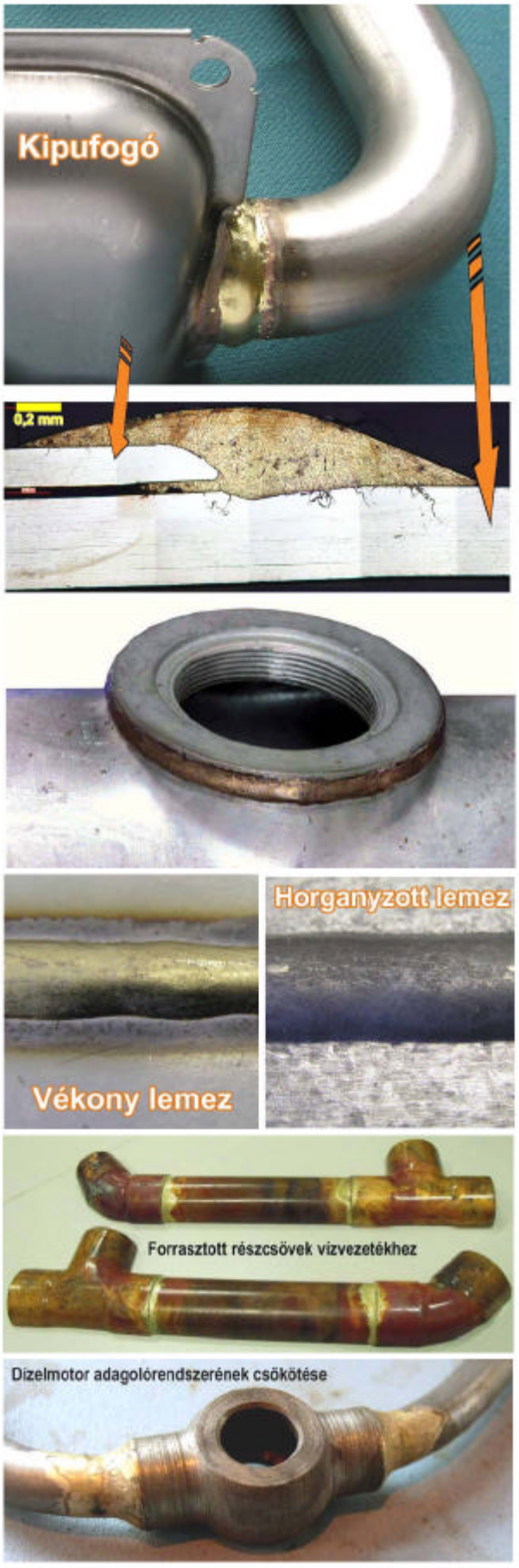
A forrasztás lényeges művelete a hevítés, amely a munkadarabok felmelegítésére és a forraszanyag megolvasztására szolgál. A 4-28. ábra a pákás lágyforrasztásra, valamint a lángforrasztásra mutat példát. A 4-29. ábra pedig keményforrasztott alkatrészeket mutat.



4-27. ábra – Keményforrasztott alkatrészek



4-28. ábra – A pákás forrasztás (fent) és a lángforrasztás (lent) vázlata



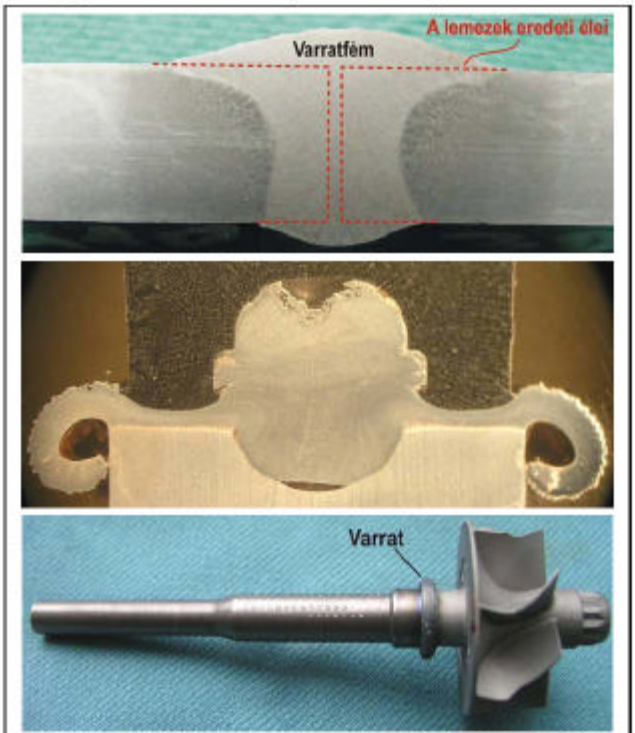
4-29. ábra – A keményforrasztás alkalmazási példái

4.6.2. A hegesztés

A *hegesztett kötés* két vagy több, munkadarab között létesített állandó, oldhatatlan és folytonos kohéziós kapcsolat. A hegesztés ekkor kötőhegesztés. Hegesztett kötésnek tekintendő a munkadarab felületén kohéziós kötéssel kapcsolódó felületi réteg is, amely felrakóhegesztéssel, javítóhegesztéssel, illetve felületátolvasztással jöhet létre. A hegesztett kötésben eltűnnek a munkadarabok felületének eredeti kontúrjai (4-30. ábra).

A *hegesztés* az arra alkalmas anyagok közötti hegesztett kötések létesítésére szolgáló kötési eljárás. Tágabb értelemben: „felépítő" jellegű alakadási eljárás az alkatrészek közötti hegesztett kötések létrehozásával. A hegesztés járhat az anyagok megolvasztásával (ekkor ömlesztőhegesztés) vagy a nélkül.

Az *ömlesztőhegesztés* erőhatás nélküli, hegesztőanyaggal vagy a nélkül végzett, helyi megömléssel járó hegesztési folyamat, amelynek során az alapanyag felületének meg kell olvadnia. A *sajtolóhegesztés* olyan hegesztési eljárás, amelynek során külső erőhatást alkalmaznak annak érdekében, hogy az érintkező felületen a képlékeny alakváltozás hatására kötés jöjjön létre, általában hegesztőanyag hozzáadása nélkül. Az illeszkedő felületeket hevíteni is lehet a kötéskialakítás megkönnyítése érdekében (4-30. ábra).



4-30. ábra – Ömlesztőhegesztéssel (fent) és sajtolóhegesztéssel (középen) készült varrat keresztmetszeti képe. Lent ez utóbbi példa gyártmánya: dörzshegesztéssel a turbótöltő tengelyéhez hegesztett turbinakerék

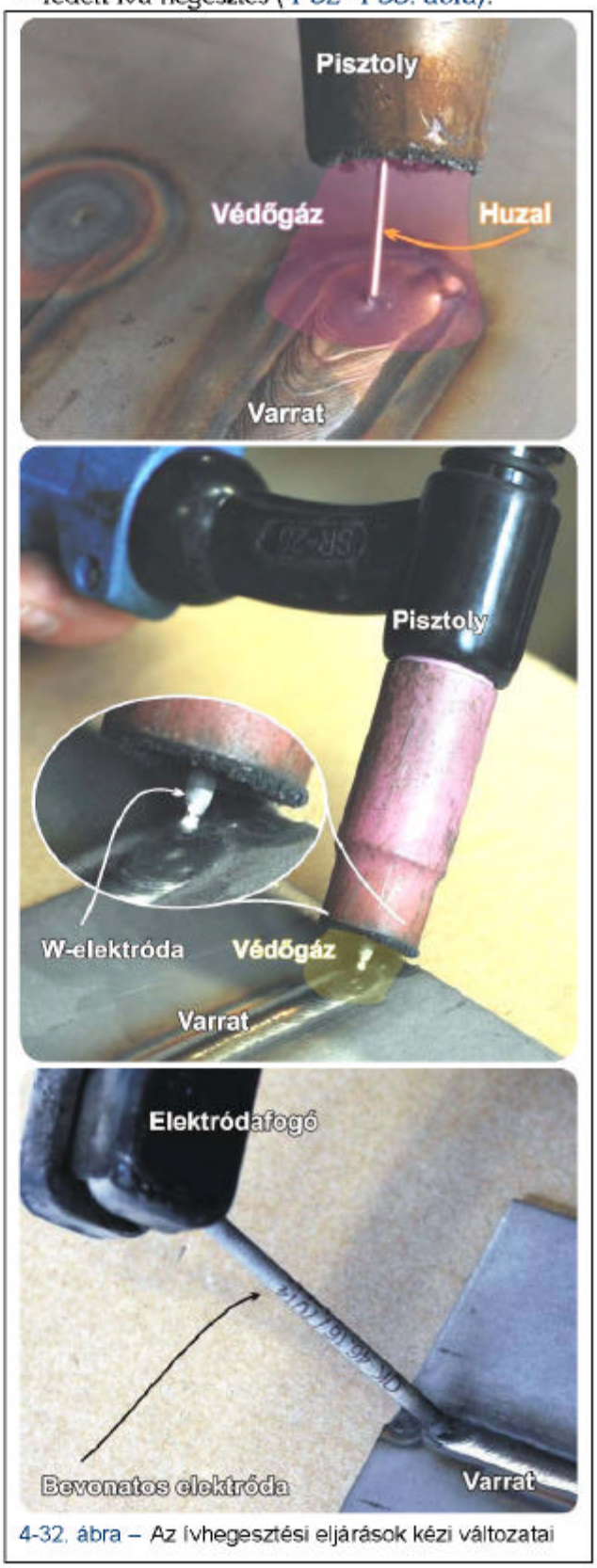
A hegesztési eljárásokban gyakran – de a forrasztással ellentétben egyáltalán nem minden esetben – alkalmaznak különféle hegesztőanyagokat, amelyek a hegesztés folyamán külön adagolt vagy előre elhelyezett, a varrat tömegének és tulajdonságainak biztosításához szükséges anyagok. Fémes anyagok hegesztésekor a legfontosabb hegesztőanyagok a következők (4-31. ábra):

- hegesztőhuzalok,
- bevonatos elektródák,
- védőgázok,
- fedőporok.

4-31. ábra – Csévélt huzal, bevont elektródák, védőgáz

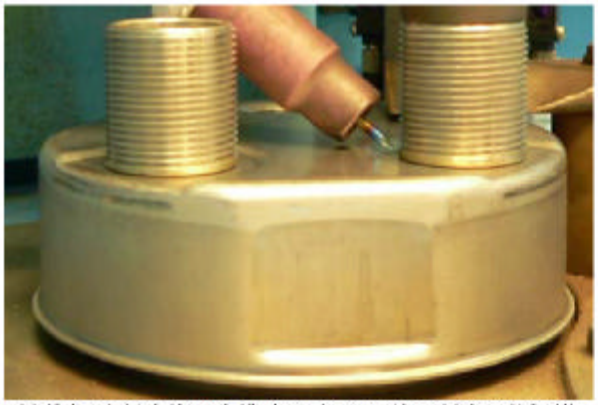
Az ömlesztőhegesztési eljárások közül a leggyakrabban a következőket alkalmazza az ipar:

- fogyóelektródás, védőgázos ívhegesztés,
- volfrámelektródás, védőgázos ívhegesztés,
- bevontelektródás kézi ívhegesztés,
- fedett ívű hegesztés (4-32–4-33. ábra).

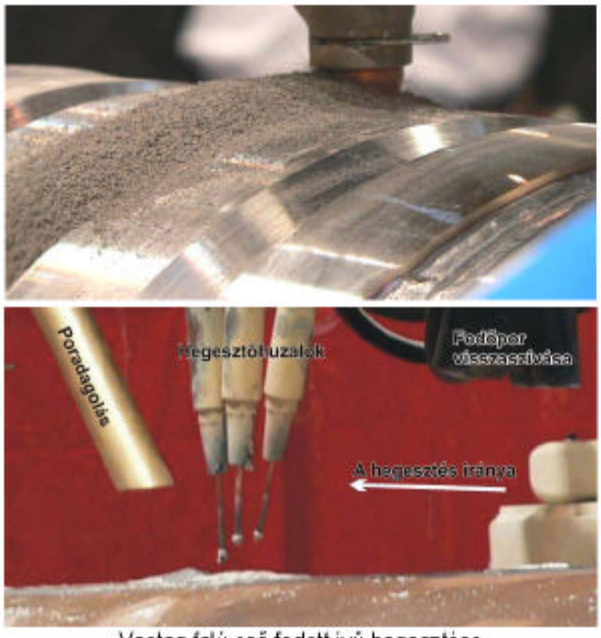


4-32. ábra – Az ívhegesztési eljárások kézi változatai

Fogyóelektródás, védőgázos hegesztéssel készült alvázelem hegesztés közben és az után



Volfrámelektródás, védőgázos hegesztéssel készült fedél



Vastag falú cső fedett ívű hegesztése

4-33. ábra – Automatizált ívhegesztési eljárások

– **Fogyóelektródás, védőgázos ívhegesztés**

A legszélesebb körben alkalmazott villamos ívhegesztési eljárás lényege az, hogy a folyamatosan és állandó (de változtatható) sebességgel adagolt és leolvadó hegesztőhuzal, illetve a munkadarab között égő villamos ívet, az általa megolvasztott alapanyagot és hegesztőanyagot, továbbá a még kellőképpen ki nem hűlt hegesztési varratot a pisztolyból a huzal körül kiáramoltatott védőgáz védi a levegő káros hatásától. Azért vált a legelterjedtebb hegesztési eljárássá, mert szinte mindenféle anyaghoz, nagyon széles mérettartományban, nagy termelékenységet biztosítva alkalmazható, kitűnően automatizálható.

– **Volfrámelektródás, védőgázos ívhegesztés**

A villamos ívhegesztések fontos típusa. Különösen a vékony lemezek és csövek, az erősen ötvözött anyagok és a nemvasfémek hegesztésére terjedt el. A volfrámelektródás hegesztéssel készített varratok szívóssági tulajdonságai kiemelkedően jók a többi eljárással összehasonlítva. A volfrámelektróda nem olvad meg a hegesztés közben, a villamos ív egyik stabil pólusát képezi. A védőgáz védi a villamos ívet, a volfrámelektródát, a megolvasztott alapanyagot, a külön adagolt hegesztőanyagot és a még ki nem hűlt varratot. Többnyire kézi eljárásként alkalmazzák, de egyáltalán nem ritka az automatizált változata sem.

– **Bevont elektródás kézi ívhegesztés**

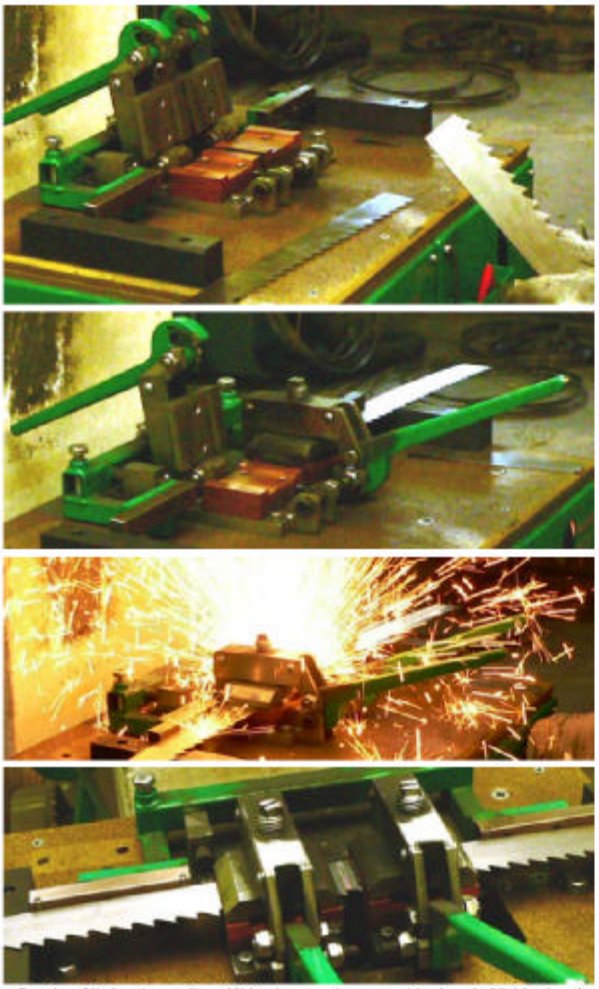
A villamos ívhegesztések legrégebbi fajtája. A bevonatos elektródák a maghuzalra sajtolt bevonatot is tartalmaznak, amelyből hegesztés közben védőgáz és salak képződik; ezek védik az ömledéket és a varratot. Bár csökken a bevonatos elektródák felhasználásának mennyisége, még ma is jelentős a felhasználásuk az egyedi termékek gyártásában, különleges nehézségű varratok elkészítésében, a csővezetékek hegesztésénél, a javítóhegesztési és felrakóhegesztési feladatoknál.

– **Fedett ívű hegesztés**

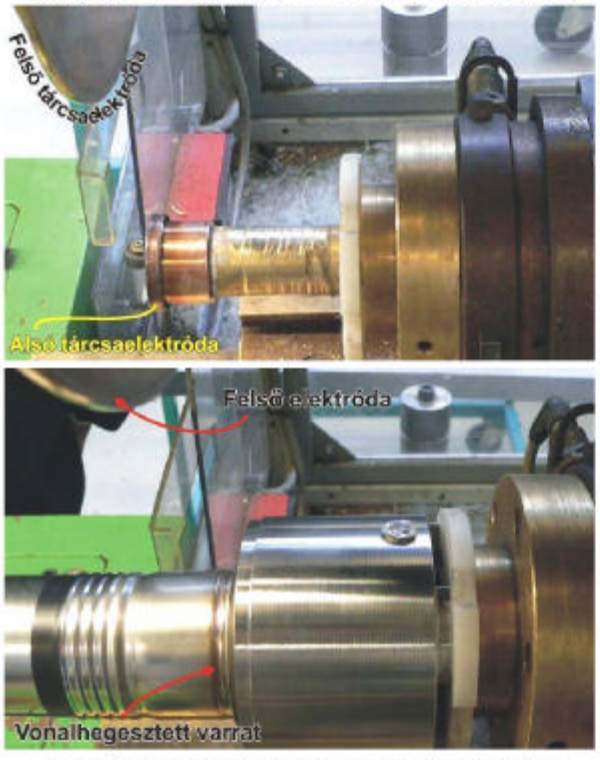
A villamos ívhegesztések legnagyobb termelékenység elérését lehetővé tévő fajtája. A hegesztőhuzal és a munkadarab között égő ívet hegesztés közben vastag fedőpor takarja (4-33. ábra), amelyből védőgáz és védő salakréteg képződik.

– **Villamos ellenállás-hegesztések**

Az ellenállás-hegesztések sajtolóhegesztések, tehát a kohéziós kapcsolatot alapvetően a nagy nyomóerő hatására lejátszódó képlékeny alakváltozás biztosítja. Főbb típusait és azok alkalmazási példáit a 4-34. és a 4-35. ábra ismerteti.

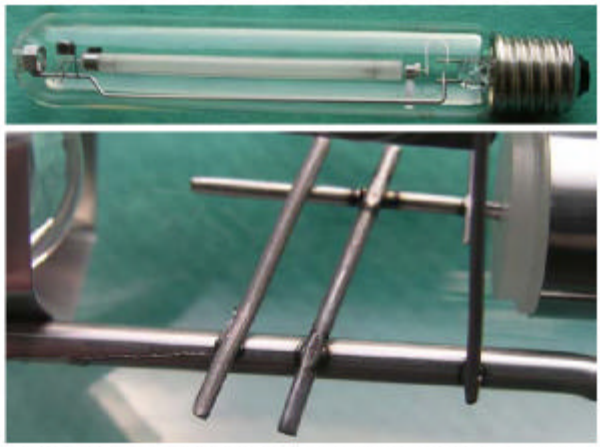


Szalagfűrészlap ellenállás-tompahegesztésének fő lépései

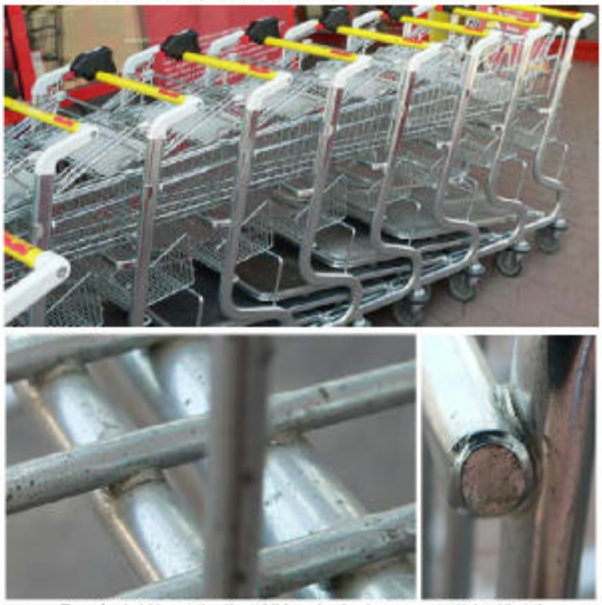


Ellenállás-vonalhegesztés búvárszivattyú-alkatrészen

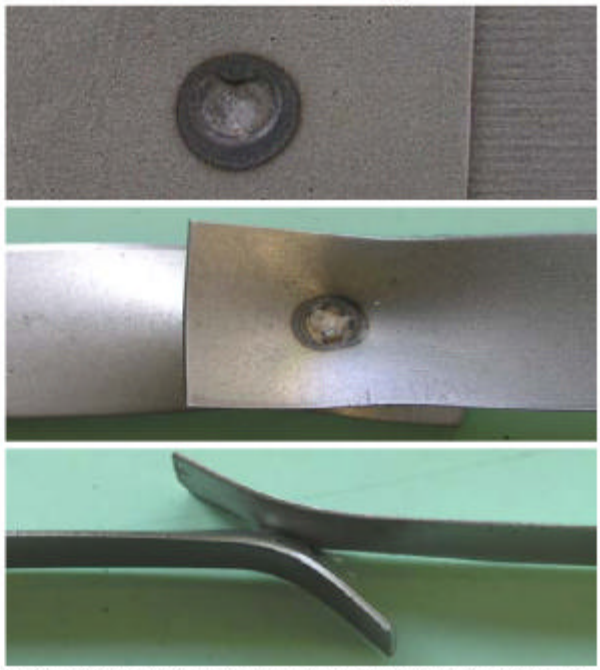
4-34. ábra – Ellenállás-hegesztéssel készült termékek



Ellenállás-dudorhegesztett kötések nátriumgőzlámpában



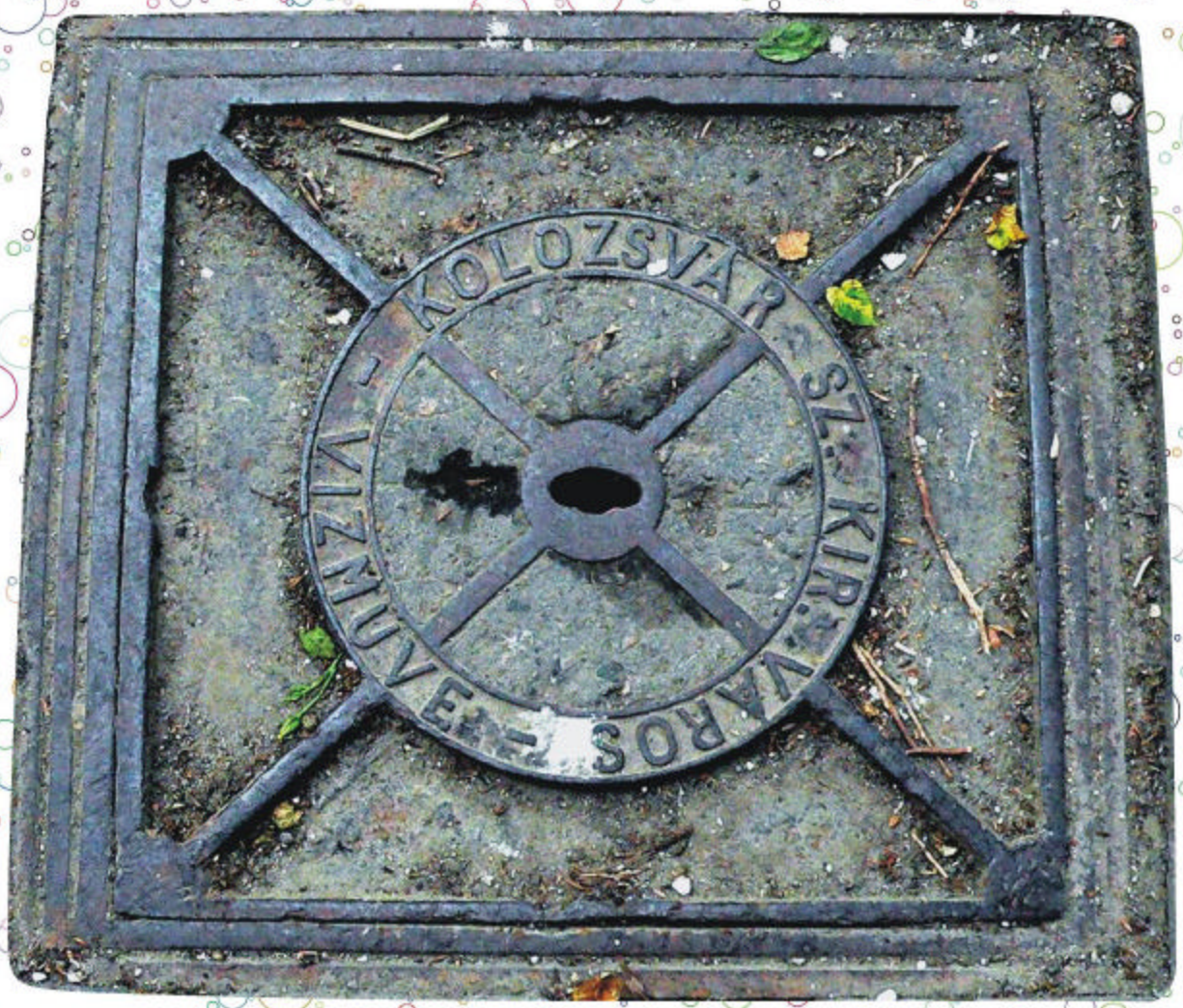
Bevásárlókocsi ellenállás-dudorhegesztett kötései



Lemezek ellenállás-ponthegesztett átlapolt kötése meghúzva

4-35. ábra – Ellenállás-hegesztéssel készült termékek

5. fejezet
A vasöntészet anyagai



Utcai csatornafedél Kolozsvárott

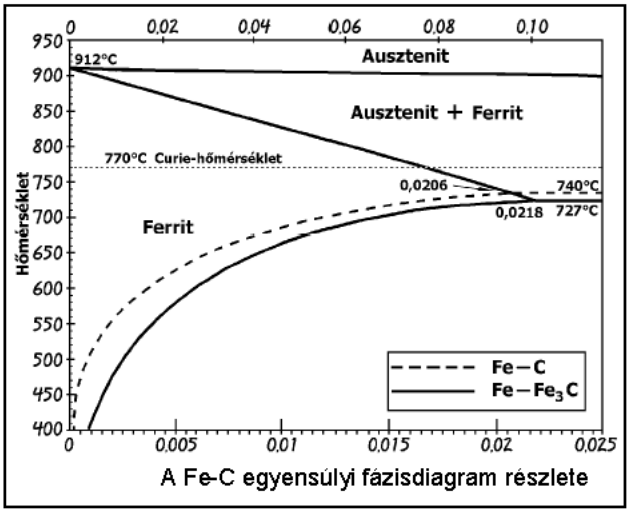
5. A vasöntészet anyagai

5.1. A vas–szén egyensúlyi fázisdiagram

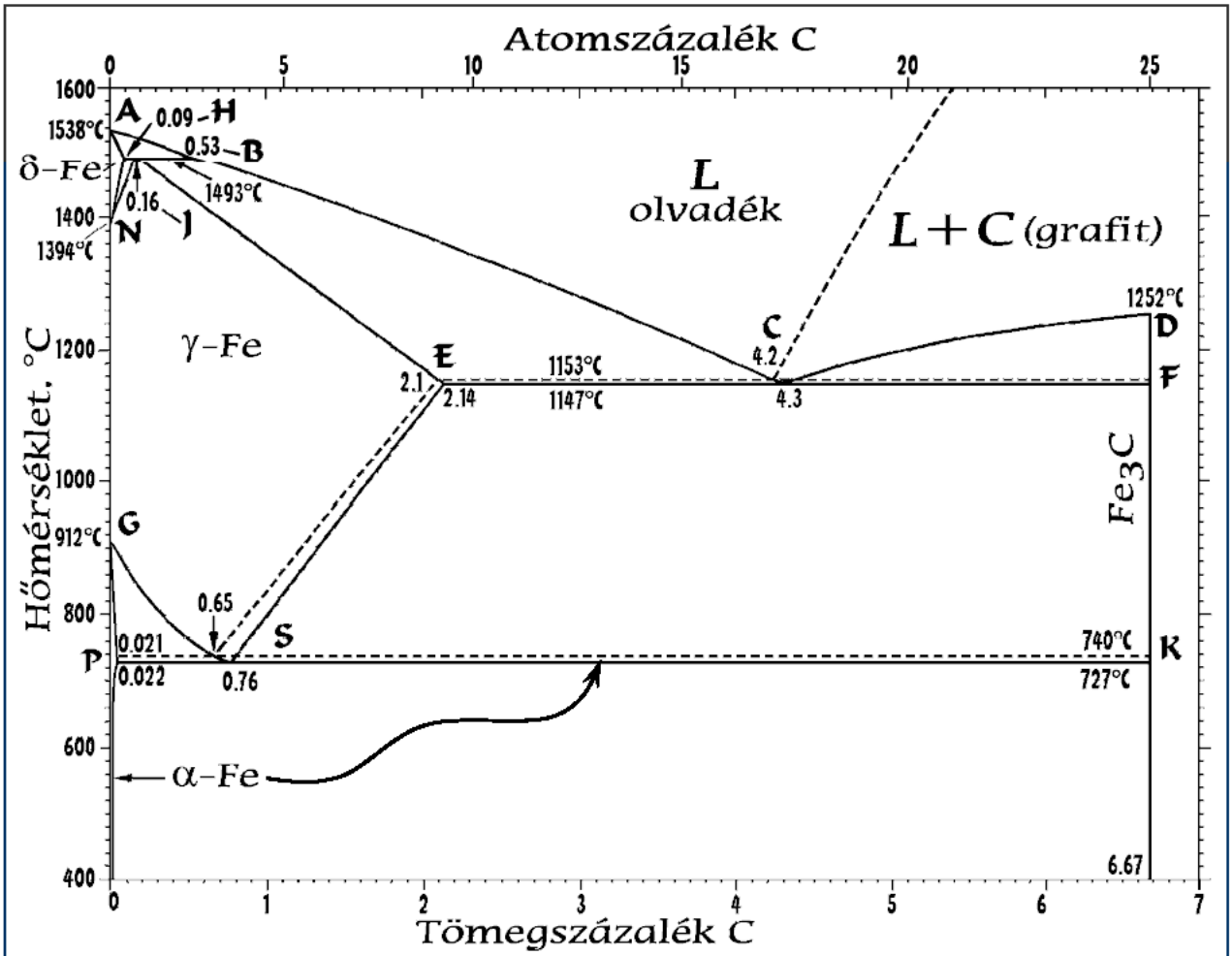
Az iparban felhasznált szerkezeti anyagok között az egyik legfontosabb csoport a vasalapú ötvözeteké, ugyanis mind a felhasználási területük kiterjedtsége, mind pedig a felhasznált mennyiség tekintetében rendkívül jelentős anyagcsaládként említhetjük. A vasalapú ötvözetek közé sorolunk minden olyan fémes anyagot, amelyben a komponensek (az összetevő kémiai elemek) között a Fe mennyisége a legnagyobb. Amennyiben a vastartalom meghaladja az 50 tömeg%-ot, és C < 2,1%, az ötvözet neve: **acél**.

Ha a vasalapú ötvözetben a szén mennyisége nagyobb, mint 2,1 tömeg%, **vasnak** vagy **öntöttvasnak** nevezzük. A továbbiakból majd bizonyosan kitűnik, de már itt előre kell bocsátani azt, hogy az acélok és az öntöttvasak legfontosabb ötvözőjének a szenet (elterjedt idegen nevén: a karbont) tekintjük.

A C-tartalom meghatározó mind az acélok, mind pedig az öntöttvasak szerkezetére és tulajdonságaira, ezért a Fe-C fázisdiagram (5-1. ábra) alapvető ismeretnek számít. Az első Fe-C állapotábrát *William Chandler Roberts-Austen* (1843–1902), brit kohómérnök közölte 1897-ben.



A Fe-C egyensúlyi fázisdiagram részlete



5-1. ábra – A Fe-C egyensúlyi fázisdiagram: a vasat és szenet tartalmazó, kétalkotós ötvözetrendszer stabil fázisait mutatja. A szaggatott vonalak azt az esetet jelölik, amikor a megszilárdulás valóban egyensúlyi módon megy végbe, a szénnek grafitként való kiválásával. A folytonos vonallal jelölt változat pedig a szénnek Fe_3C vas-karbidként való kiválására vonatkozik: ez jellemző az acélokra és a fehéröntöttvasakra, míg a grafitos kristályosodás jellemző a szürkeöntöttvasakra

5.1.1. Az Fe-C egyensúlyi fázisdiagramhoz kapcsolódó alapfogalmak

– Ötvözet, ötvöző

Ötvözetnek nevezzük azokat az anyagokat, amelyek alapalkotója valamilyen fém (ezt gyakran nevezik mátrixnak), és mellette egy vagy több további komponens épül be a mátrix atomjai közé. Az ötvözet lehet kristályos vagy amorf. A gyakorlatban használt ötvözetek viselkedését gyakran kétkomponensű ötvözetként tekintve vizsgáljuk.

A mátrixban elhelyezkedő komponens *ötvöző*, ill., ha nemkívánatos a jelenléte, akkor *szennyező*. Az ötvözőelemek az atomátmérő függvényében a mátrix atomjainak helyére (szubsztitúciósan), ill. azok közé (intersztíciósan) illeszkednek.

– Koncentráció

Az alapalkotóhoz adott kémiai elem mennyisége tömegszázalékban vagy atom%-ban. A fázisdiagramon függőleges vonal mentén állandó.

– Hőmérséklet

A fázisdiagram függőleges tengelye. A fázisdiagramon vízszintes vonal mentén állandó.

– Szilárd oldat

Az ötvözet olyan kristályos fázisa, amelyben az ötvözők eloszlása egyenletes a mátrixban. Ha az ötvözők a kristályrács kitüntetett helyeit foglalják el, rendezett rácsú szilárd oldat alakul ki. A fázisdiagramon egyfázisú tartományt képez.

– Vegyület

Olyan szilárd fázis, amely az olvadék kristályosodása közben vagy kiválási folyamatok eredményeként alakul ki egy adott koncentrációnál (esetleg egy szűk koncentrációintervallumon). Kémiai képlettel leírható.

– Egyfázisú tartomány

- Olyan tartomány a fázisdiagramon, melyben csak az olvadék v. egy szilárd oldat stabil.
- Függőleges vonal (valamelyik komponens, illetve az adott rendszer vegyületei).

– Kétfázisú tartomány

Olyan tartomány, amelyben két fázis stabilitása egyszerre lehetséges. Valamely hőmérsékleten a vele jobbról és balról szomszédos két fázis tart egyensúlyt benne.

– Háromfázisú tartomány

A fázisdiagram vízszintes vonalai. Az a három fázis stabil, amelyek tartománya a vízszintes vonalat a végein és azok között érinti.

5.1.2. Az Fe-C rendszer fázisai

– Olvadék vagy folyadék

Az ötvözet kizárólag olvadékból áll, ha egy tetszőleges koncentráció mellett hőmérséklete nagyobb, mint a koncentrációvonal és a fázisdiagram ABCD vonalának metszéspontja. Az ABCD vonal neve: likvidusz. Az AHJECF vonal (szolidusz) alatt folyadék fázis nem létezhet.

– δ-vas vagy δ-ferrit (delta-vas, delta-ferrit)

A fázisdiagram A-H-N-A tartományában egyedül stabil fázis. Kristályszerkezete TKK.

– γ-vas vagy ausztenit (gamma-vas)

A fázisdiagram J-E-S-G-N-J tartományában egyedül stabil fázis. Kristályszerkezete LKK. Maximális C-tartalma 2,14 tömeg%. Nevét az első Fe-C fázisdiagramot közlő *Austenről* kapta.

– α-vas vagy ferrit (alfa-vas)

A fázisdiagram G-P-origó-G tartományában egyedül stabil fázis. Kristályszerkezete TKK. Szobahőfokon gyakorlatilag nem oldja a szenet.

– Grafit

Az Fe-C rendszer stabil kiválása, amely csak egészen lassú lehűléskor tud kialakulni.

– Vas-karbid, Fe_3C vagy cementit

6,67 tömeg% C-tartalmú (25 atom%) vegyület. A Fe-C rendszer metastabil kiválása; könnyen létrejön, ha a lehűlés nem egészen lassú.

– Martenzit

Nemegyensúlyi fázis, amely csak gyors lehűléskor tud kialakulni az ausztenitből, diffúzió nélküli fázisátalakulással.

– Acél: Fe-C ötvözet, amelyben C < 2,14%.

- Hipereutektoidos acél: 0,76 < C< 2,14%.
- Eutektoidos acél: C = 0,76% C.
- Hipoeutektoidos acél: 0 < C < 0,76%.

– (Öntött)vas: Fe-C ötvözet, ahol C ≥ 2,14%.

- Hipereutektikus vas: 4,3 < C < 6,67%.
- Eutektikus vas: C = 4,3% C.
- Hipoeutektikus vas: 2,14 ≤ C < 4,3%.

5.1.3. Az Fe-C rendszer szövetelemei

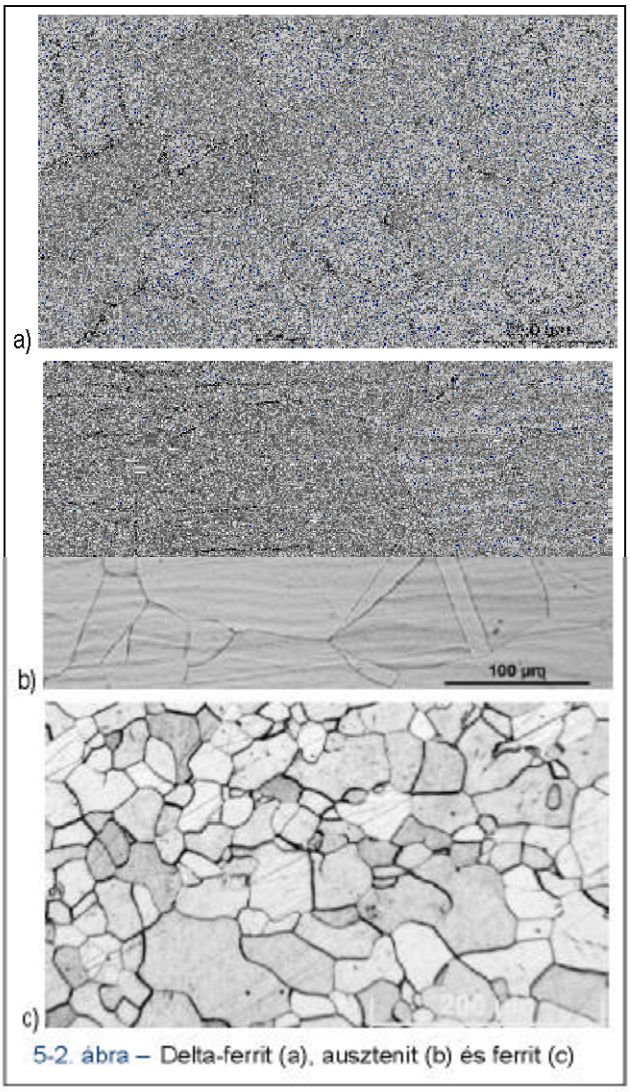
Szövetelemnek nevezzük az ötvözetnek optikai mikroszkópos vizsgálat közben (pl. szín, alak, méret, eloszlás szerint) megkülönböztethető részeit.

– δ-vas (vagy delta-ferrit), ausztenit, ferrit

Egyfázisú, lágy szövetelemek, optikai mikroszkópos szövetképük az 5-2. ábrán látható.

– **Perlit**

Kétfázisú szövetelem, ferrit (≈ 0% C) és cementit (6,67% C) alkotja. A fázisdiagram S pontjának megfelelő, 0,76% C-tartalmú ausztenitből keletkezik a lehűléskor: az ausztenit allotrop átalakulással ferrit + cementit elegyévé alakul. Szerkezete jellegzetes: lemezes (5-3. ábra). A perlithez hasonlóan, egy szilárd fázisból két másik keverékeként keletkező átalakulási termék általános fémtani megnevezése: eutektoid.



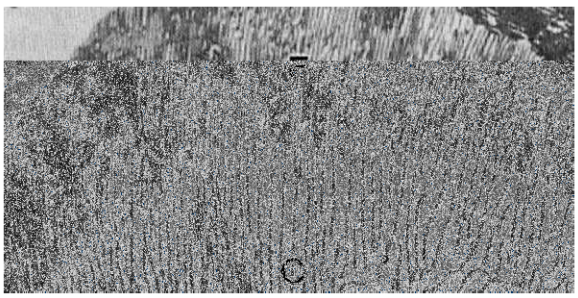
5-2. ábra – Delta-ferrit (a), ausztenit (b) és ferrit (c)

– **Lédeburit**

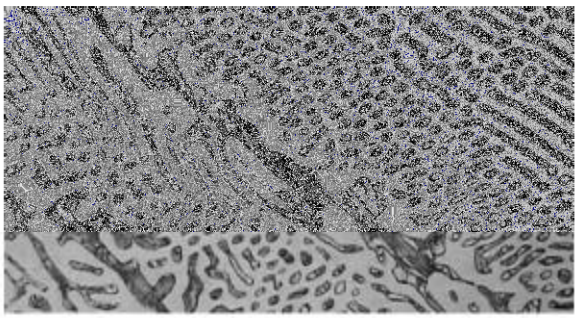
Kétfázisú szövetelem, ausztenit és vas-karbid alkotja. Nevét felfedezője, *Adolf Ledebur* (1837–1916), a híres Bergakademie Freiberg első professzora tiszteletére kapta. A fázisdiagram C pontjának megfelelő, azaz 4,3% C-tartalmú olvadékból keletkezik annak dermedésekor. Szerkezete a két fázis finom elegye (5-4. ábra). A hozzá hasonlóan, egy folyadék fázisból két szilárd fázis keverékeként keletkező átalakulási termék általános fémtani megnevezése: eutektikum.

– **Vas-karbid, Fe_3C vagy cementit**

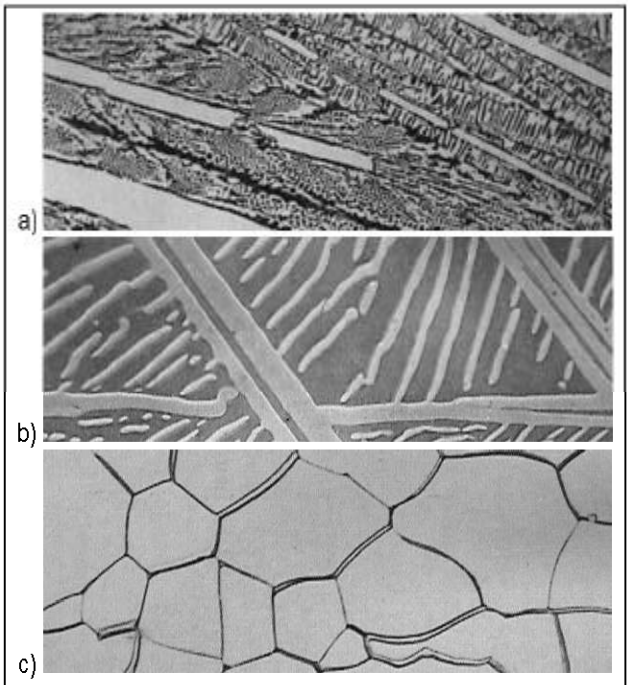
- Primer cementit: az olvadékból kristályosodik elsődlegesen (az 5-5.a ábrán a vastag tűk).
- Szekunder cementit: ausztenitből keletkezik, az abban oldódni nem tudó szén kiválása miatt (5-5.b ábra: a vastag tűk a lemezes perlitben).
- Tercier cementit: ferritből keletkezik, az abban oldódni nem tudó szén kiválása miatt (5-5.c: a megvastagodott szemcsehatárokon).



5-3. ábra – Finom- (F) és durvalemezes (C) perlit



5-4. ábra – Lédeburit eutektikus fehéröntöttvasban



5-5. ábra – A cementit változatai: a) primer~: világos sávokban, b) szekunder~: vastag lemezekben, c) tercier: a megvastagodott szemcsehatárokon

– **Grafit**
- Lemezes grafit: egykristályként válik ki az eutektikus olvadékból, elmetszve girbegurba lemezeket formáz, ezt mutatja az 5-6. ábra.
- Gömbgrafit: az alakja a gömbszemcsésítő ötvözőknek (pl. Mg) köszönhető, polikristályos.
- Átmeneti (vermikuláris) grafit.

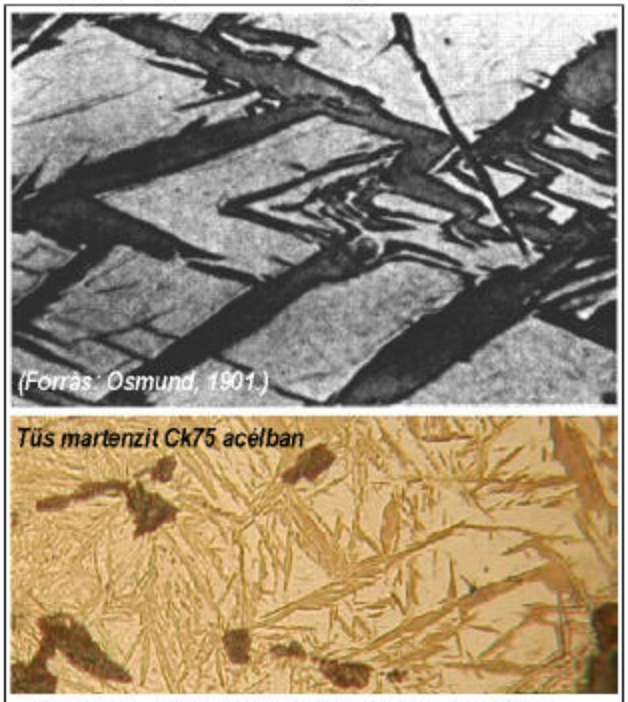
5-6. ábra – Lemezgrafitos és gömbgrafitos öntöttvas szövetszerkezete optikai mikroszkópi képen

– **Martenzit**

Az előzőekben láttuk, hogy a lehűtéskor az – egyéb ötvözőt nem tartalmazó – acélban és öntöttvasban az ausztenit 727°C-on még éppen létezhet (ekkor a C-tartalma nem lehet más, csak az eutektoidos koncentrációnak megfelelő 0,76%). Ennél kisebb hőmérsékleteken viszont az ausztenitnek át kell alakulnia ferritté, a ferritben oldhatatlan karbonnak pedig cementitté. Ezt a lassú hűtésnél, valamint a 727°C-tól nem sokkal kisebb hőmérsékleteken* végbemenő folyamatot nevezzük perlites átalakulásnak, amely egy jellemző típusa a diffúziós átalakulásoknak.

Ugyanakkor egészen más jellegű átalakulással tűnik el az ausztenit abban az esetben, ha a lehűtés sebessége meghalad egy kritikus értéket.

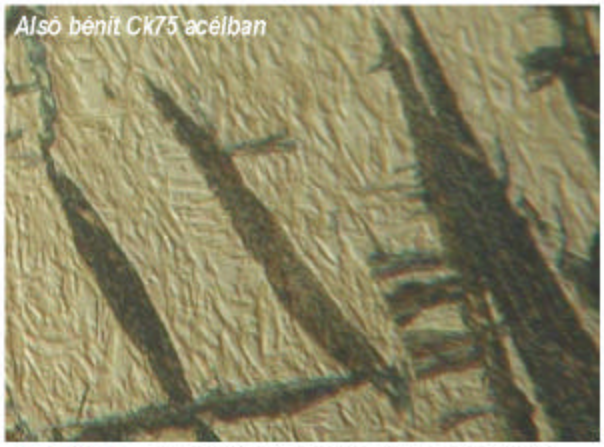
Az acélok esetében a martenzit – a kristályrácsból kidiffundálni nem tudó szén rácstorzulást eredményező hatása miatt – rideg és sokkal keményebb lesz, mint az ugyanolyan acélból keletkező perlit. Az általában tűs martenzit szövetképe az 5-7. ábrán látható. A martenzit *Adolf Martens* (1850–1914), a berlini anyagvizsgáló laboratórium igazgatója, tiszteletére kapta a nevét.



5-7. ábra – Martenzites szövet mikroszkópi képe

– **Bénit**

Tulajdonságait tekintve a perlit és a martenzit közé sorolható, tehát a szilárdsága nagy, de nem olyan rideg, mint a martenzit. Nevét *E. C. Bain* tiszteletére kapta. Az ausztenitből jön létre bénites átalakulással; több fajtája is ismeretes (5-8. ábra).



5-8. ábra – Bénittük (sötét) körbevéve martenzittel

** Figyelembe kell venni azt, hogy az ausztenit allotrop átalakulásának kezdete is és lezajlása is időt vesz igénybe. Emiatt a túlhűtött ausztenit hosszabb ideig is létezhet, mielőtt perlitté alakulna.*

5.2. A vasöntészeti anyagok tulajdonságai és alkalmazásai

Az öntöttvas a 2,1%-nál több szenet, emellett számos ötvöző- és szennyezőelemet tartalmazó többalkotós vasötvözet. A *szürkeöntöttvas* az egyensúlyi Fe-C rendszerben, a *fehéröntöttvas* pedig a metastabil Fe-Fe_3C rendszerben kristályosodik: lásd az 5-1. ábrát. A szénnek az öntöttvasban alkotott fázisa – grafit avagy vas-karbid – a hűtés sebességétől és az ötvözőktől függ. A kétféle vas elnevezése a töretfelület sötétszürke (grafitos), illetve ezüstfehér (vas-karbid) színére utal.

Az öntöttvasak szövetszerkezetét a T telítettségi fokkal, másrészt pedig a szövetelemek típusaival jellemzik:

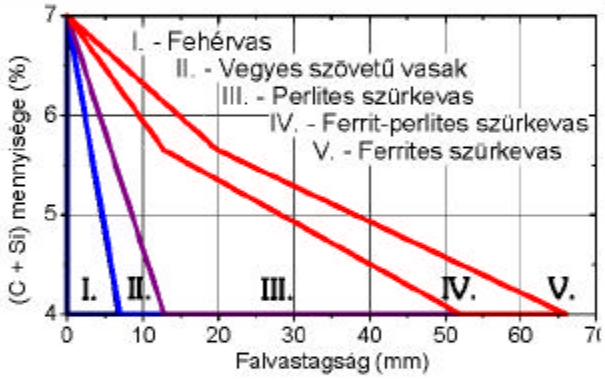
$T > 1 \Rightarrow$ hipereutektikus,

$T = 1 \Rightarrow$ eutektikus,

$T < 1 \Rightarrow$ hipoeutektikus.

$$T \approx \frac{C}{4{,}3 - 0{,}3 \cdot (Si + P)}$$

Az öntöttvasak szerkezetét alkotó szövetelemek egyszerűen meghatározhatók a C és a Si összege, valamint a falvastagság közötti összefüggés alapján, amelyet a *Greiner–Klingenstein-diagram* szemléltet (5-9. ábra).



5-9. ábra – A Greiner–Klingenstein-diagram

5.2.1. A vasöntészeti anyagok tulajdonságai

– Lemezgrafitos öntöttvas

A mechanikai tulajdonságok zöme (szilárdság, rugalmassági modulus stb.) annál nagyobb, minél kisebb a grafit mennyisége (T kicsi), minél egyenletesebb a grafitlemezek eloszlása és kisebb a mérete. Ezeket az öntési hőmérséklet, a T telítettségi fok és a lehűlési sebesség jelentősen befolyásolja. Az öntöttvasak tulajdonságai a falvastagságtól erősen függnek.

– A lemezgrafitos öntöttvas előnyei az ötvözetlen acélhoz viszonyítva

- jobb önthetőség (kisebb öntési hőmérséklet, kisebb zsugorodás),
- jó nyomószilárdság,
- jó rezgéscsillapító képesség,
- jó forgácsolhatóság,
- jó kopásállóság,
- jó hővezető képesség és hőállóság,
- jobb korrózióállóság,
- olcsóbb.

A hátrányok legfontosabbika a ridegsége.

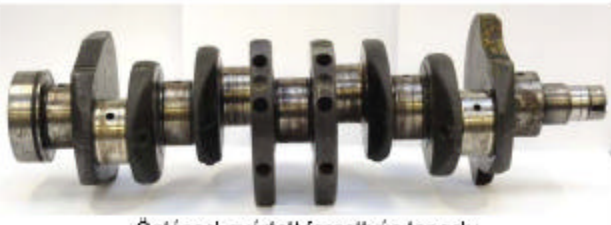
A nagyméretű alkatrészek gyártása terén jelentős szerepet kap az öntési technológia, amelyre néhány példát mutat az 5-10. ábra.

5-10. ábra – Lemezgrafitos öntöttvas termékek

– A gömbgrafitos öntöttvas

A gömbgrafitos öntöttvas előállításának ipari módszerei az 1940-es évektől kerültek bevezetésre. Magyarországon az 1950-es években eredményesen oldották meg a gömbgrafitos öntöttvasak előállítását *Gillemot László,* a BME Mechanikai Technológia Tanszék professzora vezetésével.

A gömbgrafitos öntöttvasak a nagy szilárdság (folyáshatár) mellett jelentősen nagyobb nyúlásra képesek (A=7÷17%), mint a lemezgrafitos vasak. Jellegzetes termékek láthatók az 5-10. ábrán.



Öntéssel gyártott forgattyús tengely

5-11. ábra – Gömbgrafitos öntöttvas gyártmányok

– Temperöntvények

A temperöntvények alapanyaga a tempervas: ez fehérvas, melyben a szén (2,2–3,4%) kizárólag vas-karbid fázisként, lédeburit és perlit szövetben van jelen. A cementit maradéktalan elbontását hőkezelés biztosítja: ez a temperálás, amelynek módjától függően a temperöntvényeket két nagy csoportra oszthatjuk:

- az oxidáló atmoszférában (levegőn) izzítva előállított **fehér temperöntvényekre** és
- a semleges atmoszférában (pl. argon védőgázban) hőkezelt **fekete temperöntvényekre**.

A tempervasból a szén kiég az oxidáló közegben. Ez a dekarbonizálódás az öntvény felületén kezdődik, és halad befelé. A temperálás vékonyfalú (3–15 mm-es) gyártmányoknál hatásos (pl.: csőszerelvények stb.).

A hőkezelést védőgázban végezve az öntvény törete sötét, ezért az ilyen öntvényeket fekete temperöntvénynek nevezzük. A cementit a hőkezelés hatására temperszénné alakul. A fehér és a ferrites fekete temperöntvények a mechanikai tulajdonságok alapján növelt szilárdságú szívós öntöttvasak.

A temperöntvények felhasználása ott indokolt, ahol a kovácsolás a termék bonyolultsága miatt túl költséges. A temperöntvényeknek a jó szilárdságuk mellett a szívósságuk is jelentős. Mezőgazdasági és textilipari gépek, közlekedési eszközök alkatrészeiként alkalmazzák. Temperöntvényből készülhetnek a gépjárművekben a fárasztó és/vagy dinamikus igénybevételnek kitett hajtórudak, motor-, sebességváltómű-, tengelykapcsolóház, bütykös- és forgattyús tengelyek stb. A perlites temperöntvények kopásállósága kedvező, amelyre a lánchajtások elemeinél van szükség.

– Acélöntvények

Az acélöntés a kis széntartalmú acélból készült nagyméretű, bonyolult alakú gyártmányok gyártására szolgáló eljárás. Az acélöntvények szilárdsága, képlékenysége közel azonos a kovácsolt acéltermékekével, de a durvább mikroszerkezet miatt a szívósságuk kisebb. Tehergépkocsik, vasúti járművek hajtásláncának és fékrendszerének számos eleme készül belőlük.

A vasöntészeti anyagok tulajdonságait hasonlítja össze az 5-1. táblázat.

Tulajdonság	Gömbgrafitos	Temperöntvény	Lemezgrafitos	Acélöntvény	Fehérvas
Önthetőség	5	4	5	1	3
Forgácsolhatóság	4	4	5	3	0
Rezgéscsillapítás	4	4	5	2	1
Felületkeményítés	5	5	5	3	0
Young-modulus	5	4	3	5	0
Szilárdság / tömeg	5	2	1	3	0
Kopásállóság	4	2	3	1	5
Ütésállóság	4	3	1	5	0
Korrózióállóság	5	4	5	2	4
Gyártási költség	4	3	5	2	3

Kiváló ⇐ 5 – 4 – 3 – 2 – 1 – 0 ⇒ Nagyon gyenge

5-1. táblázat: A vasöntészeti anyagok tulajdonságai

6. fejezet
Ötvözetlen acélok

A szabványosítási munkát elismerő plakett; Gillemot László professzor kitüntetésének fényképe

6. Ötvözetlen acélok

6.1. Az acélok ötvözői, szennyezői

Az acélok egységes jelölési rendszerét, csoportosítását, a rájuk vonatkozó fogalmakat nemzetközi szabványok tartalmazzák.

Acélként a fémes anyagok családjába tartozó ötvözeteket határozza meg az MSZ EN 10020 szabvány, amelyekben a vastartalom minden más elemnél nagyobb, és széntartalmuk 2%-nál kisebb. Néhány acél tartalmazhat 2%-nál több szenet, de ez az érték határvonal az acél és az öntöttvas között. Meg kell jegyezni, hogy a Fe-C fázisdiagramon a határérték 2,14%.

Az MSZ EN 10027-1 szabvány a felhasználási célok alapján a tulajdonságokra vagy a kémiai összetételre utaló jelekkel azonosítja az összes acéltípust, míg a 10027-2 szabvány minden acélt egy számjellel jelöl, mely a pontos műszaki és kereskedelmi előírásokkal függ össze. Egy acéltípusnak csak egy számjele van. Új acél rendszerbevételi kérelme esetén az azonosító jelet a brüsszeli szabványosítási központ adja ki. Ugyanakkor léteznek nem szabványosított acélok is, amelyeket a gyártók saját minőségi rendszerükben határoznak meg. A szabványos jelölések rendszere meglehetősen összetett, ezért annak részletes ismertetésétől itt eltekintünk, viszont az ismertetésre kerülő acélcsoportoknál jelölési példák találhatók.

6.1.1. Az acélok csoportosítása

Az acélok csoportosítására főként a jelenlegi szabványosítási rendszer rendezőelveit használjuk, de a hagyományosan elterjedt szempontok egy részét is bemutatjuk.

– **A) Rendeltetés alapján**

- *Szerkezeti acélok:* rendkívül széles körben, a gép-, jármű- és acélszerkezetek gyártása (hidak, épületszerkezetek) stb. területén használják alapanyagként.
- *Szerszámacélok*: ezekből készülnek a forgácsolószerszámok, a képlékenyalakítási műveletek szerszámai, a kerámiák és a műanyagok feldolgozási eljárásaiban használt szerszámok. Elengedhetetlen, hogy a rájuk ható igénybevételeket alakváltozás nélkül viseljék, és a kopásnak, korróziónak is ellenálljanak. E tulajdonságokat általában nemesítéssel érjük el, így ezeknek jól edzhetőeknek kell lenniük.
- *Különleges acélfajták és vasötvözetek*: ide sorolhatóak a valamilyen különleges tulajdonságú, pl. hőálló, korrózióálló, nemmágneses, nem hőtáguló stb. acélok vagy vasötvözetek.

– **B) Vegyi összetétel alapján**

- *Ötvözetlen acélok*: nem tartalmaznak más ötvözőt, csak a gyártással szükségszerűen bevitt elemeket. Az e csoportba tartozás feltételeként több mint 20 elemre felső határértékek vannak megszabva, pl. Mn < 1,80%, Si < 0,60%.
- *Ötvözött acélok*: az imént említett határértékeknél többet tartalmaznak valamely ötvözőelemből, pl. Cr, Al > 0,30%, Ni > 0,40%.
- *Rozsdamentes acélok:* azok az acélok tartoznak ebbe a csoportba, amelyekre érvényes, hogy Cr > 10,5% és C < 1,2%.
  Gyakran használjuk majd a másik, elterjedt elnevezésüket: korrózióálló acélok, de mint látni fogjuk, nem igazán szinonimákról van szó.

Az ötvözők M mennyisége alapján egy régóta használt, ezért a szakirodalomban elterjedt felosztási rendszerben megkülönböztethetjük a következő – de a jelenlegi szabványos rendszerezésben már nem meghatározott – csoportokat:

- *Ötvözetlen acélok:* az acélgyártás szempontjából nézve csak az alapalkotókat tartalmazó acélok, amelyek gyártásakor sem további ötvözést, sem különleges gyártási műveleteket nem végeznek.
- *Mikroötvözött acélok:* egy-egy mikroötvöző mennyisége < 0,1%, és az összes mikroötvöző mennyisége < 0,15%. A főbb mikroötvözők: Al, Ti, V, Nb, B, Zr.
- *Gyengén ötvözött acélok:* az összes ötvöző mennyisége M < 5%, és az ötvözők egyikének mennyisége sem haladja meg a 3%-ot.
- *Közepesen ötvözött acélok:* az összes ötvöző mennyisége M = 5–10%.
- *Erősen ötvözött acélok:* az összes ötvöző mennyisége M > 10%.
- *Vasötvözetek:* az összes alkotóelem közül a Fe mennyisége a legnagyobb, de nem éri el az 50%-ot.

– **C) A gyártás minőségi osztályai szerint**

- *Minőségi acélok*: csak az általános előírások vonatkoznak rájuk pl. szilárdság, szívósság, szemcseméret, alakíthatóság.
- *Nemesacélok*: fokozott követelményeket elégítenek ki, pl. kisebb szennyezőtartalom, szigorúbb kémiai összetételi előírás, a zárványtartalomra vonatkozó követelmények stb.
- *Rozsdamentes acélok:* a vegyi összetétel szerinti felosztásban már említett Cr- és C-tartalmat kielégítő acélok egyfelől két csoportra oszthatók a 2,5%-os Ni-tartalom-határ mentén, másfelől három csoportra a fő tulajdonságuk szerint: korrózióálló, hőálló és kúszásálló acélok.

A minőségi és a nemesacélok lehetnek az előző (B) szakasz szerint ötvözetlenek és ötvözöttek. Az ötvözetlen minőségi acélok nem felelnek meg az ötvözetlen nemesacélokra vonatkozó szigorú követelményeknek. Az ötvözetlen nemesacélokban kisebb a szennyezők mennyisége, tehát „tisztábbak", mint a minőségi acélok: a P- és a S-tartalom legfeljebb 0,02%. Az összetétel pontos beállításának és a fokozott gondossággal végzett gyártási folyamatnak köszönhetően biztosítják a gyártók a minőségi acélokéinál szigorúbb követelményeknek való megfelelést.

Az ötvözött minőségi acélokra vonatkozó követelmények jellemzően a következők lehetnek: szilárdság, szívósság, szemcsenagyság, nyúlás. Az ötvözött minőségi acélok felhasználásában lényeges, hogy nem igazán alkalmasak nemesített vagy a kopásállóság javítása céljából felületi edzett alkatrészek anyagaként. Az ötvözött minőségi acélok alcsoportjai:

- Hegeszthető, finomszemcsés szerkezeti acélok. Ebben az alcsoportban az ötvözetlen acélok ötvözőtartalmának felső határértéke kissé nagyobb, pl. Cr, Cu, Ni = 0,50%, Nb = 0,08%, Ti, V, Zr = 0,12%, Mo = 0,10%.
- Sínacélok, szádacélok, bányatámacélok.
- Finomszemcsés, mikroötvözött, nagymértékű hidegalakításra alkalmas, valamint a kettős fázisú acél lapostermékek; a gépkocsik hidegalakított alváz- és burkolatelemei céljára.
- Csak Cu-tartalmukra előírt összetételű acélok.
- Elektrotechnikai célú acélok.

Az ötvözött nemesacélok közé tartoznak: a gépszerkezetek és a nyomástartó berendezések ötvözött acéljai, golyóscsapágyacélok, szerszámacélok, gyorsacélok és a különleges fizikai tulajdonságú (pl. szabályozott hőtágulású) acélok.

– **D) Hőkezeltségi állapot alapján**

- Lágyított acélok: a vas-szén fázisdiagram ausztenites tartományába való hevítés és kellő idejű hőn tartás (ez a homogenizálás) után lassan, többnyire a hőkezelő kemencében hagyva lehűtött acél. *E hőkezelés neve: lágyítás.*
- Normalizált acélok: az ausztenitesítés után nyugvó levegőn lehűtött acélok. *E hőkezelés neve: normalizálás.*
- Edzett acélok: az ausztenitesítést követően gyorsan – vízben, olajban, sófürdőben – hűtve. *Az edzés tehát a gyors lehűtéssel végződő hőkezelés elnevezése.* Az ausztenit az edzés hatására martenzitté válik.
- Nemesített acél: az edzés után 200–600°C-on, *megeresztett*, majd szabadon lehűtött acél. *Az edzés + megeresztés együttesen a nemesítés.* Az edzéssel létrejött martenzit elbomlik, ferrit és vas-karbid elegyévé alakul át.
- Kiválásosan keményített acélok: a megeresztés során a szilárd oldatból létrejövő, diszperz eloszlású kiválások hatására keményedő acélok. Ennek a szilárdságnövelésnek a neve: *kiválásos keményítés.*

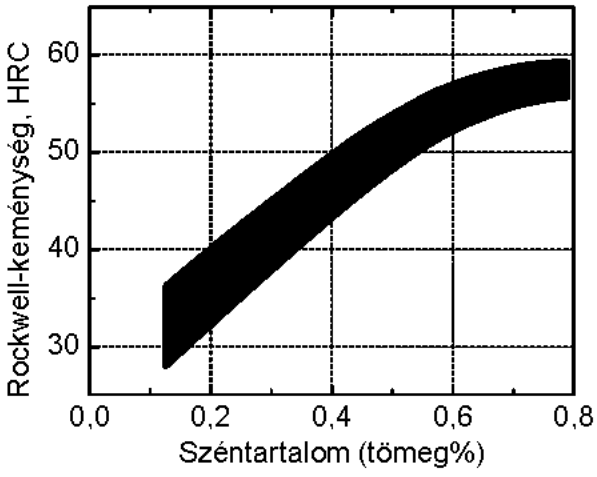
6.1.2. A szén hatása a tulajdonságokra

A szén (C) minden acél alapvető alkotóeleme. A vasban intersztíciósan oldódik, ám oldhatósága a szobahőmérsékleten, a ferritben szinte nulla. További alapalkotó ötvözők a Mn és a Si és alapalkotó szennyezők a S, P, O, N, H.

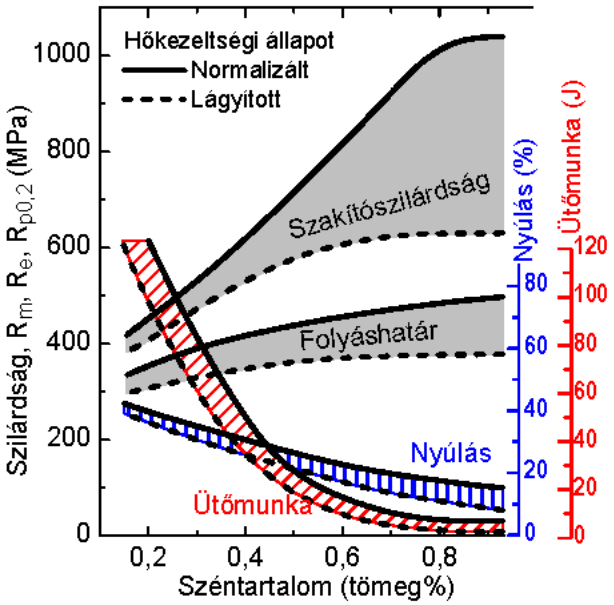
A szén hatása alapvető az acél tulajdonságaira. Az ötvözetlen acél szilárdsági és fizikai tulajdonságait a szövetelemek mennyisége és azok eloszlása, finomsága határozza meg. A szén mennyiségének növekedésével a ferrit-perlites acél szilárdsága nő (több szén → több perlit), ám nyúlása, kontrakciója és ütőmunkája csökken.

A szilárdság legolcsóbban a szénnel növelhető. A szén az acélokban az edzhetőség szempontjából is döntő. A gyakorlatban előállítható hűtési sebességgel (500°C/s) csak a kb. 0,20%-nál nagyobb C-tartalmú acélok edzhetők martenzitesre.

A szén okozta keménység- és szilárdságnövekedés a martenzitesre edzett állapotban sokkal jelentősebb, mint lágyított állapotban; jól szemlélteti ezt a 6-1. és 6.2. ábra. A martenzit keménysége csak a széntartalom függvénye: az acélban lévő ötvözők – amennyiben különleges karbidokat nem képeznek – a martenzit keménységét tovább már nem növelik számottevően. Egy bizonyos C-tartalom (0,8–1%) felett a martenzit keménysége már gyakorlatilag állandó.



6-1. ábra – A széntartalom hatása az ötvözetlen, edzett acélok keménységére



6-2. ábra – A széntartalom hatása az ötvözetlen acélok mechanikai tulajdonságaira

6.1.3. Az ötvözők és szennyezők szerepe

Az oldott elemek többsége a vassal szubsztitúciós szilárd oldatot alkot, viszont a C, B, P, N, O és H az acélban intersztíciósan oldódik.

A periódusos rendszerben a Fe-tól balra eső elemek (Cr, Mo, W, Nb, V, Zr, Ti) a szilárd oldaton kívül a szénnel karbidokat is alkothatnak. A legerősebb karbidképző elemek (V, Zr, Ti). Az acélban oldott nitrogénnel vegyülő ötvözők a nitridképző ötvözők.

A Ni, Si, Co, Al, Cu az acélban karbidokat nem alkotnak, és az oldódás határáig a szilárd oldatban vannak jelen.

Az Al, Ti, Nb, V és B mikroötvözőelemek. Kis mennyiségük (<0,1%) ellenére hatásuk erős, mivel finomszemcsésséé teszik az acélt, és a szemcsefinomítás révén jelentősen növelik a folyáshatárt.

6.1.4. Az ötvözők és szennyezők hatása a vas allotrop átalakulásaira

A vasban oldódó komponensek mennyiségük arányában eltolják – akár jelentősen is – az Fe-C fázisdiagram jellegzetes pontjait, hőmérsékleteit.

Ausztenitképzők

Azoknak az ötvözőelemek a csoportja, amelyek az ausztenitmezőt tágítják az Fe-C fázisdiagramon, ide sorolható: Ni, Mn, Cu, C és N.

Ferritképzők

Az ötvözőelemek másik nagy csoportja, általában karbidképzők is. E csoportba tartozik: Cr, W, Mo, V, Ti, Al, Si, Nb, Al, P stb. Hatásukra az ausztenitmező bezáródik az Fe-C fázisdiagramon.

6.1.5. Az ötvözők és szennyezők hatása a mechanikai tulajdonságokra

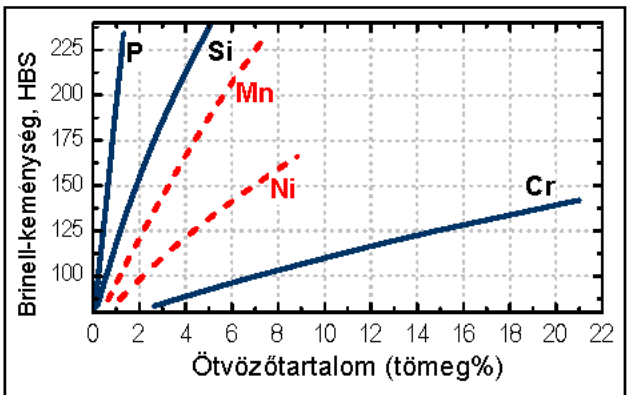
A ferrit szilárdságát legjobban a szubsztitúciósan oldódó ötvözők közül a Ti, Si, Co, W, Mo, Mn és a Ni növeli, de szilárdságnövelő hatásuk meglehetősen mérsékelt. A ferrit szilárdságnöveléséhez szükséges ötvözőmennyiség bevitele az acél árát megnöveli. Az ötvözők piaci árát a Londoni Fémtőzsde folyamatai határozzák meg.

Gyorshűtés esetén (martenzitesre edzés) az ötvözők szilárdságnövelő hatása általában jobban érvényesül. A vasban intersztíciósan oldódó szén hatása a keménység- és szilárdságnövelés szempontjából azonban mégis sokkal jelentősebb, mint a szubsztitúciósan oldódó ötvözőké.

A ferrit szilárdságát legjobban növelő ötvöző, a Si (6-3. ábra), de a szívósságot erősen csökkenti. A Si-ötvözésű acél mindig ridegebb, mint a hasonló szilárdságú, de más elemmel ötvözött acél. Az ötvözőelemek a Si és Mn kivételével a ferrit képlékenységét csak mérsékelten befolyásolják. A ferrit nyúlását, kontrakcióját a Si és nagyobb mennyiségek esetén a Mn is erősen lerontja.

Az ötvözőknek a szívósságra és a *képlékeny–rideg átmeneti hőmérsékletre* való hatása lényeges, amikor valamely gyártmány anyagát kiválasztják. A Ni az egyetlen olyan ötvöző, amely az átmeneti hőmérsékletet csökkenti, így a képlékeny viselkedés hőmérséklet-tartománya – kedvező módon – kisebb hőmérsékletekre is kiterjed. A többi ötvöző és különösen a szennyezők jelentősen növelik az átmeneti hőmérsékletet, amely alatti üzemeléskor az acél ridegtörésre hajlamos.

Az eddig felsorolt ötvözőelemek közül a Ni, a Mn és a Cr tekinthető a leghasznosabbnak: a ferrit szilárdságát érdemlegesen növelve, képlékenységét és szívósságát is javítják, vagy nem rontják. A nikkel azonban viszonylag drága ötvözőelem. A Mn, Si, Al, Ti fontos szerepet kap az acélok gyártásakor, a kohászati tisztítási műveletekben.



6-3. ábra – A fontosabb ausztenitképzők (Ni, Mn) és ferritképzők hatása a ferrit keménységére

6.2. Az ötvözetlen acélok osztályának főbb csoportjai

Az ötvözetlen acélokat melegen vagy hidegen hengerelt, kovácsolt vagy hőkezelt állapotban állítják elő, és a különféle acélszerkezetek alapanyagaként hegesztéssel, képlékenyalakítással vagy forgácsolással megmunkálva dolgozzák fel a lemez, rúd, huzal, cső, profil stb. kohászati termékeket. Valamely acéltípus szabványos jelölése a felhasználási területére és a fő mechanikai tulajdonságaira vagy pedig a vegyi összetételére utal. Az előírások szigorúsága a minőségi szinttel – minőségi acél → nemesacél – növekedik.

Az ötvözetlen acélok osztályának főbb csoportjai és az alkalmazásukra utaló, a jelükben elöl álló, azonosító betűjelek a következők:

- szerkezeti acélok (S),
- nyomástartó berendezések acéljai (P),
- csőtávvezetékek acélanyagai (L),
- gépacélok (E),
- betonacélok vasbetonszerkezetekbe (B),
- feszítőhuzalok vasbetonszerkezetekbe (Y),
- sínacélok (R),
- jól hidegalakítható acéllemezek (D),
- nagyszilárdságú, hidegalakítható acélok (H),
- ónozott acéllemezek csomagolási célra, (T),
- acélok elektrotechnikai célra (M).

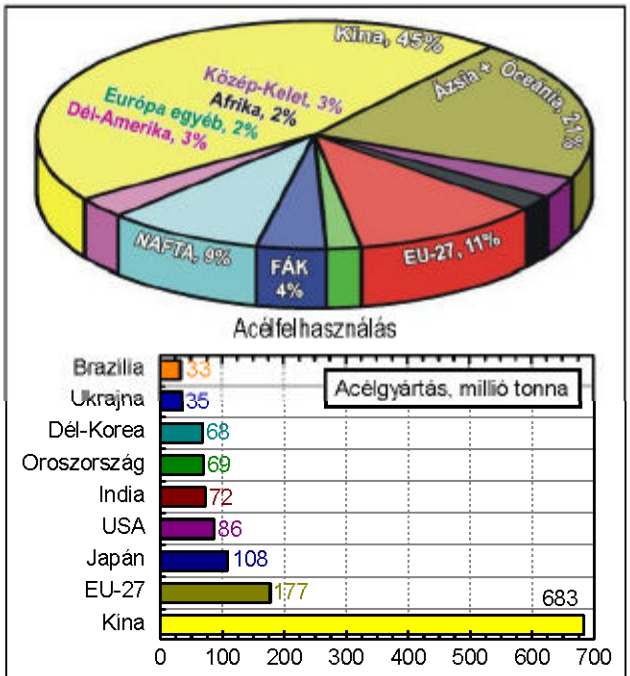
6.2.1. Melegen hengerelt termékek

A világ 2011. évi, 1515 Mt-ás acéltermeléséből 1290 Mt termék készült meleghengerléssel; ennek 45%-át Kína használta fel (6-4. ábra).

Tekintettel a rendkívül széleskörű, általános célú felhasználásra, az egyes típusokra különféle technológiai alkalmasságokat is megadnak a gyártók, mégpedig a következő technológiai vonatkozásokban: hegeszthetőség, hidegalakíthatóság, horganyozhatóság, forgácsolhatóság,

Példa jelölésekre az MSZ EN 10025-2:2005 szabvány szerint:

- S235J0 (számjele: 1.0114). A jelölésben az S az acélcsoportra, a 235 a folyáshatár értékére (R_e > 235 MPa), a J0 az ütőmunkára utal (KV > 27 J 0°C-on); 6-5. ábra.
- S355K2G3 (1.0595): az S az acélcsoportra, a 355 a folyáshatárra (R_e > 355 MPa), a K2 az ütőmunkára utal (KV > 40 J –20°C-on). A G3 kiegészítő jel az acélgyártás műveleteként végzett dezoxidálás módjára utal: (teljesen csillapított).
- E360 (1.0070): az E az acélcsoportra, a 360 a folyáshatárra (R_e > 360 MPa); az ütőmunkára nézve követelmény nincs.



6-4. ábra – A világ acélfelhasználása és acéltermelése 2011-ben. 1970-ben a világ össztermelése: 595 Mt volt; ugyanekkor a világ összes műanyagtermelése 27 Mt, amely 40 év alatt éppen a tizszeresére növekedett. A 2008–2009-es válság hatását az acéltermelésre a 6-1. táblázat adatai jelzik.

	2007	2008	2009	2010
Összes mennyiség	1347	1341	1236	1430
Ebből folyamatos öntéssel	1243	1235	1169	1341
Meleghengerelt termék	1220	1190	1110	1280
Lapostermékek (lemez)	670	665	600	730
Hosszútermékek (rúd, cső)	550	525	510	550

6-1. táblázat: A világ nyersacéltermelésének adatai a 2009-es világválság körüli években (millió tonna)

6-5. ábra – Melegen hengerelt acéllemez tekercsek; anyagminőség: S275JR

6.2.2. Ötvözetlen szerkezeti acélok

Eme acélok felhasználásának lényegéhez tartozik a hegesztéssel való szerkezetgyártás alapkövetelményeinek biztosítása: a kellő szilárdság mellett legyen megfelelő a szívósság és repedésmentes a hegesztett kötés. A legkülönfélébb hegesztett szerkezetek alapanyagai tartoznak e csoportba: épületszerkezetek, hidak stb. Ezek az acélok jellemzően 3–30 mm vastag lemezként vagy tekercselt szalagként készülnek, és meleghengerléssel gyártják őket. Az MSZ EN 10025-ös szabványsorozat rögzíti fő csoportjaik követelményeit.

A jó hegeszthetőség miatt az ötvözetlen acélok C-tartalma legfeljebb 0,13–0,20%, így viszont nem használható ki a szén szilárdságnövelő hatása. A kellő szilárdságot mikroötvözők (Al, Ti, Nb, V) biztosítják, amelyek finomszemcsésséé teszik az acélt. A ridegtöréssel szembeni ellenállást is javítja a finomszemcsés mikroszerkezet. Az ebbe a kategóriába sorolt acélokra a gyártók garantálják a Charpy-féle ütőmunka 27 J vagy 40 J értékét különféle hőmérsékleteken. A hegeszthetőséget az ötvözőtartalom alapján minősítik, meghatározva a CE / CEV / CET szénegyenértéket; CE ≤ 0,40 esetben az acél kiválóan hegeszthető.

A meleghengerlés típusa szerint két csoportra oszlanak a finomszemcsés acélok: normalizáló vagy termomechanikus hengerléssel gyártottak.

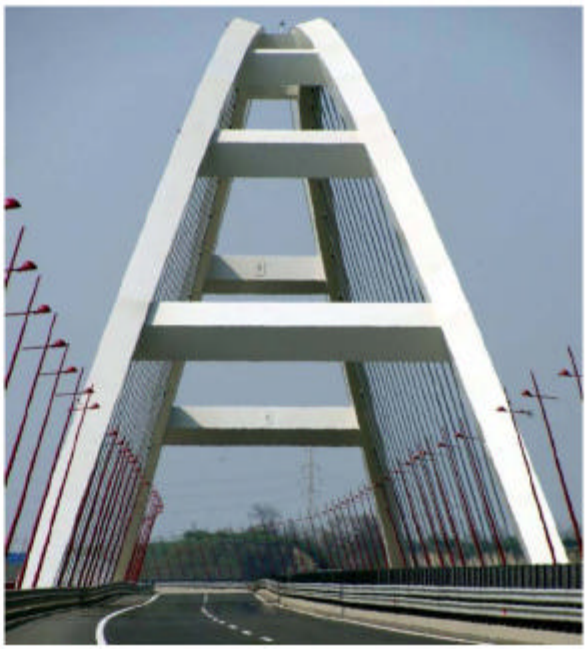
– **Normalizáló hengereléssel gyártott acélok**

A normalizálásról a 6.1.1. szakaszból már tudjuk, hogy olyan hőkezelést jelent, ahol az acél a megfelelő ausztenitesítés után nyugvó levegőn, szabadon hűl. A normalizált acélok gyártása viszonylag egyszerű kohászati technológiával történik, ezért e termékek ára mindig kisebb, mint a másik kategóriába tartozóké.

Példa: S460NLH (1.8956). Az „S" betű az acélcsaládra, a 460 a folyáshatárra, az „N" betű a normalizált állapotra és a mikroötvözöttségre, az „L" a –50°C-on 27 J-os ütőmunka-előírásra, a „H" pedig a növelt hőmérsékletű alkalmazhatóságra utal.

– **Termomechanikusan hengerelt acélok**

A termomechanikus hengerlés különleges eljárás: gondosan összehangolják a többlépéses hengerlés okozta alakváltozásokat – ezeket nevezik szúrásoknak – és azok hőmérsékletét. E korszerű acélok jellemzője, hogy sokkal jobban ellenállnak a dinamikus és ismétlődő terheléseknek, mint a hagyományos technológiával készültek. Példa: S275ML / 1.8819, S460M / 1.8827 (6-6. ábra). Az „M" betű jelzi a termomechanikus hengerlést.



6-6. ábra – A 2007-ben felavatott Pentele-híd Dunaújvárosnál. A merevítőtartó 30 mm-nél vastagabb elemei S355K2G3 acélból készült, a többi S355J2G3 típusúból. Az ívtartó csatlakozásainál a főtartó egyes szakaszai, az ívtartók övlemezei és gerincei (az MSZ EN 10025-4: 2005 szabvány szerinti) S460ML acélból készültek

– **Nagy folyáshatárú, nemesített vagy kiválásosan keményített acélok**

A finomszemcsés acélok között a különlegesen nagy terhelésnek kitett berendezések alapanyagaként vagy a jelentős tömegcsökkentés érdekében alkalmazzák az ún. nagy folyáshatárú szerkezeti acélokat. Két fő acélcsalád tartozik ebbe a kategóriába a MSZ EN 10137 szabványok szerint:

- a nemesített acélok (6-7. ábra) és
- a kiválásosan keményített acélok.

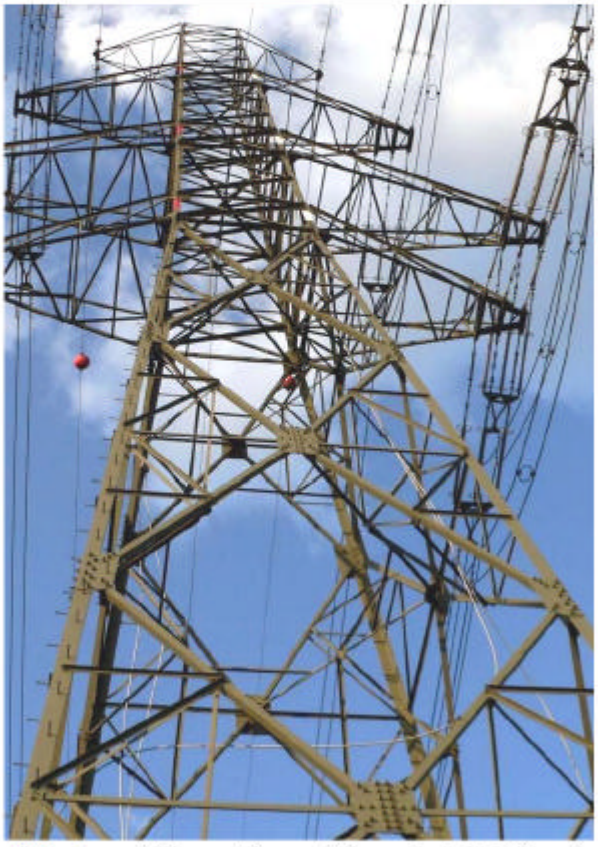
Példa: S620Q (1.8914), S960QL (1.8933), S620A (1.8993). Az S betű az acélcsaládra, a szám a folyáshatárra, a Q a nemesített állapotra, az A a kiválásos keményítésre, az L a –50°C/27 J-os ütőmunkára, a H pedig a növelt hőmérsékletű alkalmazhatóságra utal.

6-7. ábra – Nemesített nagyszilárdságú acélból (S620Q) gyártott daruszerkezet

– **Légköri korrózionak jól ellenálló acélok**

Az 1950-es években fejlesztették ki az első olyan acélfajtákat, amelyekbe 0,25–0,60% Cu-et ötvöztek. A későbbiekben megjelentek a Ni-, P- (foszfor) és Cr-ötvözésű típusok is. Az eredeti neve (weathering steel) alapján időjárásálló acélként is nevezik. Ez az elnevezés is rámutat a fő sajátosságukra, nevezetesen, hogy a szennyezett ipari és a tengeri atmoszféra hatására gyorsan rozsdásodó szerkezeti acélokkal szemben jóval lassabban rozsdásodnak. Alkalmazási területük ennek megfelelő: villamos-távvezetékoszlopok (6-8. ábra), tengerparti acélszerkezetek, de a talajba fektetett melegvízcsövek stb. anyagaként is alkalmazzák.

Példa: MSZ EN 10025-5 – S355J2WP+AR (v. MSZ EN 10025-5 – 1.8946). Az S jelzi, hogy szerkezeti acél, a 355 a minimális folyáshatár, a J2 az ütőmunka-kategória (27 J –20°C-on), a W utal a légkörikorrózió-állóságra, a P pedig a növelt foszfortartalomra (0,06–0,15%). A „+AR" kiegészítő jel (AR, angolul: as rolled) azt jelenti, hogy semmilyen előírás nem vonatkozik a hengerelt szállítási állapotra; ha helyette +N jel áll, az arra vonatkozik, hogy normalizáló hengerléssel gyártott lemezről van szó.



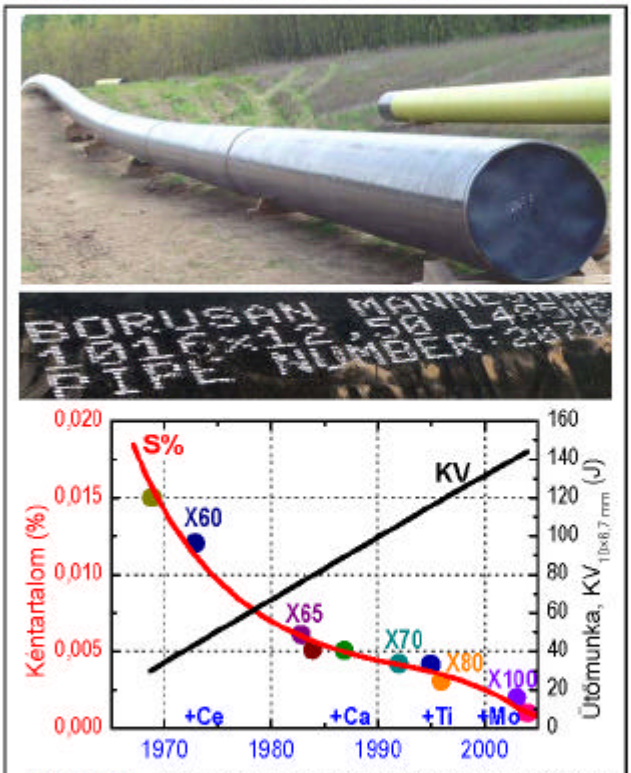
6-8. ábra – Villamos távvezetéki oszlop légköri korrózióálló acélból. Az oszlopok acélszerkezetét nem hegesztéssel építik, hanem csavarozással (a gyártásról lásd az Ovit Zrt. Honlapjának videotárát)

6.2.3. Csőtávvezetékek acél alapanyagai

A kőolaj és a földgáz szállítására szolgáló csővezetékrendszerek az elmúlt 100 évben szinte behálózták a Földet. A szakértői becslések szerint mintegy 3,5 millió km-re tehető jelenleg a csővezetékek összegzett hossza*, amelynek kétharmada földgáz szállítására szolgál. A GlobalData 2010-es becslése szerint ez a hálózat közel 105 ezer km-rel bővül 2015-ig, amelynek felét öt ország, Oroszország, India, USA, Kína és Kanada fogja megépíteni. A csővezetékacélokat a szabvány MSZ EN 10208-2:2009 (Acélcsövek éghető cseppfolyós anyagok csővezetékeihez) 3 csoportba s azon belül ötvözött vagy ötvözetlen alcsoportba sorolja:

- normalizált; pl. L290NB (1.0484, illetve X42),
- nemesített; pl. L450QB (1.8952, illetve X65),
- termomechanikusan hengerelt; pl. L555MB (1.8978, ill. X80 az API 5L szabvány szerint).

A gyakran akár 1 m átmérőjű csövek fontos gyártási módja a fedett ívű hegesztés: spirálvarratos vagy hosszvarratos kivitelben egyaránt készülhetnek, és helyszíni szerelésük is hegesztéssel történik. Mind a hegesztés, mind az üzembiztonság szempontjából jelentős a megfelelő szívósság, amelyet a szemcsefinomító mikroötvözés és a S-tartalom csökkentése biztosít (6-9. ábra).



6-9. ábra – Csővezetékszakasz és anyagának jelölése (L485MB). A diagram: a kéntartalom-csökkentés fejlődése és hatása a szívósságra az API 5L szabványban

* *Hopkins P: Oil and gas pipelines: Yesterday and today. 2007, International Petroleum Technology Institute (ASME)*

6.2.4. Nyomástartó berendezések acéljai

A nyomástartó berendezések – pl. a 6-10. ábrán látható tartályok, palackok, tűzoltó készülékek stb. – jellemzője, hogy nagynyomású gázt vagy folyadékot tárolnak, ill. szállítanak bennük. Külön jelentőséget kap az a körülmény, hogy a tárolt közeg fűtött vagy nem fűtött. Ez utóbbi esetben a tartályok, palackok fő terhelése csak a nagy belső nyomás. Nyilvánvaló, hogy a szerkezeti anyagaik üzembiztonsága alapvetően fontos, hiszen robbanásveszélyes berendezések közé tartoznak. Tucatnyi szabvány tartalmazza a nyomástartó edény célra alkalmazható, tíz főcsoportba sorolt különféle szerkezeti anyagok követelményeit, magát a rendszert pedig egy önálló szabvány – az MSZ EN 13445-2:2009 Nem fűtött nyomástartó edények. 2. rész: Szerkezeti anyagok – teszi áttekinthetőbbé. Az ötvözetlen acélok már felsorolt tíz főcsoportjából négy acélcsoport tagjaira nézve több szabványsorozat rögzíti a szállítási jellemzőiket: pl. az MSZ EN 10207:2005 „Acélok egyszerű nyomástartó edényekhez", és az MSZ EN 10028-as szabványsorozatnak („Lapos acéltermékek nyomástartó berendezésekhez") az ötvözetlen acélokra vonatkozó tagjai. A csövekre külön szabványok vonatkoznak.

Hasonlóan a finomszemcsés acélokhoz (amelyek jelének első betűje „S"), az e kategóriába sorolt, „P"-vel kezdődő jelű acélok is ugyanolyan csoportokra oszlanak, mint a hegeszthető, finomszemcsés acélok. Ez nem véletlen, ugyanis e termékek esetében is a hegesztés a legfontosabb feldolgozási technológia. A leglényegesebb eltérés az, hogy a „P" jelű acélok megengedett kéntartalma kisebb, jellemzően: S=0,015–0,025%.

Példák:

- P245NB (1.0111, az EN 10120:2009-ba tartozik). A „P" a csoportjel („nyomástartó"), az „N" a normalizált állapot jele, a „B" arra utal, hogy gázpalack-alapanyagról van szó.
- P275SL (1.1100 és néha SPH275). Az „S" betű a hajóépítésre való alkalmasságot, az „L" a –50°C-os ütőmunkát jelöli.
- P355H (1.0473). A „H" a növelt hőmérsékletre való alkalmasságot jelzi.
- P460NL2 (1.8918). Az „N" a normalizált állapotra és a mikroötvözöttségre, az „L2" pedig arra utal, hogy az ütőmunkát tekintve többféle kritériumnak is megfelel.
- P420M (1.8824). Az „M" kiegészítő jel a termomechanikus alakítás mutatója.
- P690Q (1.8879). A „Q" a nemesített állapotra utaló kiegészítő jel.

Megjegyzendő, hogy kiválásosan keményített típusokat (kiegészítő jel: „A") ez az acélcsoport nem tartalmaz.

6-10. ábra – Nitrogén és argon tárolására szolgáló tartályok (felső kép). Fogyóelektródás, védőgázos ívhegesztési munkahely berendezései, közte a szén-dioxid védőgáz tárolására szolgáló gázpalackkal (P355NB)

6.2.5. Betonacélok és feszítőhuzalok

A betonacél a legnagyobb mennyiségben felhasznált építőanyagnak, a vasbetonnak (amely társított anyag) alapvető összetevője. A hazai betonfelhasználás 2007-ben kb. 7 Mm^3 volt, amelyhez 250 ezer tonna betonacélt használtak fel.

A betonacélok alapanyaga legfeljebb 0,2% széntartalmú ötvözetlen acél hengerhuzal. A széntartalmat a hegeszthetőség miatt korlátozzák. A huzal átmérője akár 32 mm, felülete sima vagy bordázott. Szilárdsági kategóriák szerint forgalmazzák. A beton tapadását a bordázat mechanikusan segíti. A bordákat főleg meleghengerléssel hozzák létre (6-11. ábra). A hidegalakítás jellemzően a bordázatnak hidegalakítással való elkészítését jelenti. A vasbeton károsodása jelentősen összefügg a benne lévő betonacél korróziójával.

6-11. ábra – Melegen hengerelt, bordázott betonacél. Vasbetonháló a vásárosnaményi Tisza-hídon. Sós hólé okozta korrózió és gerendarepedés az *Allee* épülettömb parkolószintjének födémjén

A hegesztéssel készített vasbetonhálók anyagainak követelményei között a hegeszthetőség mellett fontos a hajlíthatóság is. A feszítettbeton-szerkezetek feszítőhuzaljainak szakítószilárdsága 1200–2000 MPa, nyúlása 8–2%.

A betonacélok főbb típusainak követelményeit a következő szabványok tartalmazzák:

- Hegeszthető betonacél, MSZ EN 10080-2005. Példa: B500A (1.0438) a B betű utal az acélcsaládra, a folyáshatár 500 MPa.
- Melegen hengerelt betonacél, MSZ 339-87.
- Hidegen alakított betonacél, MSZ 982-87.
- Feszítőhuzal feszített vasbeton szerkezetekhez (MSZ 5720:1993).

  A még csak tervezet állapotú EN 10138 szerinti jelölési példák: Y1770C, Y1230H; a szám a folyáshatár minimumát jelöli.

6.2.6. Automataacélok

A nagyteljesítményű és forgácsolási sebességű automata forgácsológépeken történő megmunkálások során a kis széntartalmú acélok forgácsolásakor keletkező hosszú, összefüggő forgács akadályozza a megmunkálást, növeli a szerszám igénybevételét, ronthatja a felületi minőséget. A forgácsolhatóság terén kedvező viselkedésű automataacélok sok terméknél (pl. csavarok) megfelelnek a felhasználónak, ugyanis nem mindenkor döntőek a mechanikai követelmények. A töredezett forgács (6-12. ábra) létrehozását az acél törékenységét fokozó elemek hozzáadásával érik el. A kén (0,03–0,4%), foszfor (0,06–0,11%) ólom (0,15–0,30%), tellúr (Te), szelén- (Se) és bizmut (Bi) erősen rontják a szívósságot, és az automataacélok korrózióra is fokozottan hajlamosak.

Példák: MSZ EN 10277-3:2008 és az MSZ EN 10087:1999 alapján: 11SMnPb30 (1.0718), 46S20 (1.0727).

6-12. ábra – Csavaranyák és alátét automataacélból, valamint előnytelenül hosszú és jól töredezett forgács

Az ötvözetlen acélok osztályának főcsoportjai közül a nagyszilárdságú, hidegalakítható (H kezdőbetűvel jelölt) acélokat a 16. fejezetben tekintjük át röviden. Az élelmiszeripari csomagolási célra használt ónozott acéllemezeket, valamint az elektrotechnikai célra szolgáló acélokat ez a könyv nem tárgyalja.

6.2.7. Gépacélok

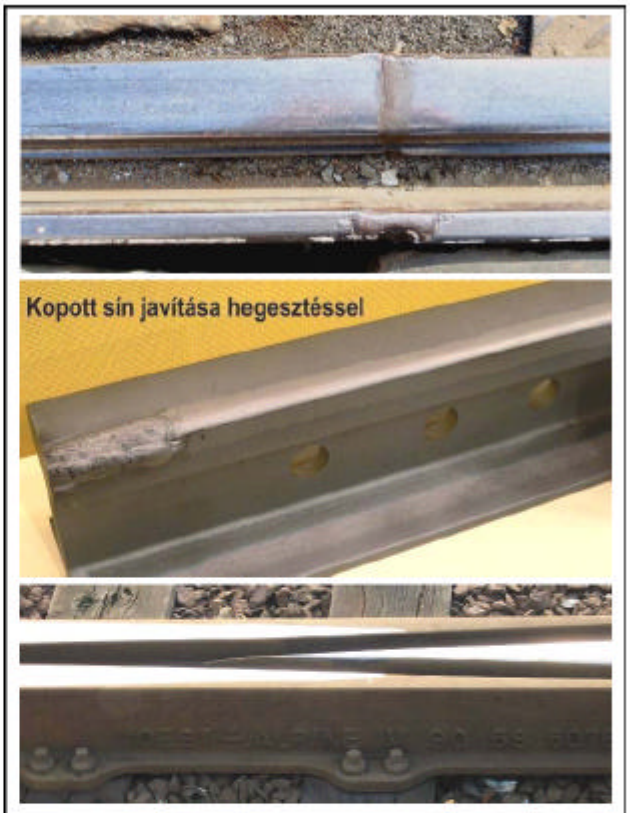
Az MSZ EN 10025-2 szabványba sorolt gépacélok körében (pl. E295, E335, E360) a gyártók csak a szilárdsági jellemzőket – folyáshatár, szakítószilárdság – garantálják, ezért csak olyan alkalmazásokban használhatók, ahol nincs szívóssági követelmény. Kivételt képez ez alól, ha nem lemez, hanem varrat nélküli cső készül a gépacélból, pl. az MSZ EN 10296-1 szerinti E355K2 és E730K2 acélok. A gépacélokat gyakran használják az MSZ EN 10293 szabványban meghatározott acélöntvényekhez, pl. GE240, GE300; a jelölésben a G betű utal arra, hogy az alkatrész öntvény; pl. a 6-13. ábrán látható, szelepzárókerék.

6-13. ábra – Szelepzárókerék gépacélöntvényből

6.2.8. Sínacélok

Az MSZ EN 13674 szabványsorozat fogalmazza meg a vasúti sínek műszaki követelményeit a szakítószilárdság, a keménység, a hőkezeltségi állapot, az összetétel és a kopásállóság terén. A sínacélok kivétel nélkül nagy C-tartalmúak (0,5–0,9%). A 19. századi vasútépítés óriási lökést adott az acélipar globális fejlődésének. A korszerű sínacélok a tisztaság (S < 0,01%), a szívósság és a keménység terén fejlődtek nagyot.

A jelölésben a HBW Brinell-keménység elvárt értékét találjuk, pl. R200, R260Mn, R320Cr, R350LHT. A sínek anyaga nagy széntartalmú acél, ezért kötőhegesztésük és a kopások miatti rendszeres javítóhegesztésük nagyon kényes feladatot jelent (6-14. ábra).



6-14. ábra – Hegesztett vasúti sínek és csúcsbetét

6.2.9. Jól hidegalakítható acéllemezek

A vékony acéllemezekből vagy szalagokból való alkatrészgyártás fontos gyártási eljárása a mélyhúzás, a profilos hengerlés. A járművek alváz- és karosszériaelemei, edények, fal- és tetőburkolatok, csövek, védőkorlátok stb. készülnek ezekből az acélokból. A lemezek, csövek acél alapanyagának a jó hidegalakíthatóság mellett fontos követelménye még a horganyozhatóság (6-15. ábra) vagy / és a zománcozhatóság.

Példák: DD14 (1.0389) MSZ EN 10111), DC03 (1.0347) MSZ EN 10130, DX51D+Z (MSZ EN 10327).

6-15. ábra – Hidegalakított, horganyzott gyártmányok

7. fejezet
Ötvözött acélok

Gáznotor-tengelykapcsoló kovácsolt fogaskereke

7. Ötvözött acélok

7.1. Nemesíthető acélok

A jelentős igénybevételű gépalkatrészek (tengelyek, hajtóműalkatrészek, fogaskerekek stb.) anyagául olyan acélt kell választani, amelynek nagy a folyáshatára, nagy a kifáradási határa és nagy szívóssága révén jól ellenáll a dinamikus igénybevételeknek. A szilárdsági és szívóssági tulajdonságok legjobb összhangja a nemesíthető acéloknál jelentkezik: a folyáshatáruk gyakran eléri a szakítószilárdság 90%-át, miközben a nyúlásuk és az ütőmunkájuk is kedvező marad.

Mindez a nemesített szövetszerkezetnek köszönhető: az edzést követő megeresztés hatására a martenzitből kiváló finom, diszperz eloszlású vas-karbid szilárdságnövelő hatása csaknem pótolja a martenzit fázis eredeti, nagy szilárdságát, de a közben kialakuló ferritmátrix „gondoskodik" a szívósságról. A nemesíthető acélok C-tartalma az edzhetőség miatt minimum 0,2%. Több szabványosított csoportjuk is ismeretes, pl.:

- ötvözetlen nemesíthető acélok, amelyeket az MSZ EN 10083-2:2006 szabvány ismertet,
- ötvözött nemesíthető acélok, amelyeket az MSZ EN 10083-3:2006 határoz meg,
- a nemesíthető hidegen hengerelt keskenyszalagokat a 10132-3:2000 szabvány tartalmazza.

7.1.1. Ötvözetlen nemesíthető acélok

Az ötvözetlen nemesíthető acélokban a Cr-, a Mo- és a Ni-tartalom összege előírásszerűen nem lehet több, mint 0,63%. Az acéltípusok jelölésében – pl. C22E, C60 – a C betű után a névleges, százalékos széntartalom értékének 100-szorosa áll. A nemesített állapotra jellemző kedvező mechanikai tulajdonságokat az ötvözetlen nemesíthető acélok csak kis vastagságban, átmérőben (12– 30 mm-ig) biztosítják, mert a nemesített állapot csak a legalább 50%-ban martenzitesre edzhető vastagságig vagy átmérőig érhető el.

A nemesíthető acélok tulajdonsága az átedzhető szelvényátmérő, amelyet kísérleti úton vagy számítással lehet meghatározni. Emellett lényeges a hidegvághatóság és a hidegforgácsolhatóság: a gyártás közbeni feldolgozhatóság érdekében. A kisebb C-tartalmú típusok kis igénybevételű tengelyek, fogaskerekek, fáradásnak kitett csavarok anyagai. A nagyobb széntartalmú típusok nagyobb terhelésű forgó gépalkatrészek anyagai. Példa: C35 (1.0501), C45E (1.1191), C45R (1.1201). Az E, ill. az R betű a S-tartalom előírása szerinti eltérésre utal: S < 0,030%, illetve S = 0,020–0,035% (lásd a 7-1. ábrát).

7-1. ábra – Ötvözetlen nemesíthető acélból hajlítással, forgácsolással és kovácsolással készített gyártmányok

7.1.2. Ötvözött nemesíthető acélok

– **Mn-ötvözésű**

A Mn (1,4–1,65%) az átedzhető átmérőt erősen növelő és igen olcsó ötvöző. Közepes igénybevételű alkatrészek (ékek, reteszek, fogaskerekek) anyagai. A szabvány egyébként az ötvözetlen nemesíthető acélok közé sorolja.

Példa: 28Mn6 (1.1170; 0,28% C, 1,5% Mn).

– **Cr-ötvözésű**

A nemesíthető acélok leggyakoribb ötvözője a Cr. Erősen növeli az átedzhető szelvényátmérőt. Közepes igénybevételű hajtóműalkatrészek és tengelyek gyártására használják. A forgácsolhatóság javítására a kéntartalom 0,1%-ig is mehet, ill. Pb-ot is tartalmazhat az acél. A jelölésben a fő ötvöző utáni S betű utal erre. Példa: 46Cr2 (1.7006; 0,46% C, 0,5% Cr), 46CrS2 (1.7025).

– **Cr-Mo ötvözésű**

A nagy szilárdság mellett kedvező szívósság érhető el. Közepes méretű, jelentős fárasztó és ütésszerű igénybevételnek kitett alkatrészek, pl. vastag tengelyek, belsőégésű motorok főtengelyek, hajtórudak, vezértárcsák, felületedzhető fogazott alkatrészek anyaga (7-2. ábra).

Példa: 25CrMo4 (1.7218; 0,25% C, 1% Cr, 0,2% Mo).

– **Cr-V ötvözésű**

Felhasználási területe az előző csoportéval azonos, azoknál olcsóbbak, de szívósságuk kisebb. Nagyszilárdságú csavarok, csavarkulcsok, tengelyek, hajtórudak gyártására használhatók.

Példa: 51CrV4 (1.8159; 0,51%, C, 1,1% Cr, 0,12% V + Pb a forgácsolhatóság javítására).

– **Cr-Ni-Mo, Ni-Cr és Ni-Cr-Mo ötvözésű**

A Ni javítja az átedzhetőséget s a szívósságot. Nagyméretű daraboknál, ahol a gyors hűtést nehéz megvalósítani, a Ni-Cr-Mo ötvözésű acélokat használják. E típusokat nagyméretű és nagy dinamikus terhelésű berendezések, pl. hajómotorok, gázmotorok, kovácssajtók forgattyús tengelyének és más tengelyeinek anyagaként használják (7-3. ábra). Példa: 36NiCrMo16 (1.6773; 0,36% C, 3,80% Ni, 1,70% Cr, 0,30% Mo).

– **Bórral ötvözött (Mn-B, Mn-Cr-B) acélok**

Nagyon alkalmas a hidegalakítással feldolgozott, ill. a nagy alakváltozásnak kitett alkatrészek anyagaként. Különleges hőkezelésre is alkalmas.

Példa: 30MnB5 / 1.5531, mely 0,0030% bórt tartalmaz (7-2.e ábra), 39MnCrB6-2 (1.7189).

7-2. ábra – Termékek ötvözött nemesíthető acélból

Nagyszilárdságú lánc

Hajtómű

7-3. ábra – Termékek ötvözött nemesíthető acélból

7.2. Betétben edzhető acélok

A főként nagy koptatóhatásnak kitett fogaskerekek, tengelyek cementálásával (ausztenites állapotba hevítés széndús környezetben) a felületközeli réteg széntartalma jelentősen megnövelhető, és az ezt követő edzéssel (betétedzés) nagy felületi keménység érhető el (7-4. ábra). A kis igénybevételű, de erős kopásnak kitett gépalkatrészek ötvözetlen, kis széntartalmú, de cementálással kérgesíthető acélból készíthetők. Több szabvány fogja át a lapos-, a fényes, a huzal- és a keskenyszalag termékek követelményeit: MSZ EN 10084:2008, MSZ EN 10277-4:2008, MSZ EN 10263-3:2001, MSZ EN 10132-2:2000.

Példa: C16E (1.1148), C16R (1.1208): 0,16% C-tartalmú, ötvözetlen típus.

A közepes méretű és igénybevételű darabokhoz (persely, csap, fogaskerekek, bütykös tengelyek) ≈1% Cr-Mn-ötvözésű acélokat használnak. Használatuk 40–60 mm átmérőig javasolt.

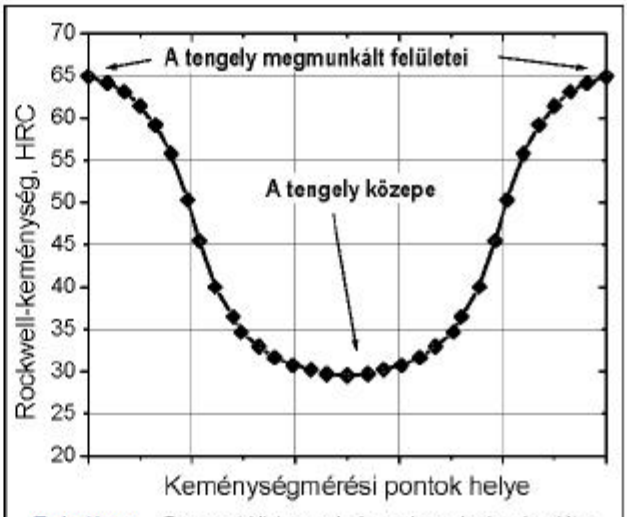
Példa: 20MnCr5 (1.7147), vagy a jól forgácsolható változata, a 20MnCrS5 (1.7149).

A Mn-, Cr- és Mo-ötvözést alkalmazzák a nagyobb méretű (≈ ∅70–80 mm), nagy igénybevételű gépalkatrészek (fogaskerekek, lánckerekek, tengelyek) anyagaként.

Példa: 18CrMo4 (1.7243).

Különlegesen erős dinamikus igénybevételnek kitett alkatrészekhez, ahol a nagy felületi nyomás mellett igen szívós magra van szükség, a nikkellel is ötvözött acélok használhatók. Hajtómű- és vezérműalkatrészek, fogas- és lánckerekek, dugattyú- és forgattyúcsapok alapanyaga.

Példa: 17CrNi6-6 (1.5948).



7-4. ábra – Cementált tengely keménységének változása a keresztmetszet mentén. A cementált kéreg vastagságát az 550HV1 (~52HRC) keménységérték jelöli ki (az MSZ EN ISO 2639:2003 szabvány szerint)

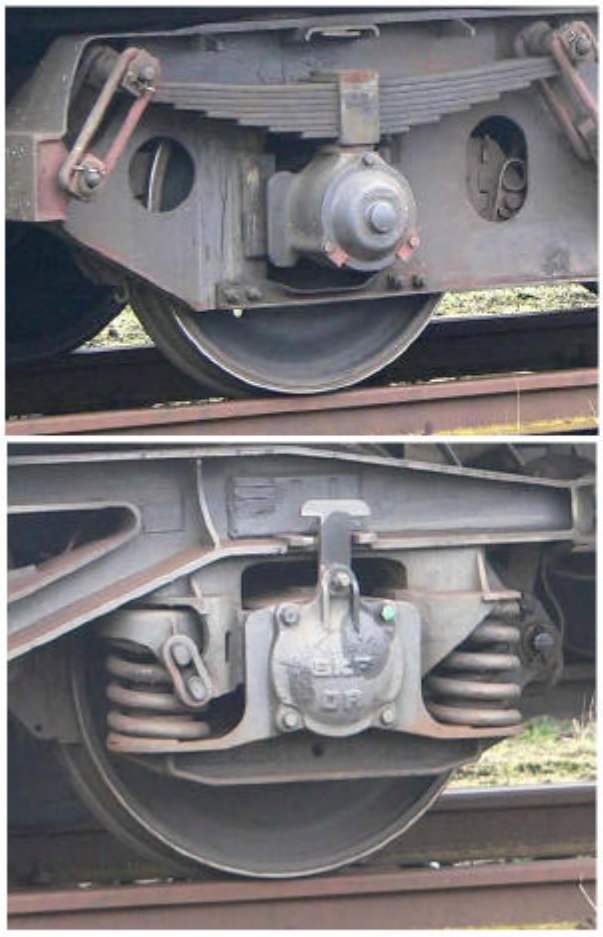
7.3. Rugóacélok

A laprugók, tekercsrugók, torziós rugók, tányérrugók és a csavarrugók (7-5. ábra) igénybevétele összetett és ismétlédő mechanikai feszültség. A rugók – értelemszerűen – az acél alapanyagnak csak a rugalmas tulajdonságait használják ki (energiatárolás, rezgés-, ill. lengéscsillapítás), mivel a maradó alakváltozás nem megengedett. A rugóacélokkal szembeni elvárás kettős: nagy folyáshatár (>1000 MPa), ugyanakkor kellő mértékű szívósság is fontos a törések elkerülése érdekében (a nyúlás 6–8%).

Ezeket a követelményeket csak nemesített állapotban lehet garantálni. A rugóacélok főcsoportjai az ötvözőtartalom szerint a következők:

- ötvözetlen rugóacélok (C = 0,35–1,00%),
- ötvözött rugóacélok (pl. 60CrMo3-3),
- 1,2–2,0% Si-ötvözésű rugóacélok (pl. 46Si7),
- martenzites korrózióálló acélok (9. fejezet).

A különféle rugók anyagaira közel kéttucatnyi szabvány határozza meg a követelményeket; pl. a huzalból készült rugók anyagait az MSZ EN 10270, a laprugókét a 10092 és a 10089 szabványsorozat foglalja össze, de külön szabványok vonatkoznak a vasúti s a repülési alkalmazásokra.

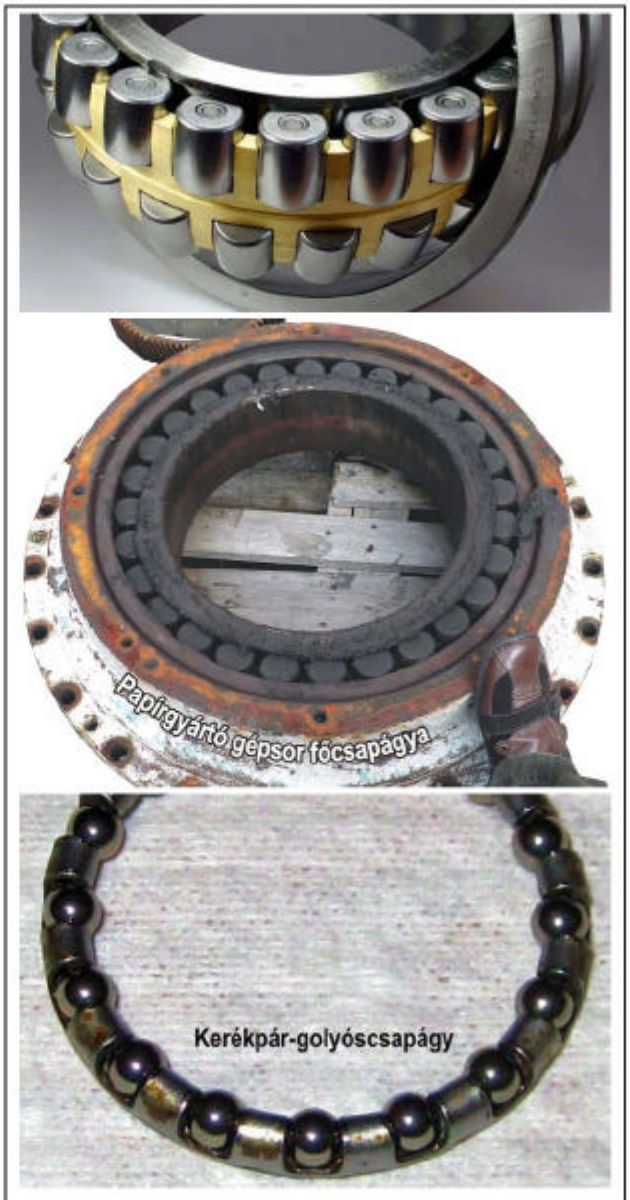


7-5. ábra – Rugóacélok alkalmazási példái

7.4. Csapágyacélok

A gördülőcsapágyak anyagával szembeni legfőbb követelmény a nagy keménység, kopásállóság, kifáradási határ, olykor a melegszilárdság. A keménység 0,85–1,1% C-tartalommal és karbidképző ötvözők hozzáadásával, a nagy kifáradási határ az acél fokozott tisztaságával (a S- és a P-tartalom szigorú korlátozásával) biztosítható. A hőkezelésnél gyakori a mélyhűtéses edzés annak érdekében, hogy a maradék ausztenit mennyiségét minél kisebbre szorítsák, ugyanis az ausztenit idővel martenzitté alakulhat, és ez térfogatnövekedést okoz, fokozva a csapágy kopását.

A gördülőcsapágyak acéljait összegző szabványban (MSZ EN ISO 683-17:2000) sok nemesíthető acél és még több betétben edzhető acéltípus szerepel (13 db). Példa: X82WMoCrV6-5-4 (1.3553), illetve: 17MnCr5 (7-6. ábra).



7-6. ábra – Csapágyacélok alkalmazási példái

7.5. Szelepacélok

Az MSZ EN 10090:2000 „Acélok és ötvözetek belső égésű motorok szelepeihez" szabvány foglalja össze a szóban forgó acélok követelményeit. A belső égésű motorok szelepeire (7-7. ábra) nagy mechanikai, hő- és koptató igénybevétel hat: mindezekkel szemben ellenállónak kell lenniük. Nemesített állapotban, a kiválásos keményítéssel karbidokat is létrehozva használják fel őket. Széntartalmuk emiatt meglehetősen nagy (0,45–0,85%), hiszen a karbidok létrehozásához is szükség van rá. Jellegzetes változataik a Cr-Si és a Cr-Mo-V ötvözésűek, de gyártanak különleges, nitrogénnel erősen ötvözött típusokat is, amint az alábbi példák mutatják.

Példa: X45CrSi9-3 (1.4718)

C	Si	Mn	Cr	Ni
0,4–0,5	2,7–3,3	< 0,6	8–10	< 0,5

Példa: X60CrMnMoVNbN21-10 (1.4785)

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	Nb	N
0,61	<0,25	10,50	21,30	1,10	<1,00	0,95	1,10	0,55

Példa: 17CrNi6-6 (1.5948).

7-7. ábra – Új (fent) és törött (lent) dízelmotorszelepek

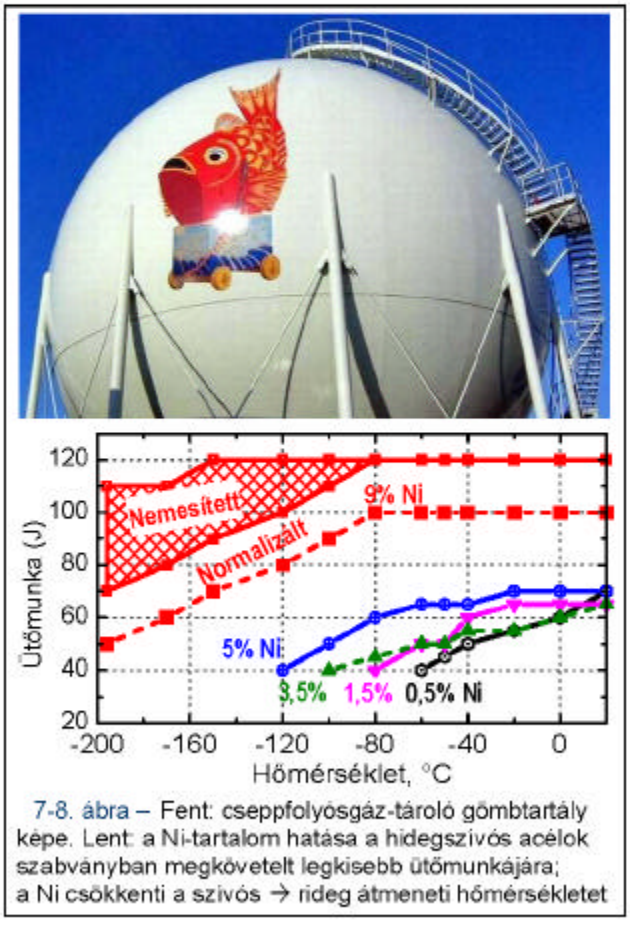
7.6. Hidegszívós acélok

A szóban forgó acélokkal kapcsolatos feltételeket az MSZ EN 10028-4:2009 „Hidegszívós, nikkelötvözésű acélok" szabvány fogalja össze az ún. „lapos acéltermékekre". Ez a megnevezés hengerelt lemezeket, szalagokat takar, és más előírások vonatkoznak a kovácsolt rudakra vagy csövekre, acélöntvényekre.

A hidegszívós acélok sajátos igénybevétele a kis hőmérsékleten ható mechanikai terhelés. A cseppfolyós nitrogén –196°C-os hőmérsékletéig alkalmazhatók, pl. a 7-8. ábrán látható gömbtartály anyagaként. A kis hőmérsékleten üzemelő szerkezetek fokozottan ki vannak téve a *ridegtörés* veszélyének, ezért olyan anyagból kell gyártani ezeket, amelyek ütőmunkája az üzemi hőmérsékleten elegendően nagy. Az elvárt érték 40 J. Az eddig tárgyalt acélok között vannak olyanok, amelyek –40°C-ig alkalmazhatók, ám ennél kisebb hőmérsékletekre már az ötvözött, hidegszívós acélok szükségesek (7-8.b ábra).

A hidegszívósságot – amelyet tekinthetünk egy fontos mechanikai tulajdonságnak is – kétféle módon lehet fokozni:

- a Ni-tartalom növelésével és
- nemesítéssel (edzés + megeresztés).



7-8. ábra – Fent: cseppfolyósgáz-tároló gömbtartály képe. Lent: a Ni-tartalom hatása a hidegszívós acélok szabványban megkövetelt legkisebb ütőmunkájára; a Ni csökkenti a szívós → rideg átmeneti hőmérsékletet

7.7. A melegszilárd acélok

A melegszilárd acélok (másként erőművi acélok v. kazánacélok) rendeltetése alapvetően a hőerőművek kazánjainak, nyomástartó berendezéseinek, csővezetékeinek stb. alapanyagaként való felhasználás, jellemzően 300°C-ig, ritkábban 600°C-ig. A legfontosabb elvárás velük szemben a *melegszilárdság* és a *kúszással szembeni ellenállás*, technológiai oldalról pedig a *hegeszthetőség*.

7.7.1. A melegszilárdság és a kúszásállóság

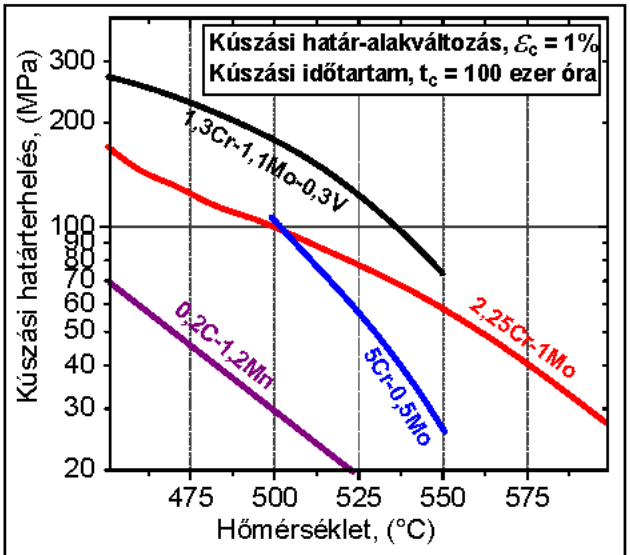
A melegszilárdság egy olyan mechanikai tulajdonság, amely az R_{eH} vagy az $R_{p0,2}$ folyáshatárnak valamely értékét egy adott hőmérsékleten garantálja. Pl. az EN 10028-2:2009 szabvány szerinti 16Mo3 típusú acélra (rövid jel: 1.5415) a folyáshatár normalizált állapotban 270 MPa, 250°C-on 200 MPa, 500°C-on pedig 140 MPa.

A kúszással szembeni ellenállás ismérveit a 3.3.9 szakasz ismerteti. A szóban forgó acélra az 1% # 100 000 órás kúszáshatár 450°C-on 167 MPa; ha a hőmérséklet 500°C-ra nő, akkor a megengedhető terhelés már csak 73 MPa lesz.

7.7.2. A melegszilárd acélok főbb csoportjai

A csoportosítás alapját az ötvözők fajtáihoz és azok mennyiségéhez kötjük, bár a szabványosítás nem mindig ezt a módszert követi*. A melegszilárd acéloknál a Cr és a Mo a két alapvető ötvöző, de „nélkülözhetetlen” ötvözőnek az utóbbi számít: már kb. 0,3% Mo is erőteljesen gátolja a kúszást (7-9. ábra). A harmadik alapvető ötvöző a vanádium. Az említett három ötvöző: erős karbidképző: diszperz karbidokat képezve és perlitmentessé téve a mikroszerkezetet, fékezik a kúszási alakváltozásokat (a diszlokációcsúszást és a szemcsehatárok egymáson való elcsúszását).

Természetesen a karbidképződéshez szükséges szenet is tartalmazzák az ötvözött melegszilárd acélok, de a 0,18%-ot csak olyan típusokban (csavar alapanyagok) haladja meg a C-tartalom, amelynél nem követelmény a hegeszthetőség.



7-9. ábra – Különféle melegszilárd acélok kúszáshatára a hőmérséklet függvényében

– Ötvözetlen melegszilárd acélok

Az összes felhasználásnak kb. a 40%-át ezek az acélok teszik ki, mégpedig főleg a költségtakarékossági megfontolásokból. Valójában a 6.2.4. szakaszban már ismertetett acélcsaládba tartozó acélok ezek is, pl. P235GH (1.0345), P355GH (1.0473). Figyelemre méltó, hogy a kén 0,01%, a Cr + Cu + Mo + Ni pedig 0,7% lehet legfeljebb.

Melegszilárdságukat 400°C-ig írja elő a szabvány, az ötvözött típusokét 450 vagy 500°C-ig. Az 1% maradó alakváltozáshoz tartozó kúszáshatárt és a töréskor mérhető kúszási szilárdságot 380–500°C-on, az ötvözött típusoknál pedig 600°C-ig írják elő.

– Ötvözött melegszilárd acélok csoportjai

- Mo-ötvözésű acélok, Mo ≈ 0,3%;
  pl. 16Mo3 (1.5415).
- Cr-Mo acélok, Cr < 2,5%, Mo < 1,1%;
  pl. 12CrMo9-10 (1.7375) vagy a legelterjedtebb típus, a 13CrMo4-5 (1.7335).
- Cr-Mo-V ötvözésű acélok,
  Cr ≈ 2,0–2,5%, Mo ≈ 1,0%, V ≈ 0,3%, továbbá B- és Ca-mikroötvözés és S < 0,005%;
  pl. 13CrMoV9-10 (1.7703).
- Ni-, Ni-Cu ötvözésű típusok; Ni = 0,6–1,2%;
  15NiCuMoNb5-6-4 (1.6368).
- Nagy Cr-tartalmú típusok, Cr = 5% vagy 9%;
  X12CrMo5 (1.7362) és X10CrMoVNb9-1.
- Növelt C-tartalmú, Cr-Mo-V ötvözésű acélok kötőelemekhez (csavarokhoz), C = 0,4%;
  pl. 40CrMoV4-6 (1.7711).
- További ötvözőket, főleg karbidképzőket (W, Ti, B, Nb Ni, Mn) tartalmazó acélok kötőelemekhez;
  pl. 20CrMoVTiB4-10 (1.7729).

---

* *A hatályos és fontosabb melegszilárdacél-szabványok:*
MSZ EN 10028-2:2009 – Lapos acéltermékek nyomástartó berendezésekhez. 2. rész: Ötvözetlen és ötvözött acélok növelt hőmérsékleten előírt tulajdonságokkal
MSZ EN 10269:20027 – Melegszilárd és/vagy hidegszívós acélok és nikkelötvözetek kötőelemekhez
MSZ EN 10273:2008 – Melegszilárd, hegeszthető acélból melegen hengerelt rudak nyomástartó berendezésekhez
MSZ EN 10302:2008 – Melegszilárd acélok, nikkel- és kobaltötvözetek

7.7.3. A melegszilárd acélok alkalmazása

A melegszilárd acélok kiválasztásának legfontosabb szempontja az üzemi hőmérséklet. Minél nagyobb ennek az értéke, annál inkább növekedik a termikus igénybevétel, mégpedig:

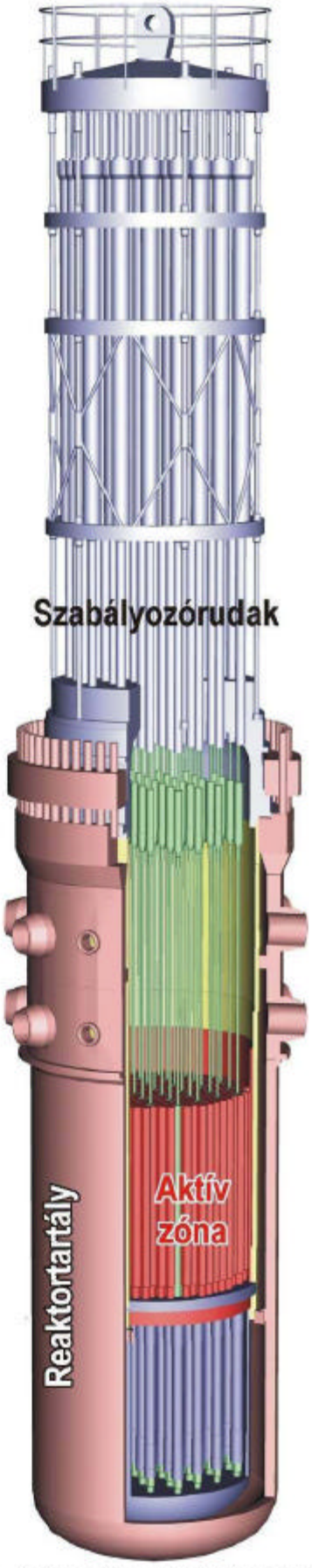
- 370°C felett a kúszás.
- 450°C felett a grafitosodás. Ez olyan termikus károsodás, amely a ferrit-perlites acél perlitjében a vas-karbidnak (cementit) a ferritté + grafittá való elbomlásával jár. Ettől erősen leromlanak mind a szilárdsági, mind pedig a szívóssági tulajdonságok,
- A diszperz eloszlású karbidok durvulása, és az ezzel járó szemcsedurvulás.
- Termikus fáradás (hőfáradás) stb.

Az üzemi hőmérséklet növekedésével jellemzően egyre nagyobb ötvözőtartalmú acéltípusokat választanak, és külön is figyelembe veszik egyik oldalról azt, hogy milyen korróziós igénybevétel várható: víz, nedves gőz, száraz gőz, füstgáz, hidrogéntartalmú közeg stb., másrészről pedig a méreteket, és a gyártástechnológia sajátosságait, pl. azt, hogy elvégezhető-e hőkezelés a kész szerkezeten, gyártmányon.

A jellegzetes gyártmányok: nyomástartó edények, tartályok, varrat nélküli hőcserélőcsövek, csőszerelvények (7-10. ábra), kazánalkatrészek, turbinaházak, turbinafőtengelyek, hőcserélők, atomerőművi reaktortartályok stb. (7-11. ábra).

7-10. ábra – Csővezetéki csőszerelvények: karima, csavarok, toldó, szűkítő

A melegszilárd acélokból készített berendezések gyártásában kitüntetett szerepet játszik a hegesztés. Mivel ezeknek az acéloknak a szénegyenértéke (lásd a 6.2.2. szakaszt) jóval meghaladhatja a CEV = 0,40 értéket, hidegrepedési hajlamuk miatt a hegesztésükre kitüntetett figyelmet kell fordítani.



7-11. ábra – A Paksi Atomerőmű VVER-440/V-213 típusú reaktorának vázlata. A reaktortartály anyaga Cr-Mo-V ötvözésű melegszilárd acél

7.8. A hidrogénnyomás-álló acélok

A hidrogénnyomás-álló acélok olyan berendezések alapanyagai, amelyekben a nagynyomású és nagy hőmérsékletű közegből atomos hidrogén juthat a szerkezeti anyagba. A hidrogén okozta károsodások többnyire nagyon összetettek.

A hidrogén nem okoz korróziót a felületeken, de az acélt súlyosan károsíthatja. Nagy hőmérsékleten és nyomáson lép fel a *hidrogén okozta elridegedés*, amelyet az oldott hidrogén vált ki*. Az acél ferrit fázisában oldott nagyon kevés szénnel, valamint a perlit redukálásával keletkező szénnel reagálva dekarbonizálódást idéz elő a hidrogén (7-12. ábra). A keletkező, nagynyomású metán repedésképződést, a H_2-gáz pedig „pelyhesedést" okoz. Ezek a károsodások erősen rontják a szívósságot is és a szilárdságot is. Ez a kettős veszély főként 300°C és 500°C közötti üzemi hőmérsékleteken jellemző.

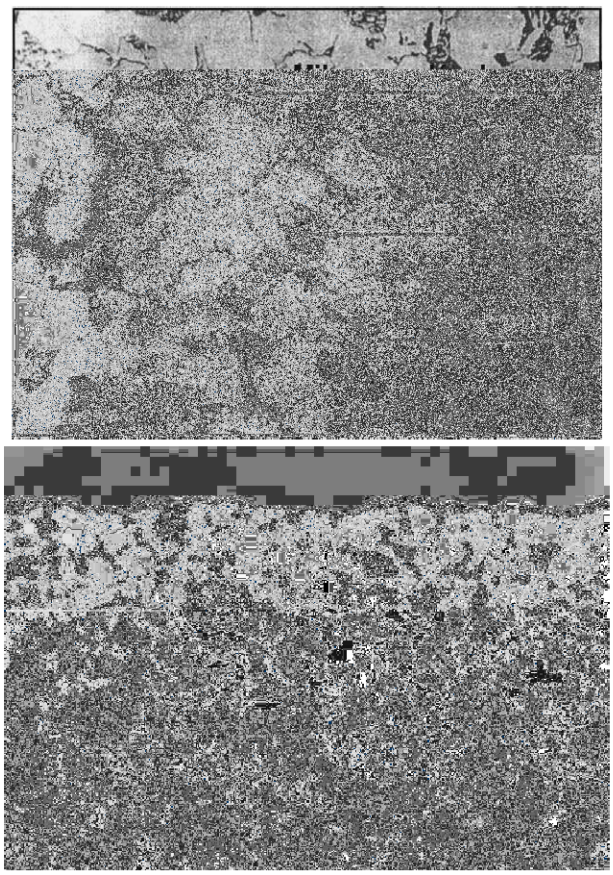
A gyengén ötvözött acéloknál kicsi a valószínűsége annak, hogy a képződő H_2 nyomása miatt kialakuló „pelyhesedés" bekövetkezzen, míg az ötvözetlen acélokban gyakran számíthatunk erre, ha a korrózió sebessége nagy.

Az ötvözetlen acélok 200°C fölött általában nem eléggé ellenállók. Az acélba diffundálódó hidrogén az acélban lévő szénnel reakcióba lép, metánt hozva létre. Az így *dekarbonizálódott* anyagban a nagynyomású hidrogén okozta károsodással szemben a leghatásosabb ötvözők általában a karbidképzők: Cr, Mo, V, W, Nb, Ti.

A molibdén kb. négyszer olyan hatásos, mint a króm. Legalább 0,25% Mo-tartalom célszerű olyankor, amikor a nyomástartó edények a hidrogén okozta károsodásnak ki lehetnek téve. A 0,5% Mo-tartalmú acélokat az olajipar alkalmazza, de csak kb. 470°C-ig, mert e hőmérséklet fölött grafitosodás következhet be. 470°C-nál nagyobb hőmérsékleten általában Cr-Mo acélokat kell alkalmazni. Az acélok hidrogénnel szembeni ellenálló képessége a Nelson-diagram segítségével becsülhető.

A vegyipar, kőolajipar, gyógyszeripar számos területére érvényesek az említett üzemi feltételek, így ezeken a területeken a hidrogénnyomás-álló acélok alkalmazása elterjedt.

A hidrogénnyomás-álló acélok nagyfokú rokonságot mutatnak a melegszilárd acélokkal. Annak megemlítésén túl, hogy a 0,1–0,25% C mellett a legfontosabb ötvözőik a Cr, a Mo, a V és a W, csak azt a megjegyzést tesszük, hogy a hidrogénnyomás-álló acélokból készített szerkezeti elemeket, miként a melegszilárd acél anyagú kötőelemeket (csavarok) is, mindig nemesítve kell beépíteni.



7-12. ábra – Ferrit-perlites szövetszerkezetű hidrogénnyomás-álló acél károsodása (fent), perlites acél dekarbonizálódása (lent)

A hidrogénnyomás-álló acélokat jelenleg nem sorolják külön szabványba, hanem az egyik osztályát képezik a nyomástartó berendezések acéljainak**. Alaptípusnak számít a 10CrMo9-10 (1.7380) minőség – amely csak alig különbözik a 7.7.2. szakaszban említett 12CrMo9-10 (1.7383) acéltól – valamint a 24CrMo10 (1.7273) acél. A csövekre vonatkozóan külön szabványban foglalták össze a követelményeket***.

A hidrogén okozta elridegedés gyakran a korróziós folyamatokban felszabaduló hidrogén következménye. A károsodás a feszültségkorrózióhoz áll közel. A jelenség az atomerőművek reaktortartályánál is előfordul. Az 1,3% Mn, 0,5% Mo ötvözésű acél általában megfelelően ellenálló.

** *MSZ EN 10028-2:2004 Lapos acéltermékek nyomástartó berendezésekhez. 2. rész: Ötvözetlen és ötvözött acélok növelt hőmérsékleten, szavatolt tulajdonságokkal*

*** *MSZ EN 10216-2:2002+A2:2008; Varrat nélküli acélcsövek nyomástartó berendezésekhez. Műszaki szállítási feltételek. 2. rész: Növelt hőmérsékleten szavatolt tulajdonságú, ötvözetlen és ötvözött acélcsövek*

8. fejezet
Szerszámanyagok

Faipari körfűrészlap

8. Szerszámanyagok

Az előző fejezetben tárgyalt ötvözött acélok családjába tartozik a szerszámacélok java része is, amelyekből a más anyagok megmunkálásának eszközei készülnek. A szerszámacélok azonban annyira önálló és jelentőségteljes feladatot töltenek be, hogy önálló fejezetben tekintjük át őket, hozzájuk társítva a kerámiák és a kompozitok családjába tartozó egyéb szerszámanyagokat is.

8.1. A szerszámacélok csoportosítása

Általános követelmény bármely szerszámmal szemben, hogy legyen keményebb a megmunkálandó anyagnál, és ezt a tulajdonságát az üzemi körülmények között is tartsa meg. Például legyen egy forgácsolószerszám vágó éle tartós, egy mérőeszköz felülete kopásálló, egy sajtolószerszám kemény és egyben szívós is. Az általános követelmények tehát az alábbiak:

- nagy kopásállóság,
- jó edzhetőség,
- kellő mértékű szívósság,
- nagy nyomószilárdság,
- mérettartóság,
- jó forgácsolhatóság gyártás közben,
- hosszú élettartam,
- költségtakarékosság.

E szerteágazó igények kielégítése csak más és más acéltípusokkal valósítható meg. A több évtizedes gyakorlatban kialakultak a szerszámacél minőségek jellegzetes csoportjai, melyek a következő módon csoportosíthatók.

Ötvözöttség szerint

- Ötvözetlen szerszámacélok; ötvöző csak a C.
- Ötvözött szerszámacélok.

A fő alkalmazási terület szerint

- Forgácsolószerszámok acéljai.
- Műanyagfröccsöntő szerszámok acéljai.
- Kéziszerszámok, géppel hajtott kéziszerszámok acéljai.
- Hidegalakító szerszámacélok vágáshoz, lyukasztáshoz, aprításhoz.
- Hidegalakító szerszámacélok térfogati alakításhoz (pl. préselés, folyatás, mélyhúzás).
- A hideghengerlés szerszámacéljai.
- A melegalakító szerszámok acéljai,
- Szerszámtartók és vezetőpályák anyagai.

A Magyarországon 2000 óta érvényben lévő szabvány (MSZ EN ISO 4957:2000) négy nagy csoportra osztja a szerszámacélokat; a továbbiakban ennek a felosztásnak megfelelően tekintjük át őket.

8.2. Az ötvözetlen hidegalakító szerszámacélok

a)

A szerszámacélok szükséges keménységét a martenzit biztosítja, amely a gyors hűtés hatására jön létre. A széntartalom függvényében nő a keménységük, melyet a kis hőmérsékletű megeresztésnél nem veszítenek el (T_{meg} = 160–300°C). Jelölésük „CxU”, ahol a „C” betű utal az ötvözetlen mivoltára, az „x” helyén a C-tartalom 100-szorosát jelző számok állnak, az „U” betű pedig a szerszámacél kategóriára utal.

A felhasználási területet a méret, a szilárdság és szívósság, valamint az alkalmazhatóság hőmérséklete (150–300°C) határolja. A kisebb C-tartalmú típusok szívósabbak, kézi fogók, mezőgazdasági szerszámok, továbbá szerszámkeretek alapanyagai. A C70U vésők, ollók, kézi pontozók, jelzőszámbeütők, fejszék, reszelők anyaga. A C90U zömítőszerszámok és a pénzérmegyártásnál használt verőfejek anyaga lehet. A C105U és a C120U acélok kopásállósága a szekunder cementit miatt nagyobb: kések, pengék, vágószerszámok, körollókések, húzógyűrűk, menetmángorlók, lefejtőmarók, alapanyaga (8-1. ábra).

8-1. ábra – Ötvözetlen szerszámacélok alkalmazásai

8.3. Ötvözött hidegalakító szerszámacélok

A fémeket hideg állapotban alakító (vágó, verő, hidegsajtoló stb.) szerszámokkal szembeni fő követelmény a kopásállóság és a nagy felületi terhelhetőség. Egyes esetekben a dinamikus hatások miatt a szívósság is meghatározó követelmény lehet. A közel 20 acéltípus több alcsoportba sorolható az ötvözöttség szerint:

- Mn-ötvözésű acélok; 0,2–1,0% C és 0,8–2,5% Mn mellett Cr, Mo, V és W lehet a további ötvözőjük. Pl. 70MnMoCr8 – 1.2824.
- Kis Cr-tartalmú (Cr < 2%) acélok; lehetnek V-, Cr-V és W-Cr-V ötvözésű acéltípusok is; pl. 60WCrV8 – 1.2550, 102Cr6 – 1.2067.
- Ni-ötvözésű acélok; a Ni-tartalom 0,9–4,3%; a C-tartalom 0,4% körüli.
- Nagy Cr-tartalmú, hipoeutektoidos acélok; pl. X40Cr14.
- Nagy Cr-tartalmú, hipereutektoidos acélok; pl. X100CrMoV5, X153CrMoV12.
- Nagy Cr-tartalmú, lédeburitos acélok; pl. X210CrW12 – 1.2436, X210 Cr12.

A Mn-nal ötvözött acélok jó mérettartó, olcsó minőségek, elhúzódásra nem hajlamosak. Bonyolult alakú mérőeszközök, kivágószerszámok alapanyagai.

A Cr-mal kismértékben ötvözött acélok finom élű forgácsoló- és vágószerszámokhoz alkalmazhatók finomszemcsés karbidjaik miatt. Kések, pengék, reszelők, dörzsárak anyagai.

A legnagyobb kopásnak kitett szerszámokat – lyukasztótüskék, mángorló, hengerlő szerszámok, üregelőtüskék, hideghengerek (8-2. ábra), hidegzömítő, folyató- és sajtolószerszámok – nagy Cr- és C-tartalmú lédeburitos acélokból készítik.

A W-mal ötvözött hidegalakító szerszámacélok ütésszerű igénybevételnek jól ellenálló, kopásálló típusok. Pneumatikus vágókésekhez, csavarfejezőkhöz használhatók, fémfűrészek, csigafúrók, marók, fa-, papírvágó kések anyaga lehet.

8-2. ábra – Lemezhengerítő berendezés

8.4. A melegalakító szerszámacélok

A melegalakító szerszámok, pl. a süllyesztékes kovácsolás süllyesztékei, a kisajtolószerszámok, a melegvágók, sorjázók, meleghengerek stb. acéljainak további különleges követelményeket kell kielégíteniük. Hőállónak, melegszilárdnak, nagy hőmérsékleten is kopásállónak, keménynek, a dinamikus hatások miatt szívósnak kell lenniük. A melegalakító szerszámok általában nagyméretűek, ezért a jó átedzhetőség is követelmény. Az ilyen tulajdonságokat a kisebb széntartalom (0,25–0,60%) mellett a Si, Mn, Ni, W és V ötvözők biztosítják. Főbb alcsoportjaik:

- Közepesen ötvözött, Cr-Mo-V ötvözésű acélok, pl. 32CrMoV12-28, 55NiCrMoV7 – 1.2714.
- Erősen ötvözött, Cr-Mo-V ötvözésű acélok, pl. X40CrMoV5-1 – 1.2344.
- Erősen ötvözött, Cr-W (+Co, Mo, V) ötvözésű acélok, pl. X35CrWMoV5.

A nagyméretű kovácssüllyesztékek alapanyaga leggyakrabban a gyengén ötvözött Ni-Cr-Mo acél (55NiCrMoV7), amely kellően szívós, de kisebb a melegszilárdsága és a melegkifáradási határa, ezért a szerszám élettartama viszonylag kicsi.

A W-ötvözésű acélok közepes méretű sajtolószerszámok alapanyagai (nemvasfémekhez), de melegollókésekhez, sorjázószerszámokhoz is alkalmazhatók. Meglehetősen drága anyagok.

A Cr-Mo-V ötvözésű kategória minden tagja kellően összehangolt szilárdsági és szívóssági tulajdonságú acél, a melegkifáradásnak jól ellenáll. Jól edzhető, nitridálható – a nitridálás olyan termokémiai felületkezelés, amely a felület egy vékony rétegében nitridek képződését segíti elő, s ezzel egy kopásálló kéreg alakul ki –, megeresztéskor szekunder keményedés érhető el 450–500°C-on. Sajtolószerszámok, kokilla- és nyomásos öntés szerszámai (8-3. ábra), süllyesztékek, fröccsöntőformák stb. alapanyaga.

8-3. ábra – Gépkocsi-ajtókeret gravitációs öntési öntőszerszámának szerszámfele

8.5. A gyorsacélok

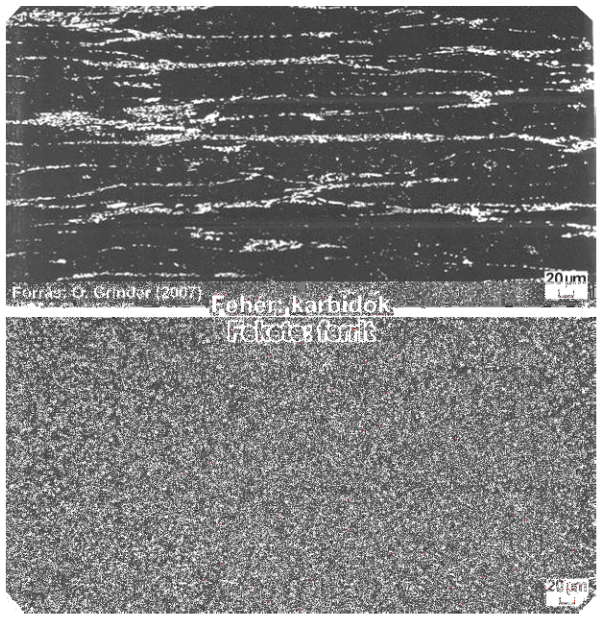
A gyorsacélokat a nagy sebességgel dolgozó forgácsolószerszámok alapanyagául fejlesztették ki. Nevüket is ebből nyerték (HS = high speed). A szerszámok éle a megmunkálás során ≈600°C-ra is felmelegszik, így a jó gyorsacéltól megkövetelik, hogy nagy melegkeménységű legyen, és azt hosszú ideig megtartsa. A gyorsacélokat Cr, W, Mo, V és Co ötvözők kombinációjával és nagy C-tartalommal (C≈1%) állítják elő. A 4.5. fejezet ábráin sokféle forgácsolószerszám látható.

Az ötvözők szerepe:

- C ≥ 0,8%; a szénnek elsősorban a karbidok létrehozása miatt nagy a mennyisége, s nem a martenzitben oldva található meg.
- A kb. 4% Cr az átedzhető szelvényátmérőt növeli, és egyben karbidképző is.
- A W, Mo, V a melegkeménységet és a kopásállóságot növeli, mindahány erős karbidképző.
- A Co a megeresztésállóságot és a hővezető képességet növeli.

A gyorsacélok legelterjedtebb típusa az 1.3355 (HS18-0-1) acél, amely 18% W-ot, 4% Cr-ot és 1% V-ot tartalmaz, a széntartalma 1%. Különféle forgácsolószerszámok, tehát csigafúrók, marók, esztergakések, üregelőtüskék, betétkések anyaga. A W egy része helyett kobaltot (Co) tartalmazó típusokkal pedig a forgácsolás teljesítménye növelhető, mivel a kobaltos típusok melegszilárdsága és kopásállósága nagyobb.

A gyorsacélok hőkezelése négy fázisból áll: kétlépcsős előmelegítés, ausztenitesítés, kétlépcsős edzés, két vagy több megeresztés.



8-4. ábra – Hagyományos gyorsacél (fent) és porkohászati gyártású gyorsacél (lent) mikroszerkezete

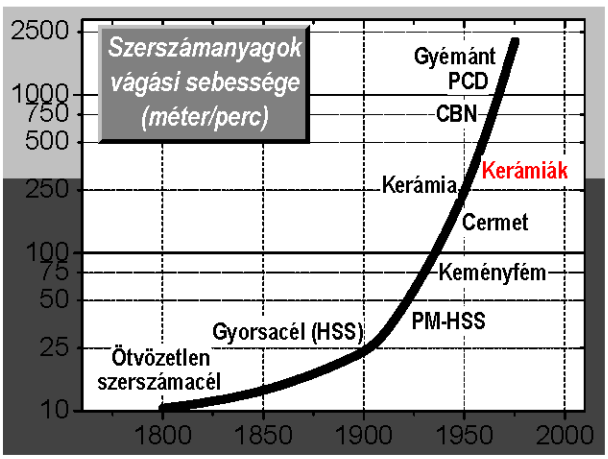
A gyorsacélok korszerű csoportját alkotják a porkohászati módszerekkel előállított gyorsacélok. A porkohászati gyorsacélokban nem a hőkezelés alakítja ki a diszperz karbidszerkezetet, hanem a porok egyenletes keverése (8-4. ábra). A klasszikus szerszámacélokkal összevetve több előnyös tulajdonságot biztosítanak a felhasználóknak:

- homogén, makrodúsulásmentes szerkezet,
- nagyobb szilárdság, szívósság és törési szívósság ugyanolyan keménységnél,
- izotrop szerkezet, ebből adódóan kisebb torzulások az edzéskor,
- jobb köszörülhetőség,
- növelt melegalakíthatóság, ami nagyobb karbidtartalmat enged meg, ennek következtében
- nagyobb keménység és melegkeménység, ami
- nagyobb kopásállóság és szerszámélettartam, hosszabb üzemidő, kevesebb karbantartás.

8.6. Egyéb forgácsolószerszám anyagok

A megmunkálási teljesítmény vagy / és a megmunkált felület pontosságának növelési igénye jelentős fejlődést tett lehetővé az utóbbi száz évben, amint ezt a 8-5. ábra szemlélteti. A fejlődés csak úgy mehetett végbe, hogy új anyagokat fejlesztettek ki a forgácsolószerszámok céljára. A ma használt anyagok a következő csoportokba tartoznak:

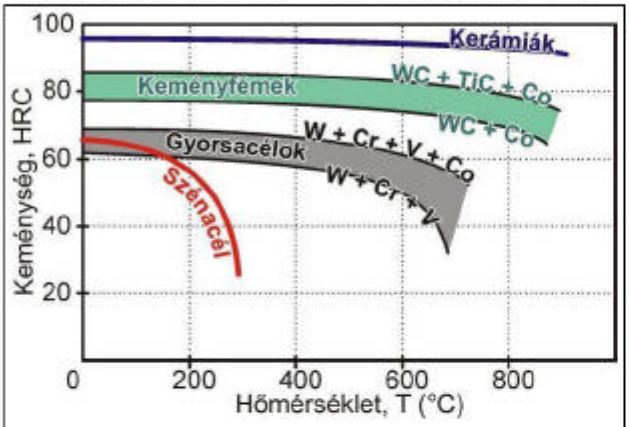
- gyorsacélok,
- keményfémek: WC + Co, WC + TiC + Co.
- kerámiák: Al_2O_3, Al_2O_3 + ZrO_2, Al_2O_3 + SiC tűkristály, Al_2O_3 + TiC, Si_3N_4.
- cermetek: TiCN + a Mo, W, V, Ta, Nb karbidja + {Ni, Co, Mo} mint kötőanyag.
- gyémánt: természetes egykristály vagy mesterséges polikristályos (rövidítése: PCD).
- köbös bór-nitrid (rövidítése: CBN).

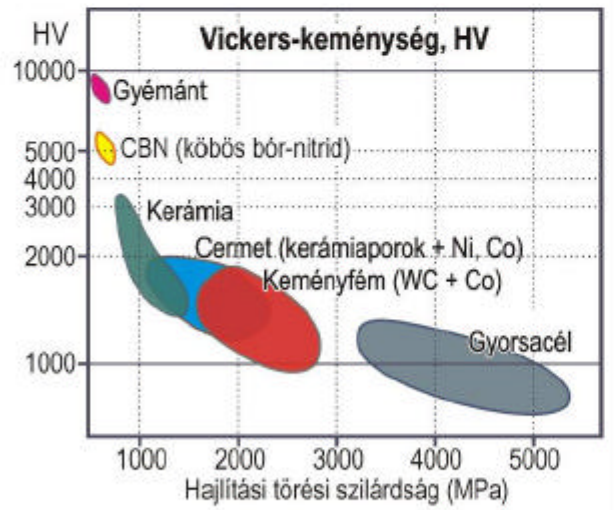


8-5. ábra – A forgácsolás céljára használt szerszámanyagok forgácsolási teljesítményének fejlődése. A görbe jobb oldalára írt anyagcsoportok a hibrid anyagok, azon belül a kompozitok közé tartoznak

A 8-5. ábra jól szemlélteti, hogy a forgácsolás teljesítményét – és az ezzel szorosan összefüggő termelékenységet – azzal sikerült jelentősen növelni, hogy a gyorsacélok után kifejlesztették a nagy kopásállóságú kompozit, hibrid és kerámia szerszámanyagokat. Ezeknek a keménysége akár 800°C-on is csak kevéssé csökken (8-6. ábra), s így a nagy vágósebesség mellé hosszú élettartam is társul.

A nagy keménységnek azonban hátrányos következményei is vannak: a kerámia és a kompozit szerszámok nagyon törékenyek, könnyen kicsorbulnak. Ennek az a magyarázata, hogy a gyorsacélok $K_{Ic} = 20 - 30\ MPa\sqrt{m}$ törési szívóssága a kerámiák esetében ennek az értéknek a töredékére esik. A kerámiák szívósságát azzal növelik, hogy a kerámiaporokhoz véletlenszerűen orientált tűkristályokat kevernek, így az izosztatikus melegsajtolás után nyert kerámia–kerámia kompozit szívósabb lesz. A nanotechnológia kínálta megoldásokkal is törekednek a növelt szívósságú, cserélhető lapkák (4-19. és 8-7. ábra) fejlesztésére.





8-6. ábra – Fent: a forgácsolószerszám-anyagok keménységének változása a forgácsoláskor kialakuló szerszámhőmérséklet függvényében.
Lent: a keménység és a hajlítási törési szilárdság kapcsolata

8.7. Felületkezelt szerszámanyagok

Nagy jelentőséget kapnak az alakító-, vágó- és forgácsolószerszámok teljesítményének és élettartamának növelésében a különféle felületkezelési eljárások. Ezeket két nagy csoportra oszthatjuk:

1. Termokémiai felületkezelések

Diffúziós folyamatokkal a szerszámacélok felületközeli rétegében megnövelik a N- és a C-tartalmat; ezek a nitrid- és karbidképző ötvözőkkel reagálva jelentős felületi keményedést okoznak. A felületkezelési eljárások neve változatos: nitridálás (lehet sófürdős, gáz-, ion- és plazma-), karbonitridálás, nitrocementálás, cianidálás, szulfonitrocementálás stb. Ugyanilyen hatást idéznek elő a bór (B) bevitelével is: boridálás, karboboridálás. A gyorsacélok felületén 560°C-os vízgőzben vékony magnetitréteg alakítható ki.

2. Kemény bevonatok felvitele

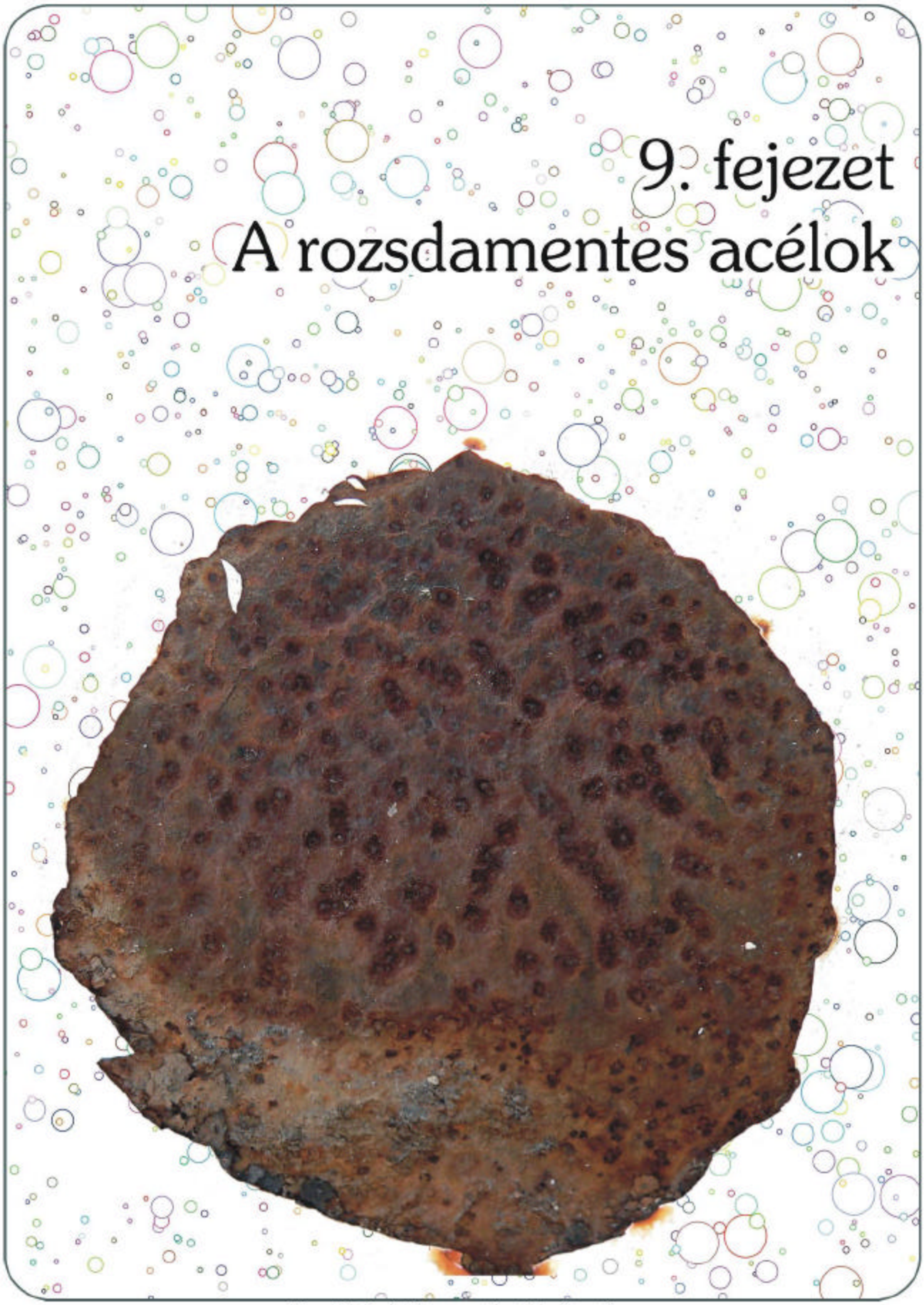
A felületre fizikai és kémiai párologtatási módszerekkel (elterjedt rövidítéseik: PVD, CVD, MTVD) nagy keménységű kerámiabevonatok vihetők fel (pl. köbös bór-nitrid, CBN). Fő jellemzőiket a 8-1. táblázat foglalja össze.

8-7. ábra – Cserélhető lapkák forgácsolás céljára; az aranysárga színű lapkát TiN-bevonattal látták el

	Bevonat	Keménység, HV	Vastagság, µm
CVD	TiN	2000–5000	3
	TiC	3000–3500	2–3
	Ti(C,N)	2500–3100	3
	ZrN, HfN	2500–3100	2–5
	Al_2O_3	2500–3100	3
	CBN	3000–4000	3
	Gyémánt	7000–10 000	5–10
PVD	TiN	2000–2500	3–5
	Ti(C,N)	3000–3400	3–5
	(Ti,Al)N	2000–2400	3–5
	CrC	1850	3
	CrN	1750–2900	3

8-1. táblázat: A szerszámacélok alapvető bevonatai

9. fejezet
A rozsdamentes acélok



Rozsdafolt sérült bevonatú pébégáztartályon

9. A rozsdamentes acélok

9.1. A rozsdamentes acélok fő típusai

A rozsdamentes acélok különleges helyet foglalnak el a szerkezeti anyagok között: ezek a legnagyobb tömegben felhasznált, a korrózionak jól ellenálló anyagok. Sokféle termék készül rozsdamentes acélból, ezért a szabványok hosszú sora foglalja össze ezek követelményeit. A rozsdamentes acélokkal – amelyeket gyakran, de szabatosnak semmiképpen nem nevezhető módon korrózióálló vagy saválló acélokként is emlegetnek – szoros rokonságot mutatnak a nikkelötvözetek, amelyeket a következő fejezetben tekintünk át.

A XX. század legelején fejlesztették ki az első rozsdamentes acélokat. Felhasználásuk lendületesen növekedik: a 2011. évi világtermelés meghaladta a 32 Mt-t. Az acéltípusok európai szabványos jelölése rendszerint nagyon hosszú, ezért célszerűbb az ún. rövid jelet használni, vagy az USA-ban használt AISI szabvány jelöléseit: ebben a Cr-ötvözésű acélok a 400-as, a [Cr+Ni] ötvözésűek pedig a 300-as sorozatba tartoznak.

9.1.1. A rozsdamentes acélok alapjellemzői

A ***korrózióállóság,*** pontosabban a *nedves korrozióval (elektrokémiai korrozióval)* szembeni ellenállás, a legalább 10,5% *krómnak* köszönhető, amely egy 1–5 nm vastagságú, passzív védőréteget alakít ki az acél felületén, és ez megvédi a további korróziótól, ill. lassítja azt. *Molibdén* hozzáadása még ellenállóbbá teszi ezt a passzív védőréteget, és fokozza annak regenerálódását a sérülése esetén; mindez erőteljesen növeli a korrózióállóságot. A szén viszont rontja a korrózióállóságot!

A *száraz korrózió*, amely a nagy hőmérsékletű gázokban alakul ki, egészen más folyamat, amellyel szemben a Cr-, a Si- és az Al-oxid teszi védetté az acélt, következésképpen a hőálló acélok ezt a két utóbbi ötvözőt is nagyobb mennyiségben tartalmazzák. A ***hőállóság*** valamely hőmérsékleten értelmezhető, a felületen képződő szárazkorróziós reve képződési sebességének, a revésedésnek, a határértékéhez kötik; általában ez az érték 1 g/(m^2·h).

A rozsdamentes acélok osztályába tartozó ötvözetek harmadik, alapvetően fontos jellemzője a ***kúszásállóság***, ennek mibenlétét már áttekintettük a 3.3.9. és a 3.5. fejezetben. Hangsúlyozni kell, hogy a fentiek miatt a rozsdamentes acélok osztályába tartozó acélokat e három alapvető tulajdonságuk mint felhasználói rendeltetés szerint csoportosítja az európai szabványosítási rendszer.

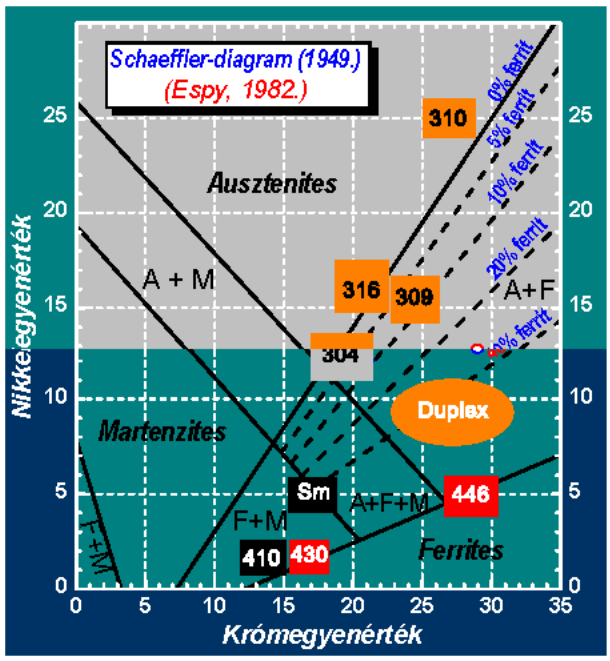
9.1.2. A rozsdamentes acélok főcsoportjai

A csoportosítás alapja *a rendeltetés és a szövetszerkezet*, mely utóbbit az ausztenitképző és a ferritképző ötvözők mennyisége határoz meg.

- Ferritképző ötvözők: Cr, Mo, Si, Ti, Nb, Al, W.
- Ausztenitképzők: Ni, Mn, C, Cu, N, Co.

A szövetszerkezet ismerete különösen lényeges a hegesztési varratok esetében, ahol az alapanyag és a hegesztőanyag keveredése befolyásolja a kialakuló szövetszerkezetet. Ennek ellenőrzésére szolgál a ***Schaeffler-diagram****** (9-1. ábra), amelynek tengelyeire a CrE krómegyenérték és a NiE nikkelegyenérték kerül; a több változat közül az alábbi, Espy-féle formula a legelterjedtebb:

CrE = Cr+Mo+1,5Si+0,7Nb+0,5Ti+3Al és
NiE = Ni+30C+0,5Mn+Cu/3+22N.



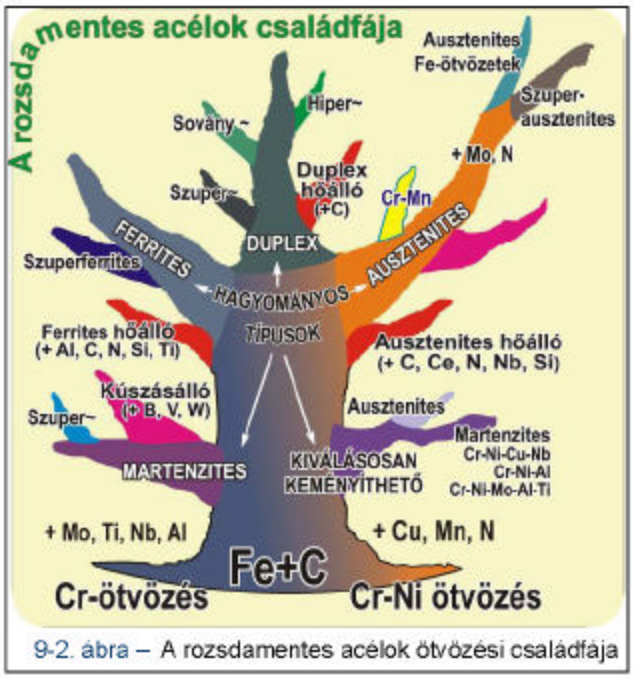
9-1. ábra – A Schaeffler-diagram; a diagramba beírt számok egyes acéltípusok AISI-szabványos jelei, a görög betűk a fázisok nevei, Sm = szupermartenzites

A fent említett két fő csoportosítási rendezőelv alapján a rozsdamentes acélok a következő alosztályokba sorolhatók:

- ferrites korrózióálló acélok,
- martenzites korrózióálló acélok,
- kiválásosan keményíthető korrózióálló acélok,
- ausztenites korrózióálló acélok,
- ausztenit–ferrites (duplex) korrózióálló acélok,
- ferrites hőálló acélok,
- ausztenites és ausztenit–ferrites hőálló acélok,
- martenzites kúszásálló acélok,
- ausztenites kúszásálló acélok.

** Anton L. Schaeffler: Constitution Diagram for Stainless Steel Weld Metal. Metal Progress, 56 (1949:5) 680.*

A szövetszerkezet szerinti felosztást szemlélteti a 9-2. ábra; ha nem is teljes részletességű, de segítheti az áttekintést.



9-2. ábra – A rozsdamentes acélok ötvözési családfája

9.1.3. Ferrites korrózióálló acélok

A ferrites korrózióálló acélokból 21-et sorol fel az európai szabvány (MSZ EN 10088-1:2005), ami jelzi az alkalmazási területük kiterjedtségét. A belső tagozódás az alábbi logikát követi:

- 1. csoport: Cr ≈ 10–14%.
  Pl. 1.4000 (X6Cr13), 1.4003 (X2CrNi12).
- 2. csoport: Cr ≈ 14–18%.
  Pl. 1.4016 (X6Cr17, AISI 430). E típus teszi ki a teljes ferritesacél-felhasználás közel felét!
- 3. csoport: Cr ≈ 14–18% + Ti, Nb.
  Pl. 1.4511 (X3CrNb17, AISI 430Ti), 1.4510 (X3CrTi17, 439), 1.4509 (X2CrTiNb18, 441).
- 4. csoport: Cr ≈ 14–19%, Mo ≈ 0,6–2,1%.
  Pl. 1.4521 (X2CrMoTi18-2, AISI 444).
- 5. csoport: Cr ≈ 18–30%, (C+N) < 0,025%.
  Pl. 1.4592, azaz X2CrMoTi29-4.

Az 1–3. csoport a hagyományos ferrites korrózióálló acéloké. Az ötvözőtakarékos 1. csoport kipufogókhoz és a kopásos + korróziós igénybevételekre használatos. A 2. csoportba az általános rendeltetésű típusok tartoznak. A 3. csoport típusainak hegeszthetőségét stabilizálással javították. A 4. csoportba az új fejlesztésű, Mo-ötvözésű típusok sorolhatók, amelyek a lyukkorrózióval szemben jelentősen fokozott ellenállást mutatnak. Az 5. csoportba tartoznak a nagy Cr-tartalmú és az ún. szuperferrites korrózióálló acélok, amelyek „szupersége" a korróziós ellenállás jelentős növekedésével függ össze; ehhez főleg a Cr- és a Mo-tartalom növelése ad megoldást.

9.1.4. Ferrites hőálló acélok

A jelenleg szabványosított ferrites hőálló acélok száma hat. A korrózióálló minőségekhez képest a kissé megnövelt Si- (0,7–1,4%) és a jelentősen megnövelt Al-tartalom (0,7–1,7%) fokozza a revésedéssel szembeni ellenállást, de természetesen a króm az alapvető, a korrózióállóságot biztosító ötvöző. A Cr mennyisége szerint 7, 13, 18, 25 és 28% Cr-tartalmú típusokat találunk; pl. 1.4736 (X3CrAlTi18-2).

9.1.5. Martenzites korrózióálló acélok

A martenzites korrózióálló acélokból 19-et sorol fel az érvényben lévő európai szabvány, s ez a tény ismét hangsúlyt ad annak a korábbi állításnak, mely szerint különleges alkalmazásokra rendeltetett acélcsaláddal van dolgunk. A belső tagolást itt is az ötvözési rendszer kínálja:

- 1. csoport: C ≈ 0,15% és Cr ≈ 13%.
  Pl. 1.4006 (X12Cr13, AISI 410).
- 2. csoport: C = 0,2–04% és Cr ≈ 13%.
  Pl. 1.4021 (X20Cr13, AISI 420).
- 3. csoport: C = 0,5–0,7%, Cr ≈16% + Mo, V.
  Pl. 1.4116 (X50CrMoV15).
- 4. csoport: C = 0,6–1,2% és Cr ≈ 17%.
  Pl. 1.4125 (X105CrMo17, AISI 440C).
- 5. csoport: C < 0,1%, 12–16% Cr, 3–7% Ni, 1–3% Mo; pl. 1.4418, azaz X4CrNiMo16-5-1.

Az 1–4. csoport a hagyományos típusoké; a 3. és a 4. csoportba a hipereutektoidos, az 5.-be pedig az ún. szupermartenzites korrózióálló acélok, tartoznak, amelyek „szupersége" a nagy korrózióállóság, szilárdság és szívósság együttesét fejezi ki; újabban triplex acéloknak is nevezik őket.

9.1.6. Martenzites kúszásálló acélok

Nyolc típust tartalmaz az MSZ EN 10302:2008 szabvány. Nemesítve építik be, de pl. csavarok, csapágyak anyagaként cementálják is.

- A C-tartalom terén két csoportba sorolhatók: C = 0,08–0,012%, illetve C =0,19–0,22%.
- Valamennyi acéltípus fő ötvözője a króm, amelynek mennyisége 9-től 12%-ig növekedik a nagyobb kúszáshatár szerint.
- A Ni is általános ötvöző, Ni = 0,3–1,0%.
- A melegszilárd acéloknál már láttuk, hogy a kúszásállóság fontos ötvözői az erős karbidképző molibdén (1,0%) és a V (0,2–0,4%).
- Négy acéltípusban is szerepet kap a nitrogénnel való ötvözés (N = 0,05–0,10%). Ezekben az erős nitridképző nióbium (0,08–0,55%) és akár 0,015% bór is megjelenik ötvözőként.
- Egyes típusokban 1,0% W és 6% Co is lehet, pl. 1.4911 (X8CrCoNiMo10-6).

9.1.7. Ausztenites korrózióálló acélok

Az ausztenites korrózióálló acélok a rozsdamentes acélok legnagyobb alosztálya. Rendkívül sokrétűen használhatók fel a vezértípusaik (amelyekből a legnagyobb a felhasználás), de egészen egyedi feladatokra is kialakultak célirányos acéltípusok. Ez a magyarázata annak, hogy miért definiált a 2005-ben kiadott szabvány ötven acéltípust ebben a csoportban. Az osztályozást itt főcsoport és alcsoport szinten érdemes elvégezni.

- 1. főcsoport: Cr-Ni ötvözésű acélok
  Nagy C-tartalmú 18/8-as és 18/10 típusok:
  C ≈ 0,10%, Cr ≈ 18 és Ni ≈ 8–10%.
  Pl. 1.4310 (X10CrNi18-8, 301)
  vagy 1.4301 (X12CrNi18-10, AISI 304).
  Kis C-tartalmú acélok (C = 0,01–0,03%)
  Pl. 1.4307 (X2CrNi18-09, 304L).
  Stabilizált acélok: Ti- vagy Nb-ötvözés
  Pl. 1.4541 (X6CrNiTi18-10, 321).
  25/20-as acélok: Cr ≈ 25 és Ni ≈ 20%
  Pl. 1.4435 (X1CrNi25-21, 310L).
- 2. főcsoport: Cr-Ni-Mo acélok (Mo < 3%)
  Alapösszetétel: Cr ≈ 17, Ni ≈ 12% + Mo
  Pl. 1.4401 (, X5CrNiMo17-12-2, 316).
  Kis C-tartalmú acélok
  Pl. 1.4404 (X2CrNiMo17-12-2, 316L).
  Stabilizált acélok: Ti vagy Nb ötvözés
  Pl. 1.4580 (X6CrNiMo17-12-2, 316Cb).
  25/20-as acélok: Cr ≈ 25, Ni ≈ 20% + Mo
  Pl. 1.4466 (X1CrNiMoN25-22-2).
- 3. főcsoport: N-ötvözésű Cr-Ni acélok
  Cr-Ni acélok: N = 0,10–0,22%
  Pl. 1.4311 (X2CrNiN18-10, 304LN).
  Kis C-tartalmú acélok
  Pl. 1.4404 (X2CrNiMo17-12-2, 316L).
- 4. főcsoport: Cr-Mn-Ni acélok
  Növelt C-tartalmú típusok: C ≈ 0,12%
  Pl. 1.4372 (X12CrMnNiN17-7-5, 201)
  Kis C-tartalmú típusok: C ≈ 0,02%
  Pl. 1.4373 (X2CrMnNiN17-7-5)
  Cu + B ötvözésű típusok
  Pl. 1.4597 (X8CrMnCuNB17-8-3)
- 5. főcsoport: Cr-Ni-Cu acélok, Cu = 1–2%
  Növelt C-tartalmú típusok: C ≈ 0,06%
  Pl. 1.4570 (X6CrNiCuS18-9-2); e minőség egyben automataacél is: S ≈ 0,12%.
  Kis C-tartalmú típusok: C ≈ 0,02%
  Pl. 1.4560 (X3CrNiCu19-9-2)
- 6. főcsoport: szuperausztenites acélok
  Cr-Ni-Mo-Cu-N acélok. Pl. 654 SMO®
  Ni-Cr-Mo-Cu-N acélok, Pl. 904L
  (1.4539, X1NiCrMoCu25-20-5)
  Ausztenites vasötvözetek (Fe << 50%).

A 6. főcsoportba sorolt szuperausztenites acélok korróziós ellenállása kiemelkedően jó. Az amerikai AISI szabvány 316Cb jelű acéljánál a „Cb" a columbium vegyjele, amely azonos a nióbiummal (Nb), de az USA-ban nem az utóbbi elnevezést kedvelik …).

Az ausztenites acélok egy részének a szövetében néhány százalék δ-ferrit fázis is található: ez nem rontja a korrózióállóságot, de javítja a hegeszthetőséget a melegrepedési hajlam jelentős mértékű csökkentése által.

9.1.8. Ausztenites hőálló acélok

A 14 szabványosított hőálló acéltípus jellemzőit az MSZ EN 10095 szabvány foglalja össze. A hőálló acélok sok vonatkozásban nagyon hasonlóak a korrózióálló minőségekhez, de néhány lényeges különbségre rá kell mutatni:

- A króm biztosítja a hőállóságot, vagyis a reveképződéssel szembeni ellenállást, ezért a Cr-tartalom csaknem minden acéltípusban nagyobb, mint 20%, leginkább 25%.
- Széntartalmuk nagyobb, mint 0,06%, és akár 0,25% is lehet, sőt, a hőálló acélöntvényekben 0,75%. A szén erős ausztenitképző, és gátolja a nagy hőmérsékleten káros hatású szigmafázis képződését.
- A Si-tartalmuk felső határa nem 1,00%, hanem 2,50%. A Si gátolja az O-, N- és C-tartalmú forró gázok károsító hatását a Cr-oxid réteg alatt képződő Si-oxid révén.
- A nikkel teszi ausztenitessé az acélt. A Ni-tartalmat a ferritképzők (Cr, Si) hatásának ellensúlyozása mellett a szigma-fázis képződésének biztonságos meggátlása szabja meg; emiatt akár 35% Ni-re is szükség lehet (az ilyen ötvözet már nem is igazi acél, hanem ausztenites hőálló vasötvözet).
- Néhány acéltípus 0,10–0,4% nitrogénnel ötvözött. A N erős ausztenitképző, szilárdságnövelő és szigma-fázis gátló hatású ötvöző.
- A mangán csak egy hőálló acéltípusban van jelen meghatározó ötvözőként; az 1.4872 acélban 9% Mn – és még 0,30% N – teszi lehetővé a Ni kis értéken (7%) tartását.
- A ferrites hőálló acélokkal szemben az Al-ot csak egy ausztenites hőálló acélban használják. Helyette, az oxidációval szembeni ellenállás növelésére, a cérium (Ce = 0,05–0,10%) a fő ötvöző, pl. 1.4854 (X6NiCrSiNCe35-25).
- A nitrogénnel nem ötvözött egyes típusokban a szilárdság növelésére Nb-ot tartalmaz az acél, de ez erősen rontja mind az oxidációs ellenállást, mind a hegeszthetőséget.

9.1.9. Kiválásosan keményíthető korrózióálló acélok

Az új anyagok iránti felhasználói igények hatása jól tükröződik a szabványos acéltípusok számában. A 2005-ben kibocsátott európai szabvány (EN 10088-1) hat típust sorol fel a kiválásosan keményíthető kategóriában, de az International Standardisation Organisation legfrissebb szabványa – ISO 15510:2010 – már 11 féle, kiválásosan keményíthető korrózióálló acélt határoz meg. Érdekességként említjük, hogy e szabványban, amelyből várhatóan új európai szabvány lesz, már nem 50 + 14 az ausztenites acéltípusok száma, hanem 98, ám ennek ellenére nem szabad reménytelennek tekinteni a köztük való eligazodást!

A kiválásos keményedés lényegét, vagyis a szilárdságnövelés mechanizmusát a 3.4.3. szakaszban ismertettük. A kiválásosan keményíthető acélok nyilvánvalóan a korrózióállóság és a nagy szilárdság együttesen támasztott követelményének kívánnak megfelelni. Fő csoportjaik a következők:

- 1. csoport: martenzites, közvetlenül edzhető acélok.
  Pl. 1.4542 (X5CrNiCuNb16-4, AISI 630).
- 2. csoport: martenzites, közvetve edzhető acélok: az M_S hőmérséklet a szobahőmérsékletnél kisebb, ezért kétlépcsős hőkezelést igényelnek.
  Pl. 1.4568 (X7CrNiAl17-7, AISI 631).
- 3. csoport: különleges martenzites acélok,
  Pl. 1.4596 (X1CrNiMoAlTi12-10-2).
- 4. csoport: ausztenites acélok.
  Pl. 1.4606 (X6NiCrTiMoVB25-15-2).

A szilárdságnövelést biztosító hőkezelés, a kiválásos keményítés, első lépése a homogenizáló hevítés, ezt követi az edzés, majd a megeresztés (vagy öregítés). Ez utóbbi hőkezelési fázisban válnak ki az intermetallikus fázisok, karbidok, nitridek és a rézdús fázisok, amelyek jelentősen megnövelik a szilárdságot.

A kiválásosan keményíthető korrózióálló acélokat az EN-szabványok a martenzites korrózióálló acélokkal egy szabványban határozzák meg.

9.1.10. A duplex (ausztenit–ferrites) acélok

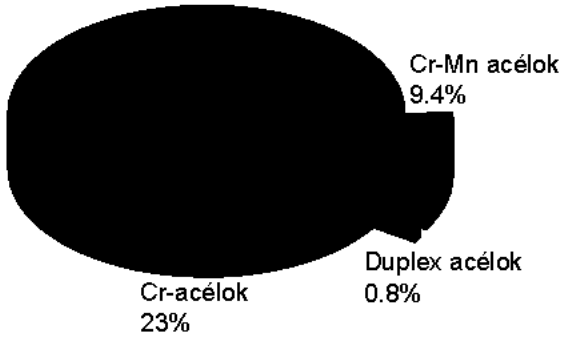
A rozsdamentes acélok fontos csoportját képezik a kb. azonos mennyiségű ausztenitet és ferritet tartalmazó duplex acélok. Új típusaik jelentek meg, amelyek egy része ugyan már szabványos, de 2005 után került be az európai szabványrendszerbe, egy másik része pedig esetleg még nem is esett túl a szabványosítási folyamaton.

A 2000-es évek első évtizedében végbement jelentős fejlesztéseket az kényszerítette ki, hogy a Ni és a Mo tőzsdei ára óriási hullámzásokat mutatott, s emiatt Ni- és Mo-szegény („sovány”, angolul „lean”), de nem romló korrózióállóságú acélokra jelentkezett igény; érzékeltetendő a helyzetet, megemlítjük, hogy a nikkel és a molibdén londoni fémtőzsdei ára 2007 nyarán az előző évek átlagos árának a 4–5-szörösére ugrott.

A jelenleg széles körben elfogadott osztályozási rendszerben a több tucat ausztenit–ferrites acéltípust négy korrózióálló és egy hőálló csoportba soroljuk, amelyek a következők:

- 1. csoport: sovány duplex korrózióálló acélok. Az ebbe a csoportba tartozó típusok Ni- és Mo-szegény acélok. A fontos ausztenitképző nikkel hiányát N-nel és Mn-nal pótolják; pl. Nitronic 19D, 1.4362 (X2CrNi23-4, 2304®), 1.4162 (X2CrMnNiN21-5-1, LDX2101®).
- 2. csoport: standard duplex acélok.
  A 22% Cr, 5% Ni, 3% Mo és 0,20% N ötvözésű, ún. 2205-ös acél számít az általános duplex acél alaptípusnak.
  Pl. 1.4462 (X2CrNiMoN22-5-3, AISI 2205).
- 3. csoport: szuperduplex korrózióálló acélok. Jelentősen növelt korrózióállóságú acélok, melyek a növelt Cr és Mo tartalomnak továbbá a Cu- és W-ötvözésnek köszönhetően fokozottan ellenállnak az erős lyukkorróziós hatásoknak; pl. 1.4410 (X2CrNiMoN25-7-4), 1.4501 (X2CrNiMoCuWN25-7-4, AISI F55).
- 4. csoport: hiperduplex korrózióálló acélok. A Cr + Mo akár 35% is lehet, és a nitrogéntartalom is eléri az oldhatósági határt (≈ 0,40%).
- 5. csoport: ausztenit-ferrites hőálló acélok.
  A megnövelt mennyiségű szén (0,15%) és Si (1,5%) biztosítja a hőállóságot.
  Pl. 1.4821 (X15CrNiSi25-4, AISI 327).

A 9.1. szakaszban felsorolt rozsdamentes acélok fő ötvözési osztályainak 2008-as, globális felhasználási megoszlását szemlélteti a 9-3. ábra.

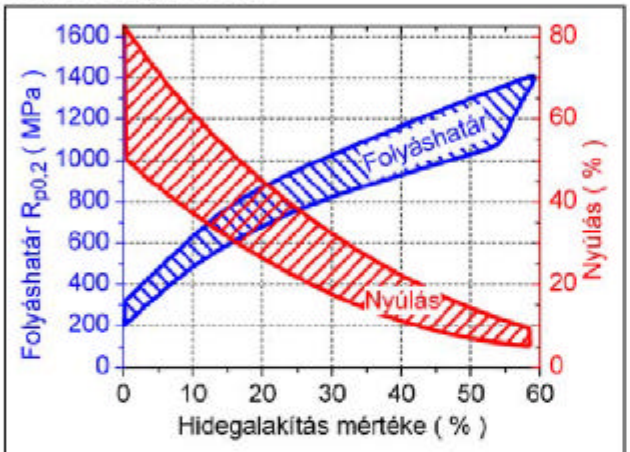


9-3. ábra – A rozsdamentes acélok felhasználásának megoszlása a fő ötvözési osztályok szerint

9.2. Az ausztenites korrózióálló acélok jellemző tulajdonságai és alkalmazásai

Az ausztenites acélokat általában vízben hűtik le a melegalakítás hőmérsékletéről (1050–1200°C), tehát edzést hajtanak végre, de mivel az M_S hőmérsékletük jóval kisebb, mint a szobahőmérséklet, a γ-vas nem alakul át martenzitté, hanem megmarad: ezt a hőkezelést „ausztenites lágyításnak" nevezik. Ha lassan hűl az ausztenites acél, gyakran keményedik és rideggé válhat, mivel az 500–800°C hőmérséklet tartományban a Fe és a Cr közös vegyülete a σ-fázis, esetleg Cr-karbidok vagy más vegyület válhat ki benne.

Az LKK kristályrács magyarázza a viszonylag csekély szilárdságot és a nagy szívósságot. A hidegalakítás következtében (hengerlés, mélyhúzás, hajlítás stb.) azonban rendkívül erősen keményednek (9-4. ábra), aminek az oka az, hogy az alakítás hatására az ausztenit egyre nagyobb része alakul át martenzitté. Az ausztenites acéloknál tehát nem csak az alakítási keményedés működik, hanem az alakváltozás indukálta fázisátalakulás is. Ez a jelenség nem mindenkor kívánatos: nagyon megnehezítheti a lemezalakítási műveleteket, és a forgácsolást.



9-4. ábra – 18% Cr, 10% Ni ötvözésű ausztenites korrózióálló acélok szilárdságának és nyúlásának változása (forrás: Colombié M: Stainless steels, 1991)

Az ausztenites korrózióálló acélok jól alkalmazhatók nagy hőmérsékleteken is, kb. 750°C-ig hőállók és kúszásállók is. A nagy hőmérsékleten fontos tulajdonságokat a N-nel és a B-ral való ötvözés javítja.

A *korrózióállóság* mint lényeges felhasználói tulajdonság jobb megértéséhez a legalapvetőbb korróziós alapismeretekkel tisztában kell lenni, ezért ezeket röviden áttekintjük. A korróziós folyamatokat két nagy csoportba soroljuk:

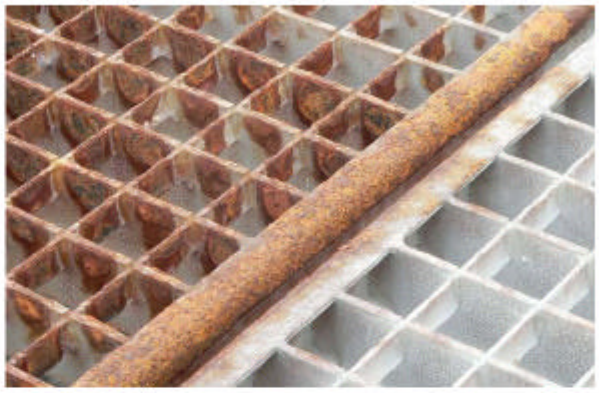
- nedves korrózió vagy elektrokémiai korrózió,
- száraz korrózió vagy kémiai korrózió.

A korrózióálló acélok – nevükkel ellentétben – ugyancsak korrodálódnak. A korrózió különféle típusait, amelyek száma több tucatra rúg, a megjelenési formájuk szerint két nagy csoportba soroljuk:

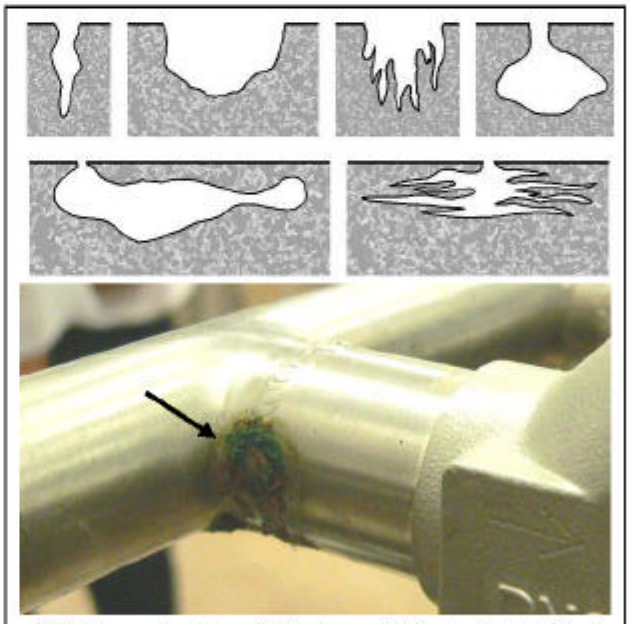
- Általános vagy egyenletes korrózió, amely a teljes felületen hat (9-5. ábra).
- Helyi korrózió, amely az anyag kitüntetett helyein, kis területen okoz károsodást. Ez a károsodás nem észlelhető könnyen, de váratlan és súlyos következményekkel járhat.

A 9-6–9-10. ábrán az ausztenites korrózióálló acélok néhány jellegzetes helyikorróziós károsodására láthatók példák:

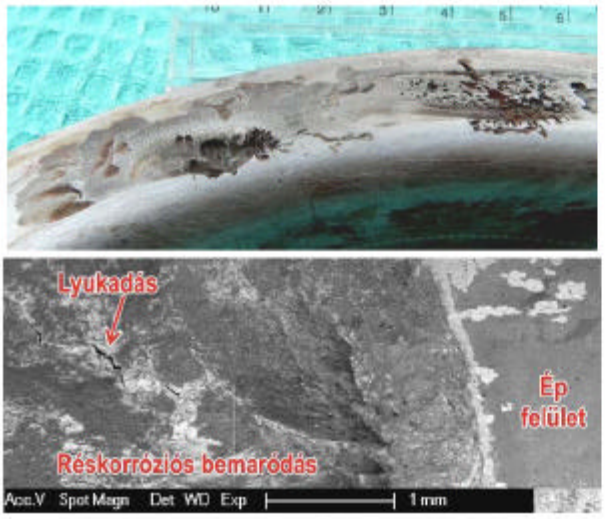
- lyukkorrózió (9-6. ábra),
- réskorrózió (9-7. ábra),
- szemcsehatármenti korrózió (9-8–9-9. ábra),
- feszültségkorrózió (9-10. ábra) és
- késélkorrózió (hegesztett kötések, 9-10. ábra).



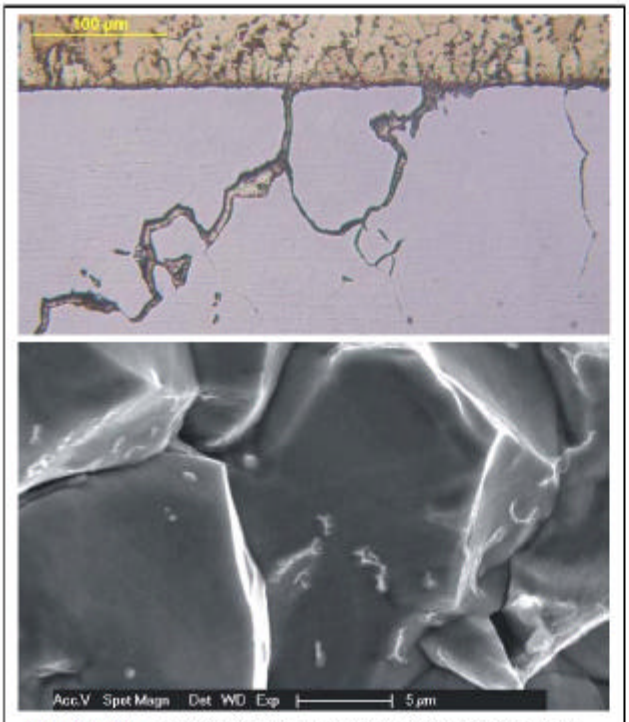
9-5. ábra – Általános korrózió 1.4304 anyagú rácsozaton, szennyvízkezelő üzemben



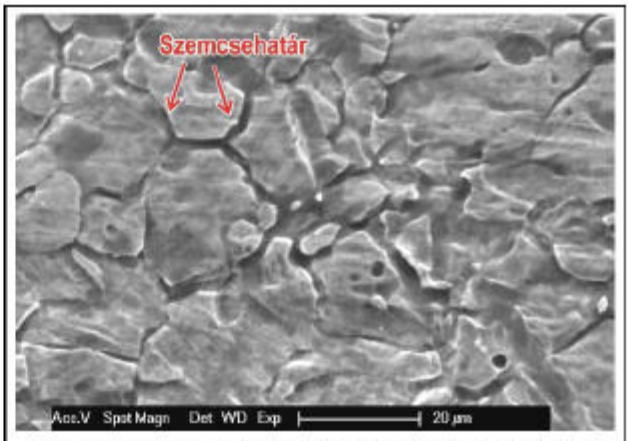
9-6. ábra – Lyukkorróziós bemaródások vázlata (fent), lyukkorróziós lyukadás nyoma pálinkafőzdei tápvezetéken; alapanyag: 1.4304 (18% Cr, 10% Ni)



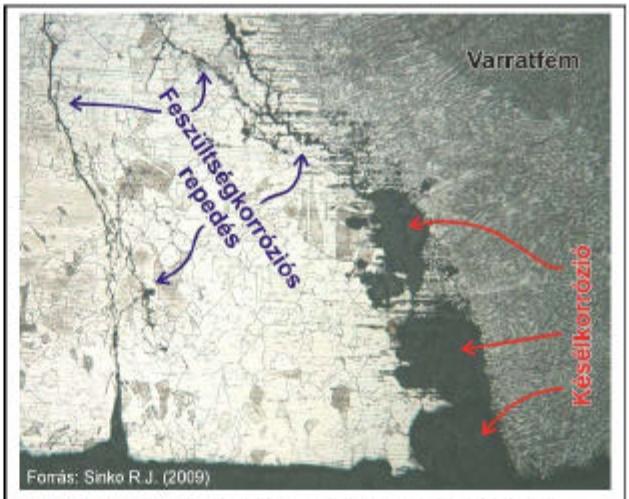
9-7. ábra – Fent: réskorróziós bemaródások vízvezeték karimájának tömítési felületén; alapanyag: 1.4304. Hőcserélőcső felületén képződött réskorróziós lyukadás; alapanyag 1.4571 (X6CrNiMoTi17-12-2)



9-8. ábra – Fémolvadék okozta szemcsehatármenti korróziós repedés 1.4304 típusú ausztenites acélban; a repedés keresztmetszeti csiszolaton (fent), a repedés töretfelületének pásztázó elektronmikroszkópi képe (lent)



9-9. ábra – Forró víz okozta szemcsehatármenti korróziós bemaródások 1.4571 anyagú acélcső felületén



9-10. ábra – Feszültségkorrózió és késélkorrózió 1.4404 típusú ausztenites acél hegesztett kötésében

A szemcsehatármenti korróziót az idézi elő, hogy a szemcsehatárokon kiváló karbidok – amelyek krómtartalma több mint 60% – elvonják a krómot a szilárd oldatból, és az így lecsökkent Cr-tartalmú anyagot megtámadja a korróziós hatású közeg. A karbidképződéshez természetesen szén is szükséges, ezért csak a 0,03%-nál nagyobb C-tartalmú ausztenites acélok érzékenyek (szenzibilisek) erre a károsodásra*.

A kristályközi korrózió elkerülése miatt fejlesztették ki a Ti- és a Nb-ötvözésű, ún. stabilizált acélokat, amelyekben a krómnál erősebb karbidképzők lekötik a szenet, másrészt pedig az extra kis C-tartalmú acélokat.

A továbbiakban néhány példán keresztül tekintjük át az ausztenites rozsdamentes acélok legjellemzőbb alkalmazásait (9-11–9-18. ábra).

** Ha a C-tartalom 0,02% helyett csak a duplájára nő az acélban, a szenzibilizáció kb. 40× gyorsabban következik be (kb. 1 óra alatt), míg ha tovább duplázódik (0,08%), már bő fél perc is elegendő hozzá, s ez hegesztéskor be is következik.*

9.2.1. Alkalmazási példák

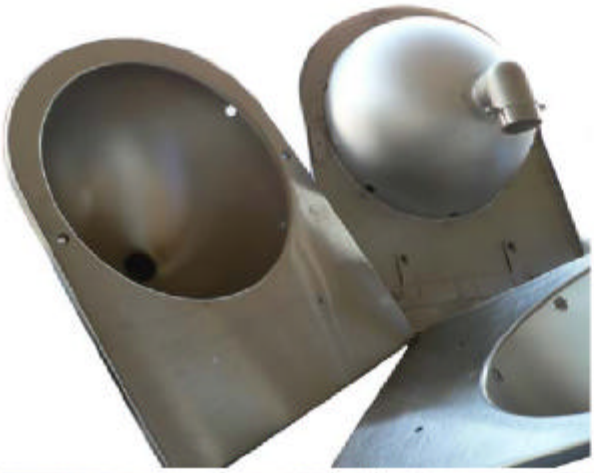
A felhasználók számára a legfontosabb tulajdonságok értelemszerűen a hőállóság, a kúszásállóság és a korrózióállóság a legkülönfélébb környezetekben, de ezek, valamint a mechanikai tulajdonságok és a gyártástechnológiai alkalmasság mellett fontos szerepet kaphatnak olyan különleges jellemzők, mint a paramágnesesség, a felület esztétikai megjelenése, a biokompatibilitás stb.

- Vegyipari, gyógyszeripari, élelmiszeripari tartályok, készülékek T ≈ 0 K üzemi hőmérsékletig is jók, mert a LKK fémek nem ridegednek el!
- Hőcserélők, atomerőművi gőzfejlesztők, reaktoralkatrészek.
- Vákuumtechnikai berendezések alkatrészei.
- Kül- és beltéri épületburkolatok, korlátok, bútorok, lámpaalkatrészek, karóratokok.
- Konyhai edények, szerelvények, evőeszközök.
- Búvárszivattyúházak, uszodai berendezések.
- Orvosi műtéti eszközök, implantátumok.

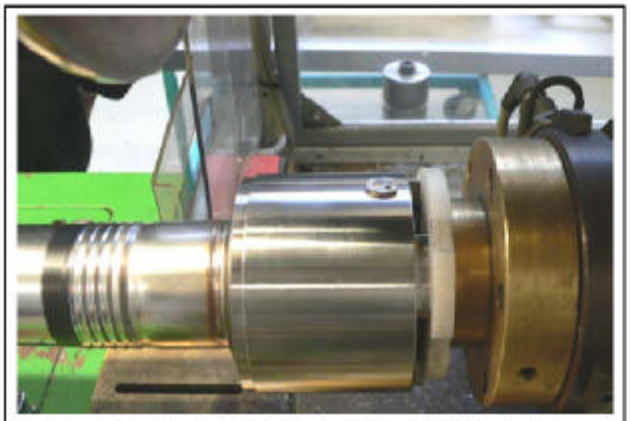
9-11. ábra – Ausztenites rozsdamentes acél termékek

9-12. ábra – Ausztenites rozsdamentes acél termékek

9-13. ábra – Használati melegvíztároló tartály becsomagolva; anyaga: 1.4571 (Dinox-H Kft. Tatabánya)



9-14. ábra – Vasúti kocsi mosdójának berendezési tárgyai; anyag: 1.4571 (Patent Kft. Cegléd)



9-15. ábra – Búvárszivattyú alkatrésze hegesztés közben; anyaga: 1.4539 / 904L (Grundfos Kft. Tatabánya)

9-16. ábra – Huzatfokozó turbina; anyaga: Cr-Mn ötvözésű acél; 1.4373 (X12CrMnNiN18-9-5, AISI 202)

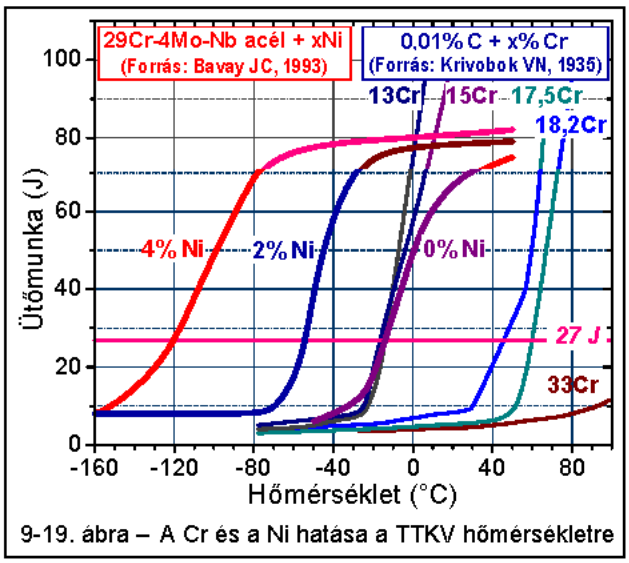
9-17. ábra – Keverőreaktor; anyaga: 1.4404

9-18. ábra – Szappantartó; anyaga: 1.4301

9.3. A ferrites korrózióálló acélok jellemző tulajdonságai és alkalmazásai

A ferrites acélok kristályrácsa TKK, és mivel nem ausztenitesíthetők, nagy hőmérsékleten hajlamosak a szemcsedurvulásra, ami hegesztésnél gyakran bekövetkezik. A 750°C-nál kisebb hőmérsékleteken a Fe és a Cr vegyülete, a σ-fázis vagy pedig az α'-fázis képződhet, amelyek egyaránt csökkentik a ferrites acélok szívósságát. A ferrites acélok szilárdsága jóval nagyobb, mint a lágyított állapotú ausztenites acéloké. Az új típusok ennek ellenére kiválóan mélyhúzhatók.

A ferrites acélok szívóssága a hőmérséklet csökkenésével is romlik: minél több Cr-ot tartalmaznak, annál nagyobb lesz a szívós–rideg átmeneti hőmérsékletük (TTKV). E kedvezőtlen hatást jelzi a 9-19. ábra: a 27 J ütőmunkához tartozó TTKV- hőmérséklet a Cr-tartalommal erősen növekedik. A Ni-tartalom hatása kedvező, amint ezt a 29Cr-4Mo-Nb ötvözésű, eltérő Ni-tartalmú szuperferrites acélok esete jól példázza az ábrán.



9-19. ábra – A Cr és a Ni hatása a TTKV hőmérsékletre

A nagyobb Cr-tartalmú ferrites acélok ridegtörési hajlama azt vonja maga után, hogy csak vékony lemezek, csövek formájában célszerű ezeket felhasználni: ekkor az elridegedés kockázata kicsi. A növelt hőmérsékleten bekövetkező kiválási folyamatok miatt alkalmazásuk felső határa általában 200–350°C (a ferrites hőálló acélok azonban 800–900°C-ig is képesek tartósan üzemelni).

A ferrites acélok korróziós jellemzőit nem tárgyaljuk ugyan, de azt megjegyezzük, hogy olyan esetekben célszerű az ausztenites acélok *helyett* alkalmazni őket, amikor klórt vagy más halogén elemet tartalmazó közegek hatásának van kitéve a berendezés, mivel a ferrites acélok kitűnően ellenállnak a kloridos közegekben fenyegető feszültségkorróziónak.

9.3.1. Alkalmazási példák

Az alkalmazást meghatározó tulajdonságok

- Mérsékelt általánoskorróziós, de kitűnő feszültségkorróziós ellenállás.
- Jó általános megmunkálhatóság, részletezve:
- Hegeszthetőség: problémás a szemcsedurvulási veszély miatt (a hegesztett kötések kifáradásra érzékennyé válhatnak).
- Forgácsolhatóság: kitűnő.
- Alakíthatóság: jó. Különösen a hidegalakítási célra optimalizált típusokra igaz ez a minősítés.
- Stabil a piaci áruk, mivel nem tartalmaznak Ni-t és Mo-t, amely elemek tőzsdei ára nagyon hektikusan mozog a Londoni Fémtőzsdén.

– Általános alkalmazási területek

- Építőipar, épületszerkezetek:
  Tetők, burkolatok, felvonók, mozgólépcsők, díszítőelemek, korlátok, függönytartók, földrengési rezgéscsillapítók, tetőventilátorok.
- Ipari berendezések:
  Csőhálózatok, félvezető- és folyadékkristálygyártó berendezések, kapcsolószekrények távközlési berendezésekhez, mérőberendezésekhez, légkondicionálókhoz, vezérlőpultokhoz.
- Szállítás, járműipar:
  Hűtőkonténerek, autóipari alkatrészek. Gépjárművek kipufogórendszerei. Autóbusz (pl. a Magyarországon termelő Nabi) és vasúti jármű vázszerkezetek.
- Konyhai eszközök:
  Főzőedények indukciós tűzhelyekhez, konyhai mosogatók, grillezőrácsok, pultok, élelmiszertárolók, edények, evőeszközök.
- Háztartási eszközök:
  Postaládák, szemétgyűjtők, fogasok, kapuk.
- Villamos készülékek:
  Hűtőszekrény, mosogatógép, mikrohullámú sütők, mosógépdobok (9-20–9-21. ábra).

– 10–14% Cr-tartalmú ferrites acélok

- Gépjárművek kipufogóinak anyaga az 1.4512 (AISI 409) acél, amely 600°C-ig alkalmazható.
- Fémbútorok bel- és kültéren.
- Vasúti kocsik, autóbuszok, szállítókonténerek jellegzetes anyaga az 1.4003 acél.
- Kopólemezek, abrazívközeg-szállítás eszközei, iszapkeverők; pl. „Cobranox 12" (X2CrNi12).

– 14–18% Cr-tartalmú ferrites acélok

- Hűtőszekrények, páraelszívók, mozgólépcsők, mosogatógépek, gáztűzhelyek burkolatának, továbbá vasalótalpak, mosógépdobok és mosogatók anyaga az 1.4016 (AISI 430) acél.
- Gépjármű-kipufogórendszerek, cukoripari berendezések anyaga: 1.4510 (AISI 439).

- Lift-, épület-, alagútburkolat, ajtókeret, tűzhelyek, konyhai edények, evőeszközök („18/C"), tejipari berendezések: 1.4509 (AISI 441).
- Erőművi nedvességleválasztó túlhevítők.

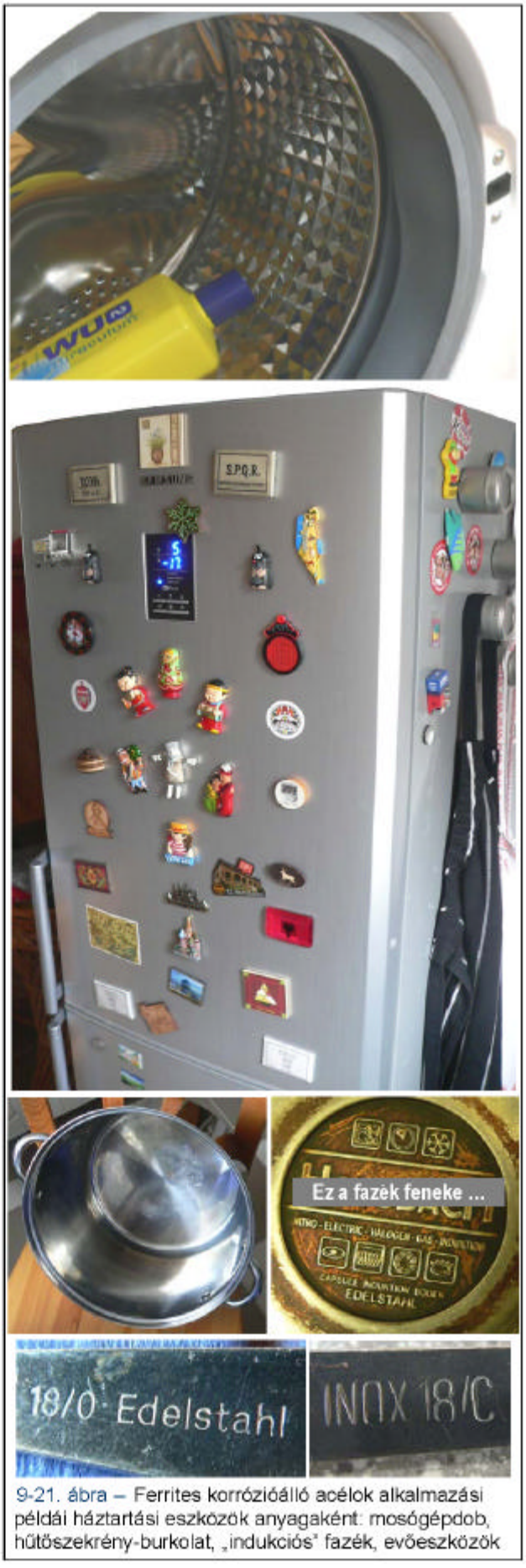
– **0,6–2,1% Mo-ötvözésű ferrites korrózióálló acélok**

- Melegvíztároló, vízforraló tartályok, csövek, hőcserélők: 1.4521 (AISI 444).
- Napenergia-hasznosító rendszerek vízforraló tartályai, csővezetékei: 1.4521 (AISI 444), 1.4113 (AISI 434), 1.4526 (AISI 436).

– **18–30% Cr-tartalmú ferrites korrózióálló acélok**

- Tengervizes és geotermikus hőcserélők kondenzátorok csövei, alkatrészei: AISI 445.
- Olajipari berendezések szerves savaknak kitett alkatrészei; 1.4592 (X2CrMoTi29-4), AISI 446, AISI 447.
- Karbamidgyártás berendezései: AISI 447, 448.
- A 21% Cr-tartalmú, Ti-nal vagy / és Nb-mal stabilizált, Ni- és Mo-mentes, Cu-ötvözésű ferrites acélok számos területen helyettesíthetik a Cr-Ni és a Cr-Ni-Mo ötvözésű ausztenites acélokat, és azoknál lényegesen olcsóbbak; ilyen pl. az AISI 445 vagy a JFE443CT márkanevű, Európában (még) nem szabványosított acél.

9-20. ábra – Ferrites korrózióálló acélok alkalmazási példái: gépkocsi-kipufogó (fent) és kavicsszállító vezeték üzem közben és kopás okozta horpadás után



9-21. ábra – Ferrites korrózióálló acélok alkalmazási példái háztartási eszközök anyagaként: mosógépdob, hűtőszekrény-burkolat, „indukciós" fazék, evőeszközök

9.4. A martenzites rozsdamentes acélok jellemző tulajdonságai és alkalmazásai

A martenzites acéloknak a korrózióállóság mellett a nagy szilárdság, kifáradási határ és kúszásállóság a legfontosabb jellemzőjük. Általában nemesített állapotban (nemesítés = edzés + megeresztés) kerülnek felhasználásra. A 9.1.5. szakasz szerinti 1. csoportjuk kivételével levegőn hűtve is edzhetők. 350–550°C között kiválásosan keményíthetők; a keményedés a finom, diszperz karbidok képződésének következménye.

A 4. csoportba sorolt hipereutektoidos típusok szilárdsága nemesített állapotban is igen nagy, folyáshatáruk eléri az 1800 MPa-t. A gyakran „lágynak" is nevezett *szupermartenzites acélok* (5. csoport) 690 MPa folyáshatárához 12% nyúlás társul, s így jól alkalmazhatók erősen igénybevett, nagyméretű forgógépek (pl. turbinák) tengelyeiként. A martenzites acélok korróziós jellemzőit nem tárgyaljuk.

9.4.1. Alkalmazási példák

A martenzites korrózióálló acélok és a martenzites kúszásálló acélok néhány jellegzetes alkalmazására találunk példát a következőkben.

– 0,15% C-tartalmú martenzites acélok

Közönséges háztartási és ipari kések, gőz- és gázturbinalapátok és koszorúk, fúvókák, szórófejek, rugós szelepek alkatrészei, nagyszilárdságú kötőelemek. Papír-, textil- és élelmiszeripari víz- és gőzrendszerek alkatrészei. Sebészeti és fogászati eszközök. Mind a szilárdság, mind a korrózióállóság terén mérsékelt igénybevételek esetén alkalmazzák.

Pl. 1.4006 (X12Cr13, AISI 410).

– 0,2–04% C-tartalmú martenzites acélok

Fogorvosi és sebészeti eszközök, kések, szivattyútengelyek és lapátok, műanyagfröccsöntő szerszámok, acélgolyók, kéziszerszámok, turbinalapátok, tablettázó szerszámok, üveg- és műanyaggyártási szerszámok, golyóscsapok.

Pl. 1.4021 (X20Cr13, AISI 420), 1.4108.

– 0,5–0,7% C-tartalmú martenzites acélok

Golyóscsapágyak és gördülőpályák, mérőhasábok és mérőműszerek, szelepalkatrészek, professzionális konyhai kések, evőeszközök, vágószerszámok, sebészeti eszközök, ollók, szikék, kézi és gépi borotvák, fröccsöntő- és présszerszámok műanyagokhoz.

Pl. 1.4116 (X50CrMoV15), „Sandvik 13C26".

– 0,6–1,2% C-tartalmú martenzites acélok

A legnagyobb keménységű és kopásállóságú csapágyak, tűgörgők golyósorsók, mérőetalonok, fröccsszerszámok, kések, szikék, mérőműszerek. Tűszelepek, fúvókák, dízelmotor-alkatrészek, olajipari szelepek és szivattyúk alkatrészei; pl. 1.4125 (X105CrMo17, AISI 440C).

A nagy C-tartalmú csoportba sorolhatunk néhány olyan, porkohászati eljárással gyártott martenzites acélt is, amelyek rendeltetésük szerint ugyan szerszámacélok, de nagy hőmérsékletnek, koptatóhatásnak és agresszív korróziós hatású anyagoknak egyaránt ki vannak téve. Ezeknek a különleges martenzites acéloknak az egyik képviselője a „Böhler M390 Microclean" márkanevű (nem szabványosított) martenzites acél. Olyan műanyag-megmunkáló szerszámok anyaga, amelyekkel sok és agresszív töltőanyagot tartalmazó termékeket állítanak elő: pl. DVD-lemezeket, duroplasztokat, elektronikai nyáklemezeket, üvegszálas PA66-ot és PES-t 400°C-on. Emellett élelmiszeripari aprítók vágószerszámaként is nagy vágóteljesítményt tesz lehetővé.

– Szupermartenzites acélok

Nagyméretű tengelyek, propellertengelyek, csavarok, keverőrendszerek alkatrészei, papíripari rendszerek alkatrészei, vízerőművi és vízturbina alkatrészek – pl. Kaplan- vagy Pelton-turbina, pillangószelepek, tengerfenéki csővezetékek, periszkópok. Ezek az acélok a legjobban hegeszthető martenzites acélok, pl. 1.4418 (X4CrNiMo16-5-1) vagy 1.4313 (X4CrNiMo13-4); (9-24–32. ábra).

– Martenzites kúszásálló acélok

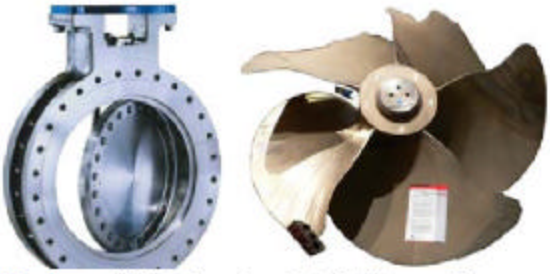
Repülési és űrhajózási célú alkalmazásokban gázturbina- és kompresszor-alkatrészek anyaga pl. az 1.4911 (X8CrCoNiMo10-6) acél.

Nagyhőmérsékletű kazáncsövek és gőztúlhevítő szerelvények anyaga az 1.4903 acél (azaz a X10CrMoVNb9-1, illetve AISI A213/P91).

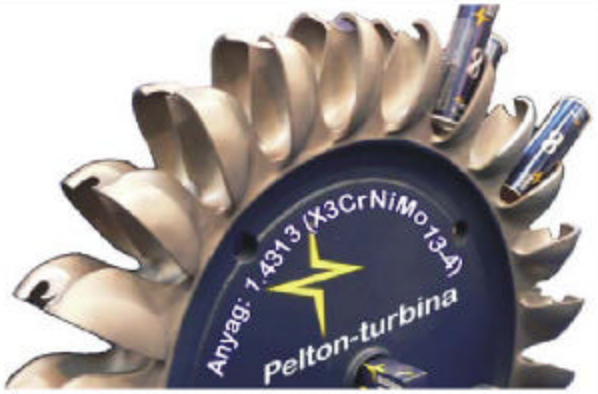
Az 1.4922 (X20CrMoV11-1) acél gőzturbina alkatrészek anyaga, emellett a vegyiparban alkalmazzák olyan területeken, ahol fontos elvárás a nagynyomású hidrogénnel szembeni ellenállás.

Gőzturbina alkatrészek, turbinalapátok, csőhálózati szerelvények és csavarok anyaga az 1.4923 (X22CrMoV12-1) és a nitrogénnel is ötvözött 14913 (X19CrMoNbVN11-1) acél; mindkettő akár 580°C hőmérsékletig is alkalmazható.

Présszerszámok és fröccsszerszámok anyaga az 1.4935 (X20CrMoWV12-1) és a még nagyobb szilárdságú 1.4938 (X12CrNiMoV12-3) acél.



9-22. ábra – Pillangószelep és (sérült) propeller



9-23. ábra – Pelton-turbina járókereke

9-24. ábra – Martenzites acél professzionális kések

9-25. ábra – Fogászati eszközök

9-26. ábra – Sebészeti szikék

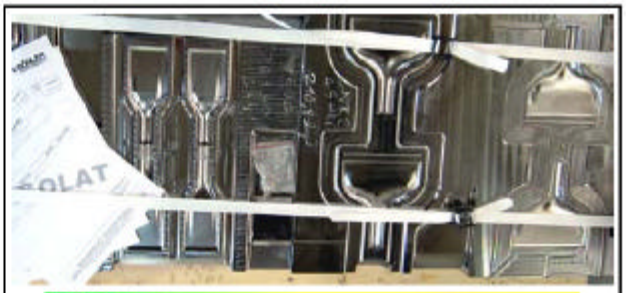
9-27. ábra – Ollók, borotvapengék

9-28. ábra – Tengeralattjáró-periszkópcső

9-29. ábra – Golyósorsók

9-30. ábra – Önmetsző csavarok és tollhegyek

9-31. ábra – Gőzturbina forgórész teljes lapátozással



9-32. ábra – Fröccsöntőszerszámok, extrudercsigák

9.5. A duplex korrózióálló acélok jellemző tulajdonságai és alkalmazásai

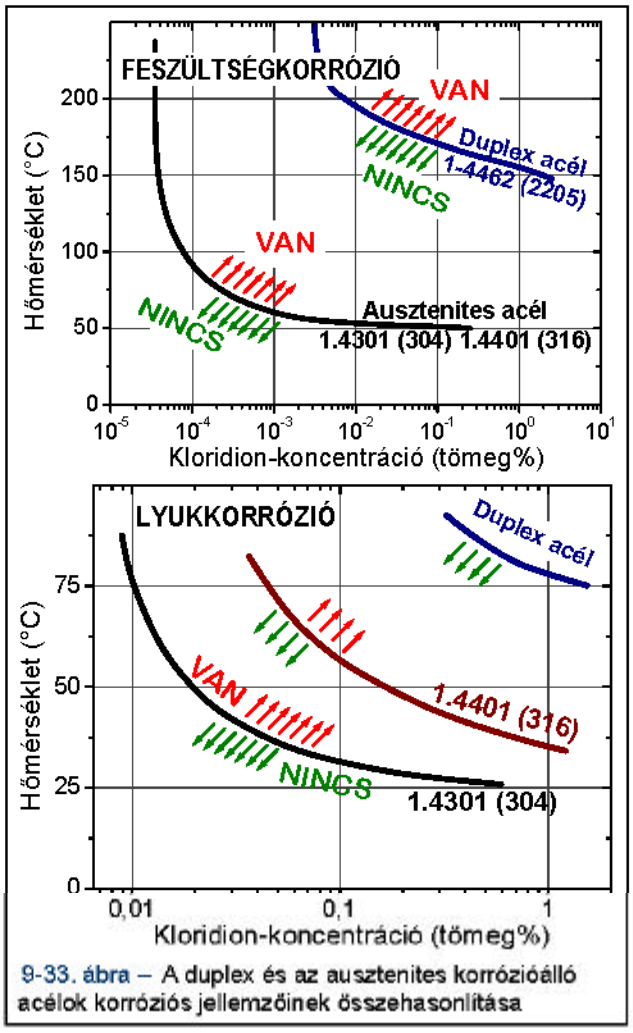
A duplex rozsdamentes acélok általában 40–60% δ-ferritet tartalmaznak. A 9.1.10. szakaszban láttuk, hogy az ötvözőelemek száma és mennyisége miként növekedik a sovány duplex acéloktól a hiperduplexekig; ennek következtében azonban fokozottan érzékenyek a hőfolyamatokra. Minél több ötvözőt tartalmaznak, annál gyorsabban képződhetnek bennük intermetallikus fázisok és nitridek; karbidok nemigen képződhetnek, ugyanis ahhoz túl kevés szenet (C ≤ 0,03%) tartalmaznak az egyetlen hőálló típus kivételével.

A duplex acélok felhasználását nyilvánvalóan a korróziós ellenállásuk határozza meg, amely különösen a lyukkorrózióval, a réskorrózióval és a feszültségkorrózióval szemben kiemelkedő. Ennek szemléltetésére szolgál a 9-32. ábra, amelyen jól látható, hogy a korróziós környezet hatását döntően meghatározó klórtartalom és hőmérséklet függvényében mennyivel szélesebb az az üzemeltetési tartomány, amelyben a duplex acélok biztonságosan, korróziós problémák nélkül üzemelhetnek a legelterjedtebben használt ausztenites korrózióálló acélokkal szemben.

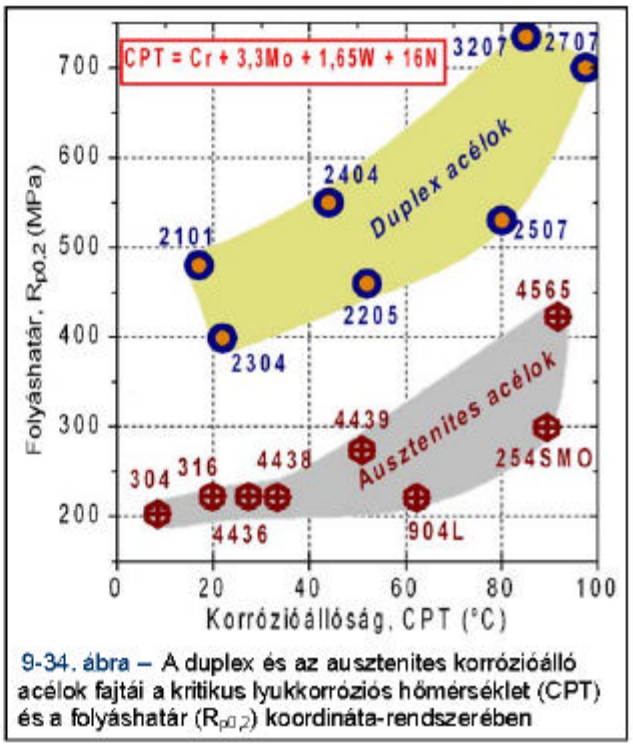
A kitűnő korrózióállóság mellett fontos felhasználói előnyt kínál a duplex acélok nagy szilárdsága; a folyáshatáruk 400–500 MPa, míg az ausztenites acéloké (lágyított állapotban) csak 180–220. Ez azt eredményezi, hogy ugyanazt a szerkezetet, pl. csövet vagy tartályt lényegesen kisebb vastagságú duplex acél alapanyagból is el lehet készíteni.

Felvetődik a kérdés, hogy ha ennyi előnyt kínálnak a duplex acélok, akkor miért csak alig 1%-ot tesz ki a részesedésük a rozsdamentes acélok összesített felhasználásában? Nos, erre a kérdésre a rövid válasz az, hogy az előnyök és a hátrányok egészét tekintve még nagyon friss a duplex acélok általánosan kedvező mérlege. Ugyanakkor le kell szögezni, hogy a Ni-ár extrém hullámzása és a sovány duplex acélok berobbanása következtében dinamikusan elkezdett növekedni a felhasználásuk – pl. megjelent a kínálatban, 120 év (!) garanciát vállalva, a sovány duplex betonacél is. Így az elkövetkező években biztosra vehető a felhasználásuk további ütemes bővülése.

A már említett két fontos felhasználói tulajdonságot és a szilárdságot, együttesen szemlélteti a 9-34. ábra; ezen az ábrán a korrózióállóságot kritikus lyukkorróziós hőmérséklet fejezi ki, amely jelzi, hogy az anyag milyen hőmérséklet-határig használható lyukkorrózió hatású közegben.



9-33. ábra – A duplex és az ausztenites korrózióálló acélok korróziós jellemzőinek összehasonlítása



9-34. ábra – A duplex és az ausztenites korrózióálló acélok fajtái a kritikus lyukkorróziós hőmérséklet (CPT) és a folyáshatár ($R_{p0,2}$) koordináta-rendszerében

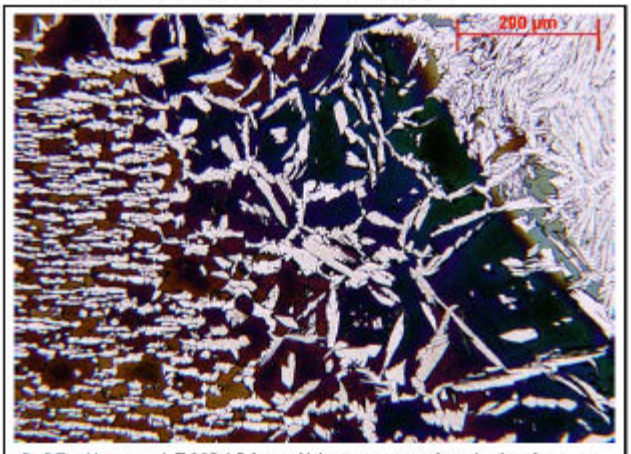
9.5.1. Alkalmazási példák

A duplex acélok – amelyek jellegzetes szövetszerkezetét a 9-35. ábra mutatja – alkalmazásának legfontosabb szempontjai a következők:

- Kitűnő lyukkorróziós, réskorróziós és feszültségkorróziós ellenállás, pl. tengervízben.
- A sovány duplex acélok korrózióállósága jobb a konkurens ausztenitesekétől (304L, 316L).
- Nagy szilárdság és kifáradási határ.
- Jó hegeszthetőség, de különleges gondosságot kíván a hegesztés tervezése és kivitelezése.
- Az alkalmazás hőmérséklet-határa 325°C.
- A Ni- és Mo-szegény sovány duplex típusok ára alig érzékeny a fémtőzsdei ármozgásokra.

Az említett fontosabb alkalmazási szempontok miatt egyre bővül a duplex acélok alkalmazása; felsorolásszerűen említve néhány jellegzetes iparágat és bemutatva terméket (9-36–9-41. ábra):

- Az olajipar, a vegyipar és a papíripar klórnak kitett berendezései.
- Vegyianyag-szállító tankhajók, hadihajók, tengervizes hőcserélők, tengervíz-sótalanító berendezések, tengeri hidak. Tengeri olaj- és gázkitermelő fúrószigetek szerkezeti elemei, a „köldökzsinór vezetékek" csövei.
- Füstgáz-kéntelenítők, füstgázos hőcserélők.
- Hosszú élettartamú betonacélok.



9-35. ábra – LDX2101 acél hegesztett kötésének szövetszerkezete. A zónák balról jobbra: alapanyag, hőhatásövezet, varratfém. A fehér színű fázis az ausztenit

A rozsdamentes acélok felhasználásában nagy jelentőséget kap a felület, mivel ez a korróziós viselkedést is erősen befolyásolja, és az esztétikai megjelenést is meghatározza. A felületet az acélgyártó is és a végtermékgyártó is gondosan kezeli annak érdekében, hogy a két említett szempont érvényesüljön. A felületkezelés lehet kémiai (pl. revétlenítés, pácolás, passziválás), elektrokémiai (pl. elektropolírozás, színezés) és mechanikai (pl. csiszolás, kefézés, üveggyöngyszórás).

9-36. ábra – Bordás cső (a) és hőcserélő-modellek: csőköteges hőcserélő (b) és lemezes hőcserélő (c)

9-37. ábra – Vegyianyag-szállító hajó és tartálykocsi

9-39. ábra – Papírgyártó préshenger gyártás közben

9-38. ábra – Tengeri olajkitermelő fúrószigetek „köldök-zsinór-vezetékének" metszete folyadékszállító csövekkel és villamos kábelekkel a belsejében

9-40. ábra – Vegyianyag-tároló tartály

9-41. ábra – Tartályszállító kocsi. Tervező és gyártó két BME-s diák: *Lipták Gábor* és *Török Máté* (BME 2011)

10. fejezet
A nikkel és ötvözetei

A „The Big Nickel" emlékmű Kanadában

10. A nikkel és ötvözetei

A Ni-ötvözetek kiváló korrózió-, hő- és kúszásállóságuk miatt az energiaipar, vegyipar, olajipar és a légi járművek hajtóművei terén óriási karriert futottak be. A Ni-ötvözetek mellett a közeli rokon vasötvözetekről és kobaltalapú szuperötvözetekről is szó esik. A tiszta nikkel fizikai tulajdonságai:

- Olvadáspont: 1440°C.
- Kristályszerkezet: LKK.
- Sűrűség 20°C-on: 8890 kg/m^3.
- Villamos ellenállás 20°C-on: 9,2 μΩ·cm.
- Vezetőképesség 20°C-on: 74 W/(m·K).

10.1. A nikkelötvözetek főcsoportjai

- A nedves korrózionak ellenálló ötvözetek.
- Hőálló ötvözetek
- Kúszásálló szuperötvözetek.
- Különleges fizikai tulajdonságú ötvözetek.

A hőálló és a kúszásálló Ni-ötvözetek legtöbbje egyaránt alkalmas mindkét igénybevétel esetén.

10.1.1. A korrózióálló nikkelötvözetek

– Az ötvözetlen vagy „ipari" nikkel

A C-tartalom szerint két típust forgalmaznak; meg kell jegyezni, hogy a 10-1. táblázatban fel nem tüntetett Co-tartalom általában 0,5%, és összevonva értendő a Ni-lel ((Ni + Co) > 99%). Az ötvözetlen nikkelek jellemző ötvözőtartalma, tömeg%-ban, a 10-1. táblázatban látható.

Nikkel 200 / 2.4066	< 0,15	< 0,3	< 0,4	< 0,3	< 0,2
Nikkel 201 / 2.4068	< 0,02	< 0,3	< 0,4	< 0,3	< 0,2

10-1. táblázat: Az ötvözetlen nikkelek összetétele

Lágyított állapotban a szakítószilárdság 380 MPa, a folyáshatár 100 MPa, mely utóbbit a hidegalakítás akár a duplájára is növelhet, miközben a nyúlás az ötödére, 5%-ra, csökken. A szívóssága – lévén a Ni LKK kristályszerkezetű – igen kis hőmérsékleteken is kiváló.

Alkalmazási területét alapvetően a korrózióállósága jelöli ki, mivel jól ellenáll a nedves korróziónak redukáló, ill. enyhén oxidáló közegekben, környezetekben. Ez annak köszönhető, hogy a felületén egy ellenálló és jól tapadó oxidréteg alakul ki, mely megvédi a további károsodástól.

Tökéletesen ellenáll a lúgoknak és a nemoxidáló savaknak, viszont a HNO_3 salétromsav megtámadja. Oxidáló (kénmentes) atmoszférában 1050°C-ig alkalmazható.

– Nikkel-réz ötvözetek

A Ni-Cu ötvözetek elterjedt kereskedelemi elnevezése **Monel**. Az alaptípusban 28–34% a Cu. A Monelek legjellemzőbb alkalmazásai: nagynyomású gőz, víz és tengervíz szállítására, elpárologtatására szolgáló vezetékek, tartályok, rézfúvós hangszerek dugattyúi, tengerjáró hajók hajócsavarjai készülnek a Monel ötvözetekből. Az ötvözetek jelölésére gyakran az UNS-kódot is használják (UNS = unified numbering system).
Példák: Monel 400 (EN 2.4360, NiCu30Fe, UNS N04400), Monel K500 (EN 2.4375, másként jelölve: NiCu30Al, UNS N05500).

– Ni-Cr-Fe és Ni-Mo alapú ötvözetek

A legnagyobb gyártók (Inco, Haynes, Creusot Loire) jelölési rendszerét vette át a kereskedelem és a felhasználói kör, mivel a szabványos jelölések kissé komplikáltak; emiatt előszeretettel emlegetik ezeket az ötvözeteket a márkanevükön: **Inconel**, **Hastelloy**, **Incoloy**, **Nimonic** stb.

Mindegyik ötvözet sajátos korróziós ellenállással bír, ezért szinte testre szabott alapanyagként kell őket tekintenünk a különféle korróziós feltételekre. Az Al- és/vagy Ti-ötvözés kiválásosan keményíthetővé teszi az adott ötvözetet.

a) Ni-Cr-Fe alapú ötvözetek:

Alaptípusnak számító ötvözet a Hastelloy G (2.4618, NiCr22Mo6Cu) és az Incoloy 825 (2.4858, NiCr21Mo). Alkalmazásuk: kénsavas, foszforsavas, tengervizes és klóros környezetben üzemelő berendezések anyagaként.

b) Ni-Mo alapú ötvözetek:
A főötvözőként csak molibdént tartalmazó Hastelloy B2 (2.4617, NiMo28) ötvözet tartozik ide. Alkalmazása: elsősorban sósavas és fluorvas környezetben üzemelő berendezések anyaga.

c) Ni-Cr-Mo ötvözetek

A legismertebb három típus:
– Hastelloy C4 (2.4610, NiMo16Cr16Ti),
– Hastelloy C276 (2.4819, NiMo16Cr15W),
– Inconel 625 (2.4856, NiCr22Mo9Nb).

Alkalmazási területük rendkívül széles a kiváló korrózióállóságuk, különös tekintettel a nagy hőmérsékleten is mutatott lyukkorróziós és réskorróziós ellenállásuk miatt; vegyipari reaktor (Inconel 625), tengeralattjáró-motor alkatrészek (Inconel 725) anyagaként is gyakori.

A már említett Ni-ötvözetek némelyikének korrózióállóságára vonatkozóan mutat néhány jellemző adatot a 10-2. táblázat, megadva az alkalmazás határhőmérsékletét is.

Közeg	Nikkel 201	Monel	Inconel 600
Levegő	1050°C	550°C	1100°C
CO_2	1200°C	820°C	1150°C
Hidrogén	–	1100°C	1150°C
Klór	550°C	450°C	550°C
Fluor	–	490°C	400°C
Sósav (HCl)	520°C	250°C	500°C
Fluorsav (HF)	–	650°C	650°C
Nátrium	–	600°C	900°C
Vízgőz	–	425°C	800°C

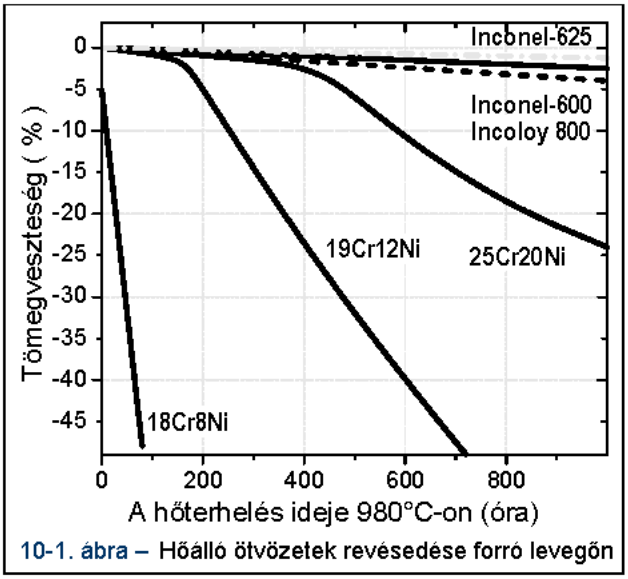
10-2. táblázat: Ni-ötvözetek alkalmazásának határai

A nedves korrózionak ellenálló Ni-ötvözeteket a meglehetősen komplikált felépítésű MSZ EN ISO 15156-3:2010 szabványban lehet megtalálni, amelyben nem a szokásos jelölési rendszer szerepel (amelynek a DIN 17744 a valódi alapja), hanem az UNS-kódok rendszere.

10.1.2. Hőálló nikkelötvözetek

– Ni-Cr és Ni-Cr-Fe hőálló ötvözetek

Ebbe a csoportba tartozik a klasszikus ötvözet, az ún. „Alloy 20” (2.4660, NiCr20CuMo), amelyet elsőként alkalmaztak kiváló melegszilárdsága és hőállósága miatt, mégpedig fűtőellenállások anyagaként. A hőálló nikkelötvözetek legelterjedtebb típusa jelenleg az Inconel 600 (2.4816, NiCr15Fe) és 601 (2.4851, NiCr23Fe). A forró levegővel szembeni ellenállásukat szemlélteti a 10-1. ábra, összehasonlítva 3–3 Ni-ötvözetet és ausztenites acél viselkedését.



10-1. ábra – Hőálló ötvözetek revésedése forró levegőn

A hőálló nikkelötvözetek iránt támasztott követelményeket meghatározó szabvány az MSZ EN 10095:2000 Hőálló acélok és nikkelötvözetek.

– Fe-Ni-Cr ötvözetek

A hőálló ötvözeteknél említjük ezeket az ötvözeteket. Valójában nem Ni-ötvözetek, mert a vas a fő alkotójuk. A szabványosítás a hőálló acélokhoz (MSZ EN 10095:2000), illetve a kúszásálló acélokhoz (MSZ EN 10302:2008) sorolta be őket, noha nem is „igazi” acélok, lévén a vastartalmuk nem kisebb 50%-nál. A 25% Cr, 20% Ni ötvözésű ausztenites hőálló acéloknál lényegesen jobb korróziós ellenállás jellemzi a szóban forgó ötvözeteket oxidáló, karbonizáló és szulfidizáló közegekben egyaránt. Gyakran említik őket legismertebb márkanevükön „Incoloy” ötvözetekként. Legfontosabb típusaik az Incoloy 800 (1.4876, X5NiCrAli31-20), 800H (1.4958, X5NiCrAlTi31-20) és a 800HT (1.4959, X8NiCrAlTi32-21).

10.1.3. A kúszásálló nikkel- és kobaltötvözetek

A nagy hő- és kúszásállóságú, ún. szuperötvözeteket a gázturbinák elterjedése és azok teljesítményfokozásának igénye hívta életre. A mai korszerű sugárhajtóművek 1300°C körüli hőmérsékleten üzemelnek, s bár a gázturbinák alkatrészeit belülről hűtik, a szerkezeti anyagokra rendkívüli hő- és mechanikai terhelés hat, amelyekkel szemben azoknak ellenállónak kell lenniük.

A legnkább igénybe vett alkatrészek a gázturbinalapátok (10-6. ábra), amelyek az említett terheléseknek csak úgy tudnak megfelelni, hogy a szilárdságnövelési módszerek számos hatásmechanizmusát kiaknázó technológiával állítják őket elő. A felhasznált, akár 10-15 ötvöző (C, Cr, Co, Ni, Mo, W, Ti, Al, Nb, Fe, B, Zr, Ta, V, Re, Hf, La, Y) mindegyike sajátos szerepet tölt be az irányított egykristályként növesztett és kiválásosan keményített alkatrészben.

A kúszásálló szuperötvözetek az ötvözetek fejlesztésének egyik csúcspontját jelentik amiatt, hogy különleges tulajdonságaikat az anyagtudományi „eszközök” együttes és tudatos alkalmazása hozta létre. Néhány típusuk: Inconel 718, 713C, 738, Hastelloy X, amelyek nikkelötvözetek, valamint a Waspaloy, a 10-3. táblázatban látható összetételű Haynes 25 (CoCr20W15Ni, 2.4964), MP35N, L605, amelyek Co-ötvözetek.

51	10	20	15	3	1.5	0.4	0.10

10-3. táblázat: A Haynes 25 típusú kobaltötvözet kémiai összetétele (tömeg%)

A kúszásálló Ni- és Co-ötvözetek követelményeit előíró szabvány: MSZ EN 10302:2008 Melegszilárd acélok, nikkel- és kobaltötvözetek.

10.2. További ismeretek a nikkelről

A svéd *A. F. Cronstedt* (1722–1765) volt az első, aki 1751-ben elsőként izolálta a nikkelt az egyik arzénes ércéből, a nikkolitből, bár az ember már évezredek óta ismeri ezt a fémet: a meteoritokból jutott hozzá, és használta fémtárgyak előállítására. A tiszta nikkelt először a tiszta mangán és a volfrám (*G. Scheele*-vel együtt) első előállítója, *T. O. Bergman* állította elő 1771-ben. A modern időket megelőzően a nikkel fő alkalmazási területe a kupronikkel pénzérmék gyártása volt. 1865 körül fedezte fel *L.A. Garnier* és *J. Heurtaux* a nagy új-kaledóniai lelőhelyeket, így csak ettől az időtől beszélhetünk érdemi nikkelkohászatról.

A kémiai elemek gyakorisági sorrendjét tekintve a nikkel a 23. Ezüstfehér színű, jól alakítható, és az ilyen alaptulajdonságú fémek között a legkeményebb. 355°C-ig ferromágneses, jó hő- és áramvezető. A levegőben nem korrodálódik, mivel védő oxidrétege stabil és összefüggő.

A nikkel előállítása kétféle ércből történik. A szulfidos érc teszi ki a világtermelés mintegy 2/3 részét, a maradék pedig oxid. A nikkel fő kénes ércei: pentlandit, pyrrhotit, pirit és kalkopirit, továbbá breithauptit, millerit, polidimit vagy nikkelpirit, violarit és ullmannit. Az ércek fő lelőhelyei: Ausztrália (Kambalda), Oroszország (Norilszk-Talnakh), Kína, Dél-Afrika (Bushveld), Finnország, USA (Stillwater, MO) Kanada (Sudbury, ON). Ezek a lelőhelyek kb. 400 millió tonna nikkel- és egyéb fémércet képviselnek, összesen mintegy 1,5% Ni-tartalommal. Belőlük a Ni mellett kinyerhető egyéb fémek a réz, az arany, az ezüst és a Pt-csoport tagjai: Pt, Pd, Co.

Az oxidos ércek gyakran külszíni fejtéssel is kitermelhetők. Szemben az egyéb fémekben is gazdag szulfidos ércekkel, az oxidosak általában csak kobaltot tartalmaznak. Az almazöld színű garnierit vagy falkondoit legnagyobb lelőhelyei Új-Kaledóniában találhatók. A másik oxidos ércfajta, a nikkeles lateritek fő lelőhelyei Kubában, Ausztráliában és Görögországban találhatók. Ausztráliában ezt elsősorban ferronikkellé alakítják át.

Tehát három fő érctípus szolgál a nikkel előállítására: a kénes ércek és kétféle oxidos érc. Nyilvánvaló, hogy a kohászati technológiának illeszkednie kell a nyersanyag és az érckitermelés jellemzőihez, ezért három fő technológiai vonal terjedt el. Ezeket gyakran emlegetik kanadai, kubai, illetve kaledóniai módszernek. Kanadában, amely a legnagyobb nikkeltermelő ország, Sudbury bányái adják a kanadai nikkelérctermelés negyedét.

10.2.1. A nikkel felhasználása

Mint a legtöbb fém, a tiszta nikkel felhasználása is elhanyagolható az ötvözetként való alkalmazások mellett. A 10-4. táblázat mutatja, hogy a nikkelötvözetek és a Ni-tartalmú acélok felhasználási területe hogyan oszlott meg a 2000. évben. Jól látható, hogy a nikkel legjelentősebb felhasználási területe a rozsdamentes acélok (korrózióálló és hőálló acélok) gyártása, mivel ez a szektor képviseli az összfelhasználás csaknem 2/3 részét. Fontos kiemelni, hogy 1980-ban ez a részarány még csak 49% volt. Nyilvánvaló, hogy az erőteljes növekedés a rozsdamentes acélok dinamikus térhódításával függ össze: ebből az acéltípusból a világon felhasznált éves mennyiség 1950-ben érte el az 1 millió tonnát, és 20 év alatt ez megduplázódott. 1970-től kezdve rendkívül erőteljes növekedés figyelhető meg, amely lényegében máig tart, és ennek köszönhető, hogy 1997-ben már 17 Mt, 2011-ben pedig ennek közel a kétszerese volt az éves termelés, és jelentős az újrafeldolgozás aránya.

A fémtárgyak felületkezelésének egyik fő módszere a galvanikus nikkelezés (10-5. ábra).

Rozsdamentes acélok gyártása	64%
Nikkelötvözetek gyártása	15%
Egyéb acélok gyártása	8%
Galvántechnika	7%
Pénzérmegyártás	2%
Akkumulátorgyártás	3%
Egyéb (pl. mágnes)	1%

10-4. táblázat: A nikkelötvözetek és a Ni-tartalmú acélok felhasználási területeinek megoszlása 2000-ben

A nikkelt a modern ötvözetek leggyakoribb ötvözőjének tekinthetjük. Ma a világon több mint 3000 féle, Ni-tartalmú ötvözetet tartanak nyilván. Az egyik legfontosabb és legérdekesebb alkalmazás a polgári és katonai gázturbinák, ill. rakétahajtóművek gyártása. Ezen a téren ma több mint 100 Ni-alapú szuperötvözet ismert. Mintegy 20% növekedést jelentene a turbóreaktorok hatásfokában az, ha 900°C-ról 1200°C fölé növekedne az üzemi hőmérséklet. A mai ötvözetekkel elért maximális hőmérséklet 1050°C, és ezen a hőmérsékleten kell a szóban forgó anyagoknak ellenállniuk az oxidációnak és a kúszásnak.

Az akkumulátor célú felhasználás a nagyteljesítményű Ni-Cd akkumulátoroktól a szórakoztató elektronikai cikkek Ni-MH (nikkel-fémhidrid) akkumulátoraiig terjed.

10.2.2. Pénzérmegyártás

A nikkel egyik legrégebbi alkalmazása a pénzérmék gyártása. A leghíresebb nikkelpénzek a kínai „képénz” (Kr.e. 9–24. század) és az 1881-ben vert svájci 20 centime-os. A kéteurós érmékben a külső rétegek kupronikkelből (75Cu-25Ni), a belső 3 réteg CuZn20Ni5 / Ni / CuZn20Ni5-ből készülnek. Az egyeurós érme külső CuZn20Ni5 anyagú, a belső rétegek: CuNi25 / Ni / CuNi25.

Sokan aggódtak az EU-ban, a pénzérmékben lévő nikkel okozta allergia miatt. Az 50, a 20 és a 10 eurócentesek allergén voltát egyszerűen cáfolja anyaguk, a Cu89Al5Zn5Sn1 „nordic gold” ötvözet Ni-mentessége. Az 5, 2 és 1 centeseket acélból verik, így ezeknél is csak a lemaszatolódó rézbevonat kellemetlenségét kell elviselni.

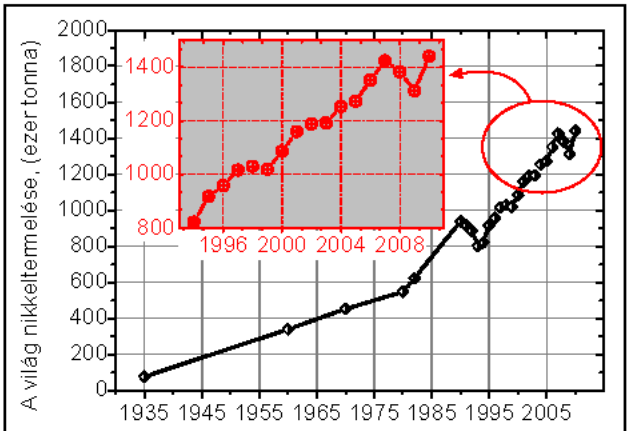
A magyar pénzérmék közül csak a sárgaréz 100-as nem tartalmaz nikkelt, az ötvenes és a forgalomból már kivont kettes kupronikkel, a többi horganyt is tartalmaz. Egyes becslések szerint a nikkel pénzérme célú felhasználása a teljes felhasználás 6%-át is kiteszi.

Egy egészen különleges pénzérme látható e fejezet nyitólapján: a „The Big Nickel”. A híres kanadai emlékmű atyja, Sudbury seriffje, *Ted Szilva* (!) 1960-ban határozta el, hogy az 1951-ben, a nikkel felfedezése bicentenáriumának tiszteletére nikkelből vert ötcentesnek emlékművet állít, amely városának jelképe lehet. 1964-ben avatták fel az emlékművet, amely 9 méter magas és 60 cm vastag, de nem nikkelből, hanem favázra erősített rozsdamentes acélból készítette *Bruno Cavallo*. 2001 áprilisában új helyen állították fel.

10.2.3. A nikkelpiac főbb adatai

– A termelés

A 10-2. ábra az UNCTAD INSG (United Nations Conference on Trade and Development, International Nickel Study Group) adatai alapján mutatja a világ Ni-termelésének változását. Mint látható, az 1990-es évek közepén lépte át a világon gyártott nikkel mennyisége az 1 millió tonnát. E mennyiséget mintegy 10-12-szeresen haladja meg a réz és 16-18-szorosan a rozsdamentes acél termelt mennyisége. A termelés minden kontinensen folyik, 20 országra terjed ki. Ugyanakkor azt lehet megfigyelni, hogy 5 nagy nemzetközi vállalatcsoport állítja elő az említett nikkelmennyiségnek több mint a felét: a Norilsk Nickel Group (Oroszország), az INCO Group Co. (Kanada), a Falconbridge Ltd. (Kanada és a kanadai–norvég Noranda), a Western Mining Co. Ltd. (Ausztrália) és a Group Eramet SLN (Franciaország).



10-2. ábra – A világ nikkeltermelése, 1935–2010

A termelő országok részesedését a világtermelésből a 10-5. táblázat mutatja. A becslések szerint Új-Kaledóniában található a világ nikkelérc készletnek egyik legnagyobb része. A világpiacon jelentkező kínálatot erőteljesen befolyásolják a domináns országok kínálati és keresleti szándékai. Oroszország pl. jelentős tartalékokkal bír, és piaci mozgásait sajátos érdekek érvényesítése jellemzi. A Kubát érintő amerikai kereskedelmi szankciók is erős hatást gyakorolnak a nikkel világpiaci viszonyaira. További külső hatások is erőteljesen kihatnak a nikkel árára, mint pl. a hulladék rozsdamentes acél vagy a primer nikkellel helyettesíthető termékek ára, a sztrájkok, a készletek. A Londoni Fémtőzsde nagy zuhanásai erősen instabillá tették a kínálatot, 2007 közepére viszont az egekbe szökött az ár, amelyről utólag beigazolódott, hogy piaci manipulációk eredménye volt.

Ez az árhullámzás azonban alapvető átalakulásokat hozott a rozsdamentes acélok kínálati oldalán: megjelentek a sovány duplex, az új Cr-Mn ausztenites és az új, ferrites korrózióálló acélok.

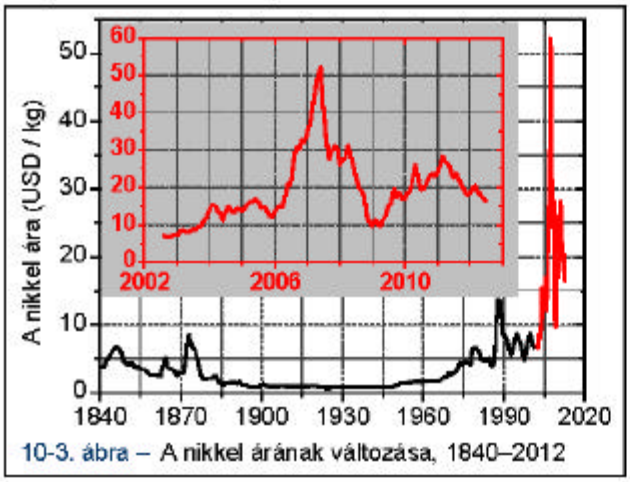
Oroszország	280 000 tonna	16,7%
Fülöp-szigetek	230 000 tonna	13,7%
Indonézia	230 000 tonna	13,7%
Kanada	200 000 tonna	11,8%
Ausztrália	180 000 tonna	10,7%
Új-Kaledónia	140 000 tonna	8,3%
Brazília	83 000 tonna	4,9%
Kína	80 000 tonna	4,7%
Kuba	74 000 tonna	4,4%
Kolumbia	72 000 tonna	4,3%
Dél-Afrika	42 000 tonna	2,5%
Botswana	32 000 tonna	1,9%
Madagaszkár	25 000 tonna	1,5%
Dominikai Köztársaság	14 000 tonna	0,8%

10-5. táblázat: A fő nikkelgyártó országok és részesedésük a világtermelésből 2011-ben

Az elmúlt bő fél évszázadban erősen megtűzszereződött a nikkel iránti kereslet. Érdekes, hogy a visszaesések és a növekedések valamiféle szabályosságot mutatnak. Világosan megmutatkozik az egyes földrajzi területeknek a nikkelkeresletből való részesedésében, hogy egy stagnáló amerikai és európai kereslet mellett erőteljes az orosz igény visszaszorulása s ugyanakkor Kína és India révén az ázsiai igény növekedése.

– A nikkel ára

A nikkel kereskedelmének legnagyobb része az érdekelt nagyvállalatok közötti hosszú távú szerződések keretében zajlik. Az 1980-as évek óta a Londoni Fémtőzsde (London Metal Exchange) árait mint nemzetközi referenciát veszik figyelembe. Ugyanakkor az árak mindig nagyon pontosan meghatározott termékjellemzőkre vonatkoznak.



10-3. ábra – A nikkel árának változása, 1840–2012

10.2.4. Különleges rendeltetésű Ni-ötvözetek

A különleges Ni-ötvözetek egy alkalmazását szemlélteti a 10-4. ábra. További alkalmazások:

- Fűtőellenállások anyagai, pl. Ni-20Cr-Si, vagy a Konstantán (CuNi45).
- Termoelemek anyagai; a K-típusú termoelem vezetékei: 90Ni-9Cr és 94Ni-Al-Mn-Fe-Si-Co.
- Lágymágneses anyagok, az ún. Permalloy-ok.
- Kis hőtágulású ötvözetek; Invar 36 (1.3912), Kovar.
- Alakemlékező Ni-Ti ötvözetek.
- Rendezett rácsú intermetallikus ötvözetek, pl. Ni_3Al nikkel-aluminid.

Érdemes megemlíteni még az ún. „marazsing" acélokat, pl. X2NiCoMo18-9-5, 1.6358, amelyek martenzites szerkezetűek, és kiválásos keményedéssel további szilárdságnövelésre alkalmasak. Rendkívül nagy folyáshatár (1500–2100 MPa) és ennek ellenére is nagy szívósság jellemző rájuk; a törési szívósságuk 60–110 $N/mm^{3/2}$).

10-4. ábra – Jellemző alkalmazás: a pénzérmegyártás

10-5. ábra – Nikkelezett fémszerelvények

10-6. ábra – Az 1994-ben, Százhalombattán üzembe helyezett gázturbina egyik lapátja; anyaga: IN-738LC

11. fejezet
Az alumínium és ötvözetei

Fémporlasztó berendezés alumínium tárcsája (magnetron target; köszönet érte Oláh Sándornak)

11. Az alumínium és ötvözetei

Az alumínium csak ásványok alkotóelemeként lelhető fel a természetben, de az oxigén és a szilícium után a legnagyobb mennyiségben előforduló elemeként a litoszféra 8,1%-át alkotja. Fő ásványai a bauxit és a kriolit. Az alumínium névadója *H. Davy*, aki 1809-ben fedezte fel ezt a fémet, amikor kutatásai során olvasztott alumíniumsókat elektrolizált.

Viszonylag tiszta formában *H. Ch. Oersted* (1825.), majd a kísérletekhez elegendő mennyiségben *F. Wöhler* (1827.) állította elő elsőként. Az első üzemet, amely alumíniumot termelt, 1856-ban nyitotta meg *H. Saint-Claire Deville* Párizsban (a Glacière negyedben). Nagyon rövid életű volt, mivel a környék nem viselte el a károsanyag-kibocsátást. Az 1857 tavaszán Nanterre-be telepített üzem 1859. évi termelése 500 kg volt. *L. Le Chatelier* gyára is kb. ennyit termelt a következő évben, 1889-ben pedig már csaknem 3 tonnát.

Az elsődleges (bauxitból előállított) alumínium világtermelési adata alakulását a 11-1. táblázat szemlélteti: Kína, Kanada, Oroszország és az USA állítja elő a világtermelés felét. A magyar termelés 2003-ban 35 ezer tonna volt, 2006-ban pedig bezárt az utolsó alumíniumkohó is Inotán.

Az első kg alumínium egy kicsivel drágább volt az aranynál, mai áron számolva kb. 2500 euróért kelt el, de 30 év múlva már jóval a századrészére csökkent az ára. A termelés növekedését és a velejáró árzuhanást a timföldgyártás ma is alkalmazott módszerének (Bayer-eljárás) és az egyenáram biztonságos előállítására szolgáló berendezéseknek – *Jedlik Ányos* (1861), *W. Siemens* (1866), *Z. Gramme* (1871) – a kidolgozása tette lehetővé.

Az ún. elsődleges alumíniumot a bauxitból Bayer-eljárással gyártott timföld (Al_2O_3) elektrolízisével állítják elő. Az anyag- és energiamérleg a következőképpen alakul 1 tonna alumíniumra: 5 tonna bauxitból 13,5 tonna víz, 0,6 tonna kőolaj, 210 kg nátronlúg felhasználásával 1,9 tonna timföld készíthető, majd 430 kg grafit, 30 kg kriolit és 13 MWh villamos energia felhasználásával nyerhető az 1 tonna, 99,7% tisztaságú alumínium.

A másodlagos vagy újraolvasztott alumínium előállításához tonnánként mindössze 0,7 MWh energia szükséges, így az újrafeldolgozás igen gazdaságos. Az autóipar által igényelt öntészeti ötvözeteknek csaknem a háromnegyed része újraolvasztott alumíniumötvözet.

11.1. Az alumínium fizikai tulajdonságai

- Az alumínium rendszáma Z = 13.
- Vegyértéke: 3.
- Atomtömege, M = 26,982.
- Olvadáspontja 933 K (660°C).
- Forráspontja 2330 K.
- Kristályszerkezete: LKK, (rácsállandója 20°C-on a = 0,40496 nm).
- Sűrűsége 20°C-on 2698 kg/m^3.
- Hőtágulási együtthatója 20–100°C-on $\alpha = 23{,}1 \cdot 10^{-6}$ 1/K.
- Fajhője 20°C-on Cp=897 J/=kg·K), moláris fajhője 24,29 J/(mol·K).
- Hővezetési tényezője 20°C-on $\lambda_{20} = 237$, 660°C-on $\lambda_{[660]} = 208$, olvadék fázisban pedig $\lambda_{(660)} = 91$ W/(m·K).
- Fajlagos ellenállás 20°C-on: $\rho = 2{,}65$ μΩ·cm; a 99,996% tisztaságú alumínium villamos vezetőképessége 64,94%-a a rézének; 1,14–1,20 K-en válik szupravezetővé.
- Mágneses szuszceptibilitása 0,0006 mm^3/g.
- Young-modulusa, E=66,6 GPa, az ötvözeteké 69–72 GPa, a Si-tartalom növelésével pedig akár 82–85 GPa; a nyíró rugalmassági modulusa, G=25 GPa.
- Poisson-tényezője, ν=0,33–0,35.

Év	Tonna	Év	Tonna
1886	13	1970	10 307 000
1888	39	1980	12 606 000
1890	200	1990	14 186 000
1900	5700	1993	14 984 000
1910	44 350	1997	19 479 000
1920	121 000	1999	20 655 000
1930	269 000	2001	20 551 000
1940	810 000	2003	21 935 000
1950	1 507 000	2005	23 463 000
1960	4 624 000	2007	24 803 000

11-1. táblázat: Az elsődleges alumínium világtermelésének alakulása

11.2. Az ötvözetek jelölése összetétel szerint

11.2.1. Öntészeti ötvözetek

Az ötvözeteket a feldolgozási technológia szerint a következő két főcsoportba osztjuk: *alakítható ötvözetek* és *öntészeti ötvözetek*.

Az öntészeti ötvözetek jelölésére két módszert ad az MSZ EN 1780 szabványsorozat és az MSZ EN 1706:2010 szabvány: a rövid számjellel vagy az ötvözők kémiai vegyjelét használó, hosszú jellel

való jelölést. A 11-2. táblázat erre mutat példákat. Az „EN” előtag az európai szabvány jele, az „A” betű mindkét esetben arra utal, hogy alumíniumötvözetről van szó, a „C” betű pedig az öntészeti ötvözetek jele (az angol *cast* szóból ered).

A rövid jelben alkalmazott öt számjegy a kémiai összetételt reprezentálja: az első kettő az ötvözetcsoportot, az utolsó három pedig a kémiai összetételt. Érdemes megjegyezni, hogy az első számjegy az öntészeti ötvözeteknél is ugyanazt az ötvözetcsoportot jelöli, mint az alakítható ötvözeteknél (11-3. táblázat).

Példa: az EN AC-42000 jel a 7% Si-tartalmú, Mg-ot csak nyomokban tartalmazó Al-ötvözetek csoportját jelöli.

A hosszú jelnek az első része megegyezik a rövid jelével, amelyet az ötvözőelemek kémiai vegyjelének mennyiség szerinti sorrendben való felírása követ. A főbb ötvözőknek a százalékos mennyiségére utaló szám a vegyjelet követi.

Számjel	Hosszú jel
EN AC-21000	EN AC-AlCu4MgTi
EN AC-41000	EN AC-AlSi2MgTi
EN AC-42000	EN AC-AlSi7Mg
EN AC-42100	EN AC AlSi7Mg0,3
EN AC-42200	EN AC-AlSi7Mg0,6
EN AC-44000	EN AC-AlSi11
EN AC-45200	EN AC-AlSi5Cu3Mn
EN AC-46500	EN AC-AlSi9Cu3(Fe)(Zn)
EN AC-51000	EN AC-AlMg3(b)
EN AC-51100	EN AC-AlMg3(a)
EN AC-71000	EN AC-AlZn5Mg

11-2. táblázat: Az öntészeti ötvözetek jelölése

A számjel első tagja	Ötvözettípus
1	Ötvözetlen, Al ≥ 99,00%
2	Al-Cu ötvözetek
3	Al-Mn ötvözetek
4	Al-Si ötvözetek
5	Al-Mg ötvözetek
6	Al-Mg-Si ötvözetek
7	Al-Zn ötvözetek
8	Egyéb

11-3. táblázat: A rövid jel első tagjának jelentése

11.2.2. Az alakítható ötvözetek

Az alakítható Al-ötvözetek jelölésére is az előzőleg bemutatott kétféle módszert alkalmazzák az MSZ EN 573-1:2005 szabvány szerint, de a jelölések első tagja az angol *wrought* szóból eredően az „EN AW-xxxx” alakot ölti.

A rövid jel második tagjaként egy négyjegyű szám áll, amely a kémiai összetételre utal, és esetenként még egy betű, az egyes országokban gyártott változatok jelölésére. A négy számjegy értelmezése a következő:

- Az első számjegy a 11-3. táblázat szerinti ötvözetcsoportot jelenti (adott esetben a 0 és a 9 is használatos, de ezt a szabvány a gyártók szabad felhasználására engedi át).
- Az 1. csoportban az utolsó két számjegy a 99,00% feletti minimális Al-tartalmat jelenti századszázalékban, a második számjegy pedig a szennyezőtartalomra utal: ha e számjegy 0, a szennyezőtartalom az általános gyártástechnológia természetes értékének felel meg.
- A 2–8. csoportban a két utolsó számjegy az ötvözet azonosítására, míg a második számjegy a módosulatok jelölésére szolgál (a 0 jelenti az eredeti ötvözetet).

Példa:

A EN AW-2024 egy 4% Cu és 1,5% Mg ötvözésű alumíniumötvözetet jelöl.

A hosszú jel az alakítható ötvözeteknél önállóan nem használatos, csak a rövid jel kiegészítéseként. Emiatt [ ] zárójelbe téve kell megadni. Az ötvözetlen alumínium esetében az összetétel egy vagy két tizedesjeggyel is jelölhető.

Példa:

EN AW-1199 [Al 99,99];

EN AW 1070A [Al 99,7]

Kis mennyiségű ötvöző (mikroötvöző) hozzáadása a hosszú jelben jeleníthető meg.

Példa: EN AW-1100 [Al 99,0Cu]

Az ötvözeteknél az „Al” vegyjel is része a hosszú jelnek, de mennyiségre utaló szám csak az ötvözők vegyjele után állhat. A vegyjelek mennyiség szerint csökkenő sorrendben következnek, és maximum négy elemre terjednek ki.

Példa:

EN AW-6061 [Al Mg1SiCu];

EN AW-2011 [Al Cu5PbBi];

EN AW-2014 [Al CuSiMg];

EN AW-7050 [Al Zn6CuMgZr].

Az ötvözetek tulajdonságait jelentős mértékben befolyásolja a hőkezeltségi állapot, ami szintén megjelenik a jelölési rendszerben az MSZ EN 515:1995 szabvány előírásai szerint (lásd a 11-5. táblázatot).

11.3. Jelölés a gyártási állapot szerint

11.3.1. Öntészeti ötvözetek (MSZ EN 1706)

Az öntészeti Al-ötvözetek jelölésére vonatkozó előírásokat a 11-4. és a 11-5. táblázat mutatja.

Jelölés	Öntési eljárás jelölése
S	Homokformába öntés
K	Kokillaöntés
D	Nyomásos öntés
L	Precíziós öntés

11-4. táblázat: Az öntési eljárás jelölése

Jelölés	Hőkezeltségi állapot jelölése
F	Öntött állapot
O	Lágyított
T1	Szabályozott hűtés + természetes öregedés
T4	Oldó hőkezelés + természetes öregedés
T5	Szabályozott hűtés + mesterséges öregítés vagy túlöregítés (stabilizálás)
T6	Oldó hőkezelés + mesterséges öregítés a maximális keménységre
T64	Oldó hőkezelés + mesterséges öregítés nem a maximális keménységre
T7	Oldó hőkezelés + túlöregítés (stabilizálás)

11-5. táblázat: A hőkezelési eljárás jelölése

Példa: az EN AC-42000 KT6 egy összetétel szerint 42000-es Al-ötvözet, amelyet a kokillaöntést követően kiválásos keményítéssel hőkezeltek a maximális keménységre.

11.3.2. Alakítható ötvözetek (EN 515)

Az alakítható Al-ötvözetek gyártási alapállapotára vonatkozó jelöléseket a 11-6. táblázat mutatja, a 11-7. táblázat pedig az ehhez kapcsolódó és a végleges gyártási állapotra utaló kiegészítő jelek értelmezését összegzi. A termékek gyártási állapotának jelölése tehát egy betűjelből és két vagy több számból áll.

Példa: EN AW-2024-T4, 4% Cu és 1% Mg ötvözésű alumíniumötvözet, amely oldó hőkezelés, edzés és természetes öregedés után kerül forgalomba.

11.3.3. A hidegen hengerelt lemezek jelölése

A „H” betűvel jelölt gyártási állapot a hidegalakított termékeket jelöli. A betűjelet követő második szám az utolsó hidegalakítás (konkrétan hideghengerlésről van szó, mivel e termékcsoport elsősorban lemezeket tartalmaz) szilárdságnövelő hatását fejezi ki. Megállapodás szerint a 8 a normál gyártási viszonyok közt elérhető legkeményebb anyagra utal, a 0 pedig a lágyítással elérhető leglágyabb állapotra. A növekvő számok ennek a szilárdságintervallumnak az 1/8 részével való növekedésnek felelnek meg.

Gyakran alkalmazzák a „negyedkemény” (H2), „félkemény” (H4) stb. megnevezéseket is. Az extrakemény ötvözet megnevezés és a H9 jel dukál annak az ötvözetnek, amelynek folyáshatásra legalább 10 MPa-lal meghaladja a H8 kategóriájú anyagét. Az esetenként alkalmazott harmadik számjegy a betűjel után olyankor használatos, ha a mechanikai tulajdonságok egyértelműen eltémek – de nem nagyon jelentősen – a második számjegy által kifejezett kategóriától.

Példák: a H424 olyan hidegen hengerelt, hullámlemezt jelöl, amely H42 állapotú, tehát hideghengerlés és fényezés után negyedkemény állapotú síklemezből készült.

Betűjel	Gyártási alapállapot
F	Nyers, gyártási állapot (öntött)
O	Lágyított
H	Hidegen alakított
T	Nemesített
W	Edzett, nem stabilizált

11-6. táblázat: A gyártási alapállapot jelölése

11.3.4. A nemesített termékek kiegészítő jele

A T1–T12 jelölésű alapjelölésekhez további számok is kapcsolódhatnak olyankor, amikor valamely gyártási folyamat (nemesítés, alakítás, feszültségcsökkentés) eltér az általánostól.

Példák:

TX51 = feszültségcsökkentés húzással.

TX52 = feszültségcsökkentés nyomással.

T79 = nagyon korlátozott mértékű túlöregítés.

T76 = korlátozott mértékű túlöregítés a maximális szakítószilárdságig, amely fokozza a réteges korrózióval szembeni ellenállást.

T73 = teljes túlöregítés a maximális feszültségkorróziós ellenállás elérése érdekében.

T7351 = oldó hőkezelés, feszültségcsökkentés húzással, majd túlöregítés a maximális feszültségkorróziós ellenállás elérése érdekében.

Betű	Szám	Gyártási állapot
F	–	
O	1	Nagy hőmérsékletről lassan hűtött
	2	Termomechanikusan kezelt
	3	Homogenizált
H	1	Hidegen alakított
	2	Hidegalakítás + részleges lágyítás (megújítás)
	3	Hidegalakítás + nemesítés (stabilizálás)
	4	Hidegalakítás + fényezés vagy lakkozás
		– egy második szám (1-9) is követi, amely a keménységre utal: az „1" a leglágyabb – esetenként egy harmadik szám is követi, amely valamely termék változatait jelöli
T	1	Melegalakítás utáni edzés és természetes öregítés
	3	Oldó izzítás, edzés, alakítás, természetes öregítés
	4	Oldó izzítás, edzés, természetes öregítés
	5	Melegalakítás utáni edzés és megeresztés
	6	Oldó izzítás, edzés, öregítés
	7	Oldó izzítás, edzés, túlöregítés
	8	Oldó izzítás, edzés, alakítás, öregítés
	9	Oldó izzítás, edzés, öregítés, alakítás
	10	T5 + alakítás
	11	Melegalakítás utáni edzés, alakítás, természetes öregítés
	12	Melegalakítás utáni edzés, alakítás, megeresztés
W	-	Edzés + spontán öregedés szobahőmérsékleten az időtartam megadásával (pl. W1/2h)

11-7. táblázat: A gyártási állapot kiegészítő jelei

Elem	Ezt javítja	Ezen a téren ront
Cu	Szilárdság Forgácsolhatóság Kúszásállóság Felületkezelés	Korrózióállóság Hegeszthetőség Alakíthatóság
Mn	Szilárdság Mélyhúzhatóság Korrózióállóság Hegeszthetőség	
Mg	Szilárdság Korrózióállóság Hegeszthetőség Felületkezelés	
Si	Önthetőség Korrózióállóság Kúszáshatár	Forgácsolhatóság Hőtágulás Melegrepedési hajlam
Si+Mg	Szilárdság Melegalakíthatóság Korrózióállóság Felületkezelés	
Zn	Szilárdság	Korrózióállóság
Ti	Szemcsefinomítás	
B	Szemcsefinomítás	
Zr	Szemcsefinomítás	
Ni	Melegszilárdság	
Fe	Melegszilárdság	
Cr	Korrózióállóság Hegeszthetőség	
Pb	Forgácsolhatóság	
Sr, Sb	Kopásállóság	

11-8. táblázat: Az ötvözők hatása a tulajdonságokra

11.4. Az ötvözetlen alumínium (Al ≥ 99,00%) tulajdonságai

11.4.1. Az ötvözők és a szennyezők hatása

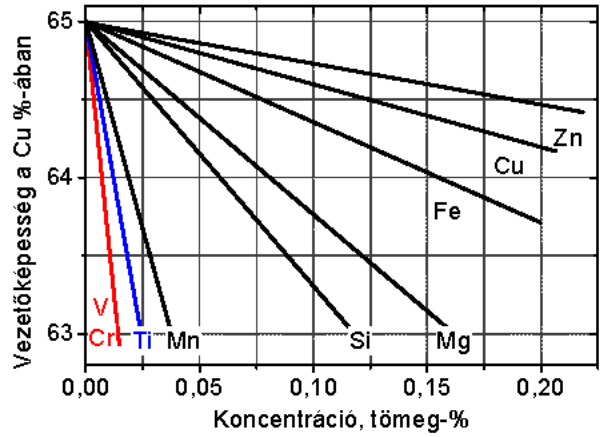
A kohóalumínium kb. 0,5% szennyezőt tartalmaz (főleg szilíciumot és vasat), de elektrolitikus tisztítással (raffinálás) nagy tisztaságú anyag is előállítható (Al ≥ 99,99%). Az oldott alkotók, pl. minden esetben csökkentik a tiszta alumínium villamos vezetőképességét, ami fontos szempont a villamos vezetékanyagok esetében (11-1. ábra). Az ötvözők számos felhasználói tulajdonságot erőteljesen befolyásolnak; a 11-8. táblázat összesíti ezek legfontosabbjait (a vezetőképesség romlását a táblázat külön nem tartalmazza, de minden ötvözőre vonatkozik).

11.4.2. Korrózióállóság

Az alumínium erőteljesen oxidálódik, a standard elektródpotenciálja

$$\varepsilon^{0}_{Al/Al^{3+}} = -1{,}66\ \mathrm{V},$$

de az oxidáció hatására vastag, jól tapadó alumínium-trioxid réteg borítja, amely megvédi a fémet a további oxidációtól. Ennek az oxidrétegnek a kémiai hatásokkal szembeni ellenállása korlátozott. A híg sósavas, kénsavas és salétromsavas oldatoknak jól ellenáll, ugyanakkor a lúgok erőteljesen megtámadják a fémet. Az oxidréteg védőhatása fokozható anódos oxidációval. E kezelés első szakaszában vastag, de porózus Al_2O_3 réteg alakul ki, amelyet forró vizes kezeléssel „tömítenek". Ez az eljárás dekorációs célokat is szolgál olyankor, ha a forró vizes kezelés során színezőanyagokat is alkalmaznak.



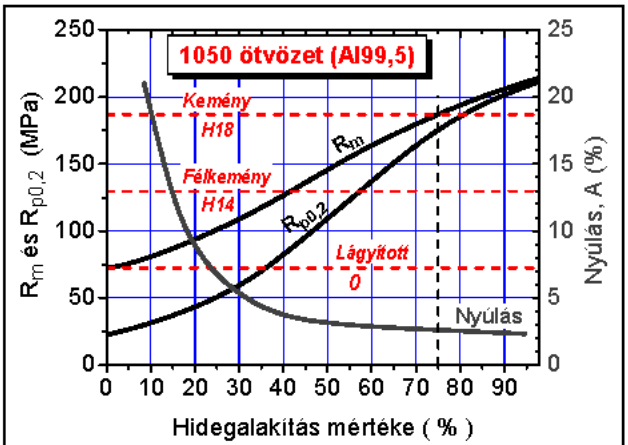
11-1. ábra – Az ötvözők hatása a vezetőképességre

11.4.3. Mechanikai tulajdonságok

A lágyított állapotú, ötvözetlen alumínium szilárdsága rendkívül kicsi, képlékenysége pedig nagy. Az elsődleges gyártású* alumínium mechanikai tulajdonságai:

- Szilárdság: $R_{p0,2}$ = 10–20, R_m = 70–80 MPa.
- Nyúlás, A = 50–60%.
- Rugalmassági modulus, E = 65–70 GPa.
- Poisson-tényező, ν = 0,36.

A nagytisztaságú alumínium (99,996%) folyáshatára nulla közeli, vagyis egészen kis feszültség hatására is képlékenyen alakváltozik. Képlékeny hidegalakítással erőteljesen növelhető az alumínium szilárdsága: a 11-2. ábra világosan kifejezi, hogy az alakítás hatására a szilárdsági jellemzők a többszörösükre képesek növekedni, miközben – természetesen – a képlékenység, alakíthatóság a töredékére csökken.



11-2. ábra – A hidegalakítás hatása a 1050-es ötvözet (kohóalumínium) mechanikai tulajdonságaira

Az alumíniumtermékek gyártása közben gyakori technológiai lépés az újrakristályosító hőkezelés. Ennek általában az a célja, hogy a hidegalakítás hatására megnövekedett szilárdságot és romló alakíthatóságot, valamint a szintén erősen lecsökkent villamos vezetőképességet visszaállítsák a lágyított állapotban jellemző értékekre.

A hevítés hatásra – kellő idő alatt és egy minimálisan szükséges hidegalakítás után – az anyagban lejátszódik a megújulás és az újrakristályosodás. Mivel visszanyerhetők a hidegalakítás hatására megváltozott fizikai tulajdonságok (megújulás), illetve. mechanikai tulajdonságok és kristályszerkezet (újrakristályosodás), az alumínium esetében az újrakristályosító hőkezelés rendkívül lényeges szerepet játszik.

Az újrakristályosodás egy termikusan aktivált folyamat, amely a következő tényezőktől függ:

- az előzetes hidegalakítás mértéke,
- a hőmérséklet,
- az idő,
- az alapfémben (másként: mátrixban) oldott szennyezők mennyisége,
- kiválások jelenléte.

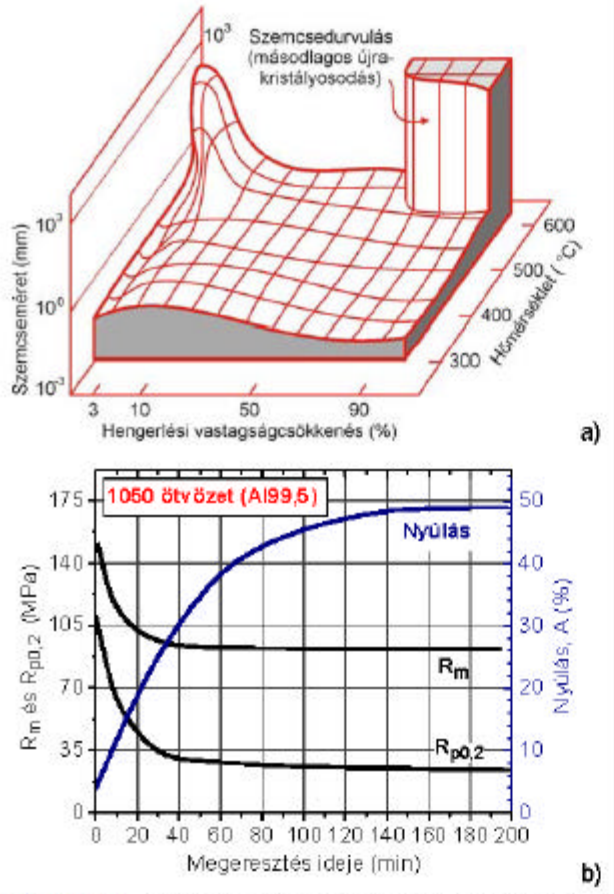
A sok paraméter közül a legfontosabb az idő, a hőmérséklet és az előzetes alakítás mértéke, amelyeknek a szemcseméretre gyakorolt együttes hatását szemlélteti a 11-3. ábra. Amint a 2.9.3. szakaszban szó esett róla, a növelt hőmérsékleten üzemelő anyagokban lejátszódó egyik jellegzetes termikus károsodás a(z egyenletes) szemcsedurvulás, amelynek eredményét egy folyamat modell vázlata szemlélteti a 11-4. ábrán.

Az olvadáspont közelében játszódik le a nagymértékű képlékeny alakváltozást szenvedett anyagban a másodlagos újrakristályosodás (másként: anormális szemcsedurvulás vagy szekunder rekrisztallizáció); ennek során a szemcsehatárok mennyisége jelentősen csökken és egészen nagy krisztallitok jönnek létre, méreteloszlásuk azonban általában egyenetlen. A klasszikus 11-3.a ábra jobb felső sarka mutatja a szóban forgó jelenség kialakulásának feltételeit 99,5% tisztaságú Al-ra.

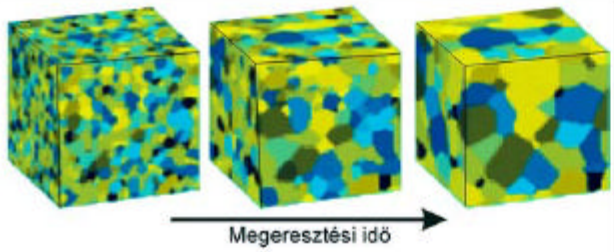
11.5. Az ötvözetlen alumínium típusai

Az ötvözetlen alumínium típusai az Al-tartalom és a szennyezők mennyisége tekintetében különböznek egymástól. Az Al-tartalom szerint a szabványos típusokban 99,0%, 99,4%, 99,5% és 99,8% lehet az előírt minimális alumíniumtartalom. A 11-9. táblázat tartalmazza a mechanikai tulajdonságokra vonatkozó szabványos előírásokat néhány járatos típusra.

* *Elsődleges alumíniumról vagy kohóalumíniumról beszélünk, amennyiben bauxitból gyártott timföld elektrolízisével készül a fém. A másodlagos gyártású vagy újraolvasztott alumínium a fémhulladék begyűjtésével és újraolvasztásával nyerhető.*



11-3. ábra – Az alumínium újrakristályosodási diagramja (fent) és hidegen alakított 1050-es ötvözet szilárdságának és nyúlásának változása a megeresztési idő függvényében.
Forrás: *Dahl O, Pawlek F*: Zeitschrift für Metallkunde 28 (1936) 266



11-4. ábra – A szemcsedurvulás 3D modellje
Forrás: *Holm EA, Battaile CC*: JOM, 53 (2001:9) 20-23.

Az alumíniumtartalom csökkenésével
- növekedik a szilárdság,
- csökken a nyúlás, az alakíthatóság,
- romlik az anódos oxidálásra való alkalmasság (e technológia korrózióvédelmi és dekorációs szerepet tölt be).

A legelterjedtebb típus a 99,50% Al-tartalmú 1050A [Al99,5] anyag, amelyet széleskörűen alkalmaznak az építő- és vegyiparban, a háztartási cikkek és csomagolóanyagok gyártásában.

Típus	Állapot	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A (%)
1100 [Al 99,45]	0	80–110	-	30
	H14	110–150	90	5
1050 A [Al 99,5]	0	70–100	-	35
	H12	90–120	65	a
	H22	90–120	65	13
	H14	100–140	75	6
	H24	100–140	65	10
	H16	120–160	100	5
	H26	120–160	90	7
	H18	140–	125	4
1080 A [Al 99,8]	0	60–90	-	38
	H14	100–140	70	7

11-9. táblázat: Az ötvözetlen alumínium néhány típusa és mechanikai tulajdonságai

Az ötvözetlen alumínium két típusának (1350 és 1370) jelentős alkalmazási területe a villamos vezetékek gyártása, ahol egyre nagyobb területen váltják ki velük a rezet, amely lényegesen drágább vezetékanyag. E két típusnál szigorúbb előírások vonatkoznak a tisztaságra, különösen a 11-1. ábra szerint nagyon kedvezőtlen elemek mennyiségét – Ti, V, Cr, Mn – korlátozzák.

A vezetékanyagként használt alumínium legfontosabb jellemzői a következők:
- Vezetőképessége 63-65%-a a rézének.
- Kis sűrűsége miatt az azonos terhelhetőségű vezeték tömege kb. a fele a rézből készültnek.
- Ugyanakkora áramsűrűség esetén kisebb a melegedés (82%), mint a réz esetében.
- Kitűnő a korrózióállósága.

A villamos távvezetékek (pl. ACSR* vezetéksodronyok) anyagaként használt típusoknál a leginkább kedvezőtlen szennyezők (Ti, V) mennyiségét tehát erősen korlátozzák: a 1350-es típusban e két szennyező együttes mennyisége < 0,005%, a 1370-es típusban pedig < 0,003%, és a Si-tartalom sem lehet nagyobb 0,1%-nál. Az ún. lágyhuzalok – hajlékony telefonzsinórok, háztartási eszközök villamos vezetékei – anyagaként a 1310-es típus a legelterjedtebb, amelybe 0,1–0,25% Mg van ötvözve, és a Fe-tartalom is 0,5–0,8%. Az Al-Mg-Si ötvözetekből („almagsi") is készítenek vezetékanyagokat.

* *Az ACSR betűszó jelentése: Aluminium Conductor Steel Reinforcment*

11.6. Az alumíniumötvözetek

Az ötvözetlen alumínium szilárdsági jellemzői – különösen a folyáshatár – nagyon kicsik, ezért a legtöbb alkalmazási területen a szilárdságnövelés alapvető igény. Az Al-ötvözetek kitűnően példázzák a szilárdságnövelési módszerek gyakorlati jelentőségét és hatékonyságát. Számos Al-ötvözetnél kettő vagy akár több szilárdságnövelési módszer együttes alkalmazása is megvalósul, jellemzően az ötvözés, a szemcsefinomítás, a kiválásos keményítés és a hidegalakítás. Ezeket a szilárdságnövelési módszereket általános értelemben már ismertettük a 3.4. szakaszban, ezért itt nem részletezzük, de a kiválásosan keményíthető ötvözetek alapvető jelentősége miatt külön szakaszban (11.7.) tekintjük át a hőkezeléseket.

Az elsődleges ötvözők mennyisége általában százalék nagyságrendű; erős hatást fejtenek ki – többnyire a szilárdságra. A másodlagos ötvözők jellemzően tizedszázalék mennyiségűek, és valamely különleges tulajdonságot javítják.

Az alumíniumötvözetek csoportosítási módjai

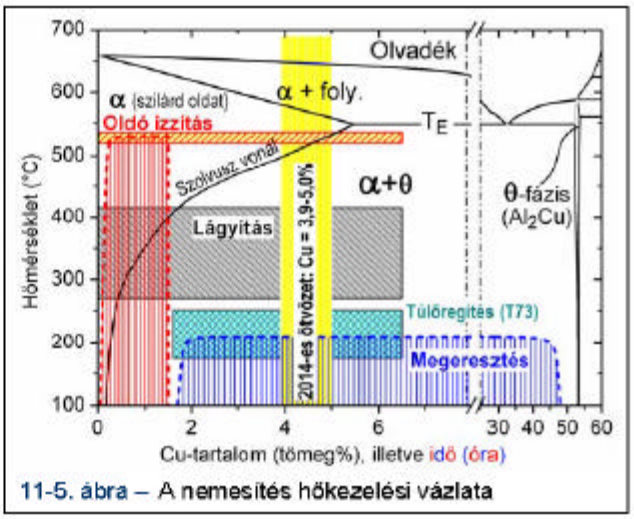
- a feldolgozási technológia szerint: alakítható ötvözetek és öntészeti ötvözetek,
- a kiválásos keményedés lehetősége szerint: keményíthető és nem keményíthető ötvözetek,
- alkalmazási terület szerint: járműipari, repüléstechnikai, villamosipari stb.

A 11-10. táblázat összesíti az alakítható ötvözeteket a kémiai összetételük szerint, a 11-11. pedig a szilárdsági jellemzőiket szemlélteti.

11.7. Az alumíniumötvözetek hőkezelése

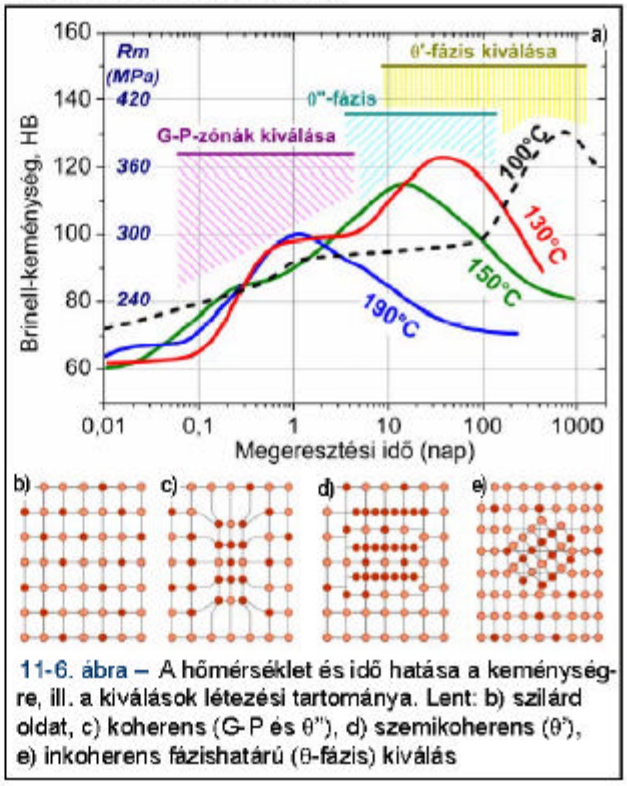
- *Homogenizáló izzítás*: 450–610°C-os, tartós (6–48 óra) hevítés a melegalakítás vagy a hidegalakítás megkönnyítése céljából.
- *Lágyítás*: megújító vagy újrakristályosító lágyítás a hidegalakított termékeknél, és egyensúlyi fázisszerkezetre való izzítás a kiválásosan keményített, azaz nemesített anyagoknál.
- *Nemesítés*, vagyis edzés + megeresztés: jelentős mértékű szilárdságnövelés *a kiválásos keményedés* révén. Alapvető feltétele, hogy az alumínium elegendő mennyiségű, korlátoltan oldódó ötvözőt tartalmazzon, amely az oldó izzítást követő edzéssel túltelített szilárd oldatot ad, és ebből a megeresztés során diszperz kiválások jönnek létre.

A kiválások az alumínium mátrixba ágyazódnak, és keményítő hatásuk nagyban függ attól, hogy a mátrixszal alkotott fázishatáruknak milyen a koherenciája (lásd a 2.4. szakaszt).



11-5. ábra – A nemesítés hőkezelési vázlata

A 4-5% Cu-tartalmú 2014-es ötvözet fázisdiagramjának részletét tartalmazó 11-5. ábrán az imént említett hőkezelési műveleteknek az ipari gyakorlatban alkalmazott, jellemző hőmérséklet-tartománya látható. A nemesítés az időben a 11-5. ábra szaggatott színes vonalait követve három fő lépésből áll: az oldó izzítást (1.) gyors hűtés (edzés, 2.), majd megeresztés (3.) követi. Az ipari műveletekben gondosan ügyelnek arra, hogy a meglehetősen szűk intervallumban végezhető oldó izzítás végrehajtásakor elkerüljék az ún. „megégési hőmérsékletet", ilyenkor ugyanis az anyag részlegesen megolvad, jellemzően a szemcsehatárokon. E probléma elkerülése érdekében ki kell zárni az ábrán T_E-vel jelölt eutektikus hőmérséklet fölé való hevítést.

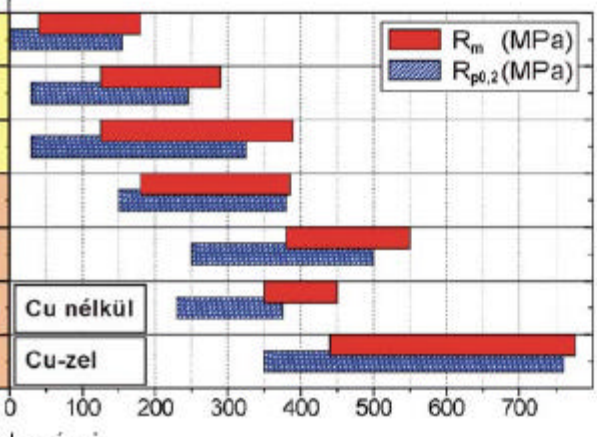


11-6. ábra – A hőmérséklet és idő hatása a keménységre, ill. a kiválások létezési tartománya. Lent: b) szilárd oldat, c) koherens (G-P és θ''), d) szemikoherens (θ'), e) inkoherens fázishatárú (θ-fázis) kiválás

Ötvözet	Si, %	Fe, %	Cu, %	Mn, %	Mg, %	Cr, %	Zn, %	Egyéb, %
1050A	0,25	0,4	0,05	0,05	0,05		0,07	Al ≥ 99,50
1080	0,15	0,15	0,03	0,02	0,02		0,03	Al ≥ 99,80
1100	Si+Fe =	0,95	0,05–0,20	0,05			0,10	Al ≥ 99,00
1200	Si+Fe =	1,00	0,05	0,05			0,10	Al ≥ 99,00
1199							0,30	Al ≥ 99,99
2011	0,4	0,7	5,0–6,0					~ 2%Pb+Bi
2014	0,50–1,2	0,7	3,9–5,0	0,40–1,2	0,20–0,8	0,1	0,25	0,15%Ti
2017A	0,20–0,8	0,7	3,5–4,5	0,40–1,0	0,40–1,0	0,1	0,25	0,25%(Zr+Ti)
2024	0,5	0,5	3,8–4,9	0,30–0,9	1,2–1,8	0,1	0,25	0,15%Ti
2030	0,8	0,7	3,3–4,5	0,20–1,0	0,50–1,3	0,1	0,50	0,2%Ti, ~1,4%Pb+Bi
2618A	0,15–0,25	0,9–1,4	1,8–2,7	0,25	1,2–1,8			1,1%Ni, 0,25%Zr+Ti
3003	0,6	0,7	0,05–0,20	1,0–1,5			0,10	
3004	0,3	0,7	0,25	1,0–1,5	0,8–1,3		0,25	
3005	0,6	0,7	0,3	1,0–1,5	0,20–0,6	0,1	0,25	0,10%Ti
3105	0,6	0,7	0,3	0,30–0,8	0,20–0,8	0,2	0,40	0,10%Ti
5005	0,3	0,7	0,2	0,2	0,50–1,1	0,1	0,25	
5050	0,4	0,7	0,2	0,1	1,1–1,8	0,1	0,25	
5052	0,25	0,4	0,1	0,1	2,2–2,8	0,15–0,35	0,10	
5083	0,4	0,4	0,1	0,40–1,0	4,0–4,9	0,05–0,25	0,24	0,15%Ti
5086	0,4	0,5	0,1	0,20–0,7	3,5–4,5	0,05–0,25	0,25	0,15%Ti
5454	0,25	0,4	0,1	0,50–1,0	2,4–3,0	0,05–0,20	0,25	0,20%Ti
5754	0,40	0,4	0,1	0,5	2,6–3,6	0,3	0,20	0,15%Ti
6005A	0,50–0,9	0,35	0,3	0,5	0,40–0,7	0,3	0,20	0,10%Ti
6060	0,30–0,6	0,10–0,30	0,1	0,1	0,35–0,6	0,05	0,15	0,10%Ti
6061	0,40–0,8	0,7	0,15–0,40	0,15	0,8–1,2	0,04–0,35	0,25	0,15%Ti
6082	0,7–1,3	0,5	0,1	0,40–1,0	0,6–1,2	0,25	0,20	0,10%Ti
6106	0,30–0,6	0,35	0,25	0,05–0,20	0,40–0,8	0,2	0,10	
7020	0,35	0,4	0,2	0,05–0,50	1,0–1,4	0,10–0,35	4,0–5,0	0,20%Zr, 0,05%Ti
7049A	0,4	0,5	1,2–1,9	0,5	2,1–3,1	0,05–0,25	7,2–8,4	0,25%(Zr+Ti)
7075	0,4	0,5	1,2–2,0	0,3	2,1–2,9	0,18–0,25	5,1–6,1	0,20%Ti

11-10. táblázat: Az alakítható alumíniumötvözetek fontosabb típusainak jelölése és összetétele

	Ötvözet	Számjel	Keményítő fázis
Nem nemesíthető ötvözetek	Al	1xxx	Al-Fe-Si
	Al-Mn	3xxx	Al_6Mn
	Al-Mg	5xxx	Al_3Mg_2
Nemesíthető ötvözetek	Al-Mg-Si	6xxx	Mg_2Si
	Al-Cu	2xxx	$CuAl_2$
	Al-Zn-Mg	7xxx	Mg_xZn_yAl
	Al-Zn-Mg	7xxx	Al_2MgCu

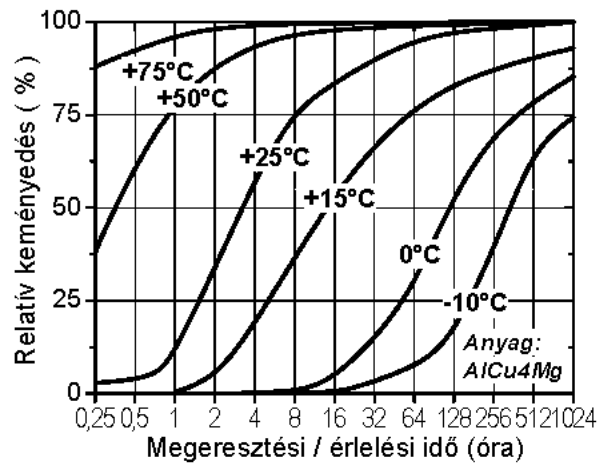


11-11. táblázat: Az alakítható ötvözetek mechanikai tulajdonságai

Ha a megeresztés szobahőmérsékleten zajlik, érlelésnek nevezzük. A keményíthető ötvözetek szobahőfokon is keményednek, de természetesen nem azonos mértékben és ütemben: jól látható a hőmérséklet meghatározó szerepe a 11-6. ábrán, amely világossá teszi, hogy a hőmérséklet kismértékű eltérése – pl. az évszakok váltakozása is – milyen radikálisan eltérő feltételeket teremt az érlelés hatásossága szempontjából. Az ábrába beírt G–P- (Guinier–Preston-) zónák és más fázisok az Al-Cu ötvözet kiválási folyamatának termékei.

Az érleléssel ipari viszonyok között gazdaságosan keményíthető, ún. önnemesedő ötvözetekben jellemzően csak a *Guinier–Preston-zónák* alakulnak ki. A maximális keményedés eléréséhez a megeresztés elvégzése is szükséges.

Optimális esetben a mátrixszal koherens fázishatárt képező, átlagosan 2×15 nm méretű és a kristályrács kocka alakú elemi cellájában a kockalapokkal párhuzamosan álló θ"-fázis (θ = teta) lesz a jellemző kiválástípus. A θ"-fázis kis korongocskáinak a maximális keménységet biztosító optimális mérete és eloszlása a megeresztési idő növekedésével kedvezőtlenül változik: a kiválások mérete növekedik (durvulás), a fázishatár koherenciája pedig romlik. A hőkezelési technológiában ezt az esetet túlöregítésként említjük.



11-7. ábra – A keményedési folyamat egy AlCuMg4 ötvözetre vonatkozóan

Miként a 11-7. ábra mutatta, egy ötvözet keményedésének mértéke az idő és a hőmérséklet függvénye. A nagyobb ötvözőtartalom szintén nagyobb keménységmaximumra vezet: az Al-Cu ötvözetek 130°C-os megeresztésekor, ha a Cu-tartalom 2%-ról 4%-ra növekedik, az elérhető keménységmaximum 62HV-ról 138HV-ra nő, vagyis megduplázódik. Esetenként előfordul, hogy az edzés és a megeresztés közé hidegalakítási műveletet iktatnak.

11.8. Az alumíniumötvözetek tulajdonságai

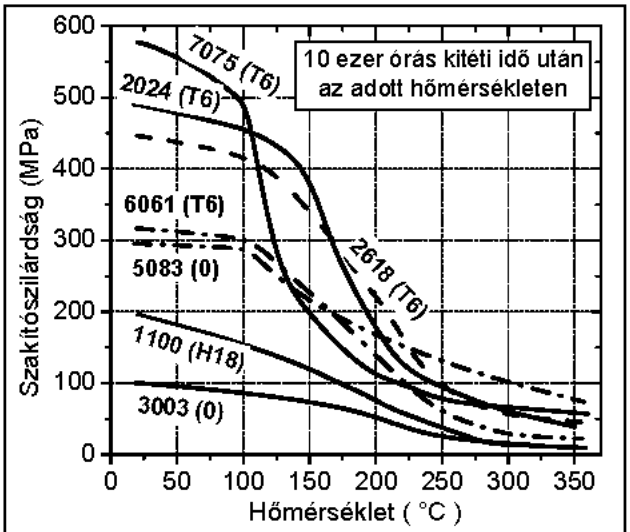
A szilárdsági jellemzők mellett a felhasználók számára meghatározó tulajdonságokat minden esetben az adott célból hozzáadott ötvözőelemek biztosítják. Az elsődleges ötvözők azok, amelyek az ötvözettípusok jelét is meghatározzák (Cu, Mn, Si, Mg, Zn), és mennyiségük jellemzően az 1-15% intervallumba esik. A másodlagos ötvözők – Fe, Cr, Zr, Ni, Sr, Co, Pb, Bi, Cd, Ti, Sb, Sn, Be, B, Sc, amelyek mennyisége kisebb, mint 1% – valamely különleges tulajdonságot erősítenek.

Az alumíniumötvözetek tulajdonságai közül az alábbiakat tekintjük a felhasználók szempontjából a legfontosabbaknak:

- melegszilárdság és kúszásállóság,
- hidegszívósság,
- kifáradással szembeni ellenállás,
- korrózióállóság,
- alakíthatóság (hideg- / melegalakítás),
- hegeszthetőség, forraszthatóság,
- önthetőség,
- forgácsolhatóság.

11.8.1. Melegszilárdság

A különféle Al-ötvözetek melegszilárdsága 100°C felett gyorsan csökken (11-12. táblázat és 11-8. ábra). A 2000-es és az 5000-es csoport egyes tagjai akár 250°C-ig is alkalmazhatók, főként azok a típusok, amelyekbe e tulajdonság (továbbá a kúszásállóság) javítása érdekében nikkelt, újabban szkandiumot ötvöznek. Az öntészeti ötvözetek melegszilárdsága egészen jónak mondható, erre utalnak a 11-12. táblázat növelt hőmérsékleten mért szakítóvizsgálati adatai.



11-8. ábra – Különféle ötvözetek melegszilárdsága. Annál kedvezőbb egy anyag viselkedése, minél nagyobb hőmérsékleten és minél kevésbé csökken a szilárdság

T (°C)	Ötvözet	R_m (MPa)
150	21000 KT4 43300 KF	360–375 260–265
250	21000 KT4 51300 KF	135–210 140
350	51300 KF	60–95

11-12. táblázat: Öntészeti ötvözetek melegszilárdsága; növelt hőmérsékleten mért szakítószilárdsági adatok

11.8.2. Hidegszívósság

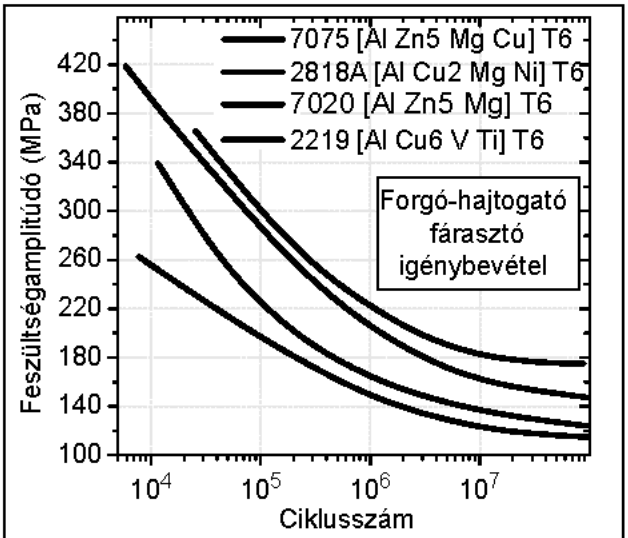
A hidegszívósság tekintetében meghatározó az a tény, hogy az alumínium kristályrácsa LKK. Ennek természetes folyománya, hogy semmilyen elridegedési probléma nem lép fel, sőt, a nagyon kis hőmérsékleteken alkalmazott ötvözetekre (pl. az 5083-O) az jellemző, hogy a hőmérséklet csökkenésével a szilárdság növekedése mellett az alakváltozó képesség is nő (11-13. táblázat):

T (°C)	$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A (%)
–25	140	310	20
–196	155	435	37
–253	175	585	32

11-13. táblázat: Az 5083-as Al-Mg ötvözet mechanikai tulajdonságai kis hőmérsékleteken

11.8.3. Kifáradással szembeni ellenállás

A kifáradással szembeni ellenállást a 11-9. ábra szemlélteti különféle ötvözetekre vonatkozóan, mégpedig forgó-hajtogató terhelés esetén, amilyen pl. egy forgó tengelyt terhel. A görbék egyes pontjai azokat az összetartozó feszültség-ciklusszám értékpárokat mutatják, amelyekhez a vizsgált alkatrész törése tartozik: ez az ún. Wöhler-görbe (11-9. ábra).



11-9. ábra – Különféle Al-ötvözetek Wöhler-görbéje

Érdemes felfigyelni arra, hogy a 3.3.8. szakaszban már említett kifáradási határ (σ_D) – vagyis az a feszültség, amelynél a Wöhler-görbe érintője vízszintessé válik – az alumíniumötvözetek többségénél csak 10^8 ciklusszám környékén észlelhető. Tapasztalati megfigyelésekből ismert, hogy a kifáradási határra vonatkozó σ_D / R_m viszonyszám értéke ≈ 0,5 a nem nemesíthető ötvözetekre, és ≈ 0,25–0,3 a nemesíthető ötvözetekre. A hegesztett kötéseknél további csökkenéssel kell szembenézni. Ezeknek a jellemzőknek az ismerete lényeges, pl. az autóalkatrészek tervezésekor.

11.8.4. A korrózióállóság

Az alumínium ötvözeteinek korrózióállóságát is a felületen keletkező, összefüggő Al_2O_3-réteg biztosítja, amely az anódos oxidálással erősíthető. Az Al-ötvözetek általában jól ellenállnak a lyukkorróziónak, de érzékenyek a *galvánkorrózióra*, különösen vassal (acéllal) létesülő kontaktusokban. A szemcsehatármenti korrózió és a feszültségkorrózió elsősorban a Cu-tartalmú 2000-es és a Zn-tartalmú 7000-es csoportot veszélyezteti, míg a *réteges korrózió* az 5000-es csoportot.

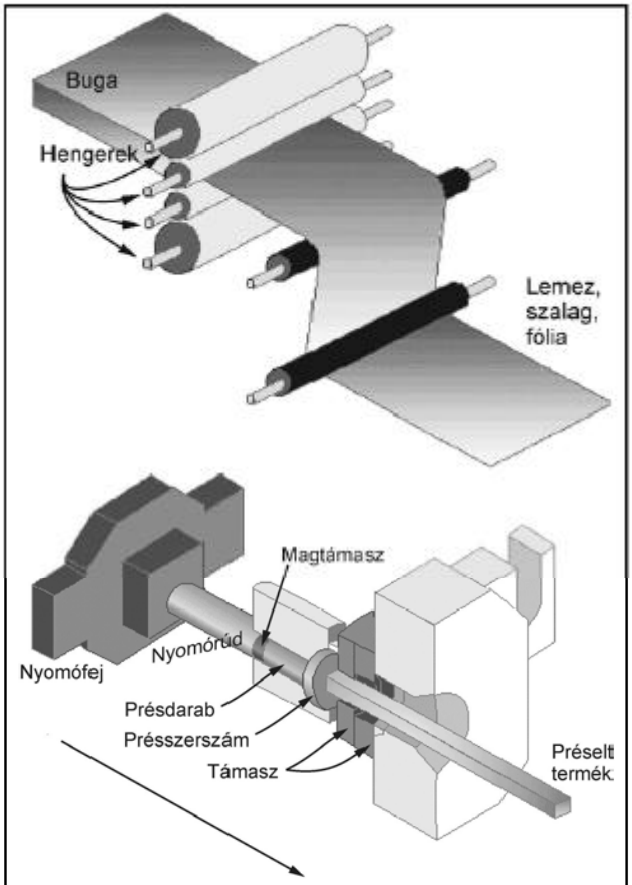
A korrózióállóság terén mutatkozó különbségek meglehetősen nagyok, ezért az alumíniumötvözetek kiválasztása egy bizonyos alkalmazásra nem nélkülözheti ennek a szempontnak az alapos mérlegelését.

11.8.5. Alakíthatóság

Az alumíniumötvözetek döntő többsége kiválóan alakítható, mivel nagy a nyúlásuk, és alakítás közben nem keményednek olyan erőteljesen, mint pl. az ausztenites acélok. A legfontosabb képlékenyalakítási műveletek a hengerlés, a mélyhúzás és a folyatás / sajtolás. Az Al-Mg ötvözetek (5000-es csoport) melegsajtolásakor (pl. vékony csövek gyártása) több tíz m/s alakítási sebesség is elérhető. A hidegalakítás általában szobahőmérsékleten történik, míg a melegalakításhoz, pl. a profilok sajtolásához 450–500°C-ra hevítik a sajtolási bugákat.

11.8.6. Hegesztés, forrasztás

A hegesztésnél a legfontosabb szempont az, hogy a felületet borító oxidréteg olvadáspontja többszöröse a fém olvadáspontjának, ezért a hegesztési folyamatban ezt az oxidréteget „fel kell törni”, illetőleg el kell távolítani valamiképpen. A nem nemesíthető ötvözetek (1000, 3000, 5000) hegesztése ettől eltekintve teljesen problémamentes, viszont a nemesíthető ötvözeteknél (2000, 6000, 7000) adódhatnak problémák:



11-10. ábra – Alakítási technológiák vázlata: hengerlés és préselés (másként kisajtolás, extrudálás)

- Nagy a kritikus hűlési sebesség az Al-Cu (≈ 20°C/s) és az Al-Zn-Cu (≈ 100°C/s) ötvözeteknél; ennél lassabban hűlve nem keményíthető megeresztéssel a varrat.
- A Zn-Cu ötvözésű ötvözetek (7000-es csoport) réteges korrózióra való hajlama megnő.
- A forrasztás – gépkocsik vízhűtőcsöveinél – is kerülendő az említett két csoport, valamint a 4000-es és az 5000-es csoport típusainál.

11.8.7. Forgácsolás

Általában véve kimondható, hogy az alumínium ötvözetei kiválóan forgácsolhatók, mégpedig a következő tulajdonságok alapján:

- Tömeg: a kis sűrűség miatt kis tehetetlenségi nyomaték lép fel a munkadarab forgásakor.
- Kis Young-modulus (harmada az acélénak): kisebb szorítóerővel is befoghatók a munkadarabok, ami kisebb deformációkat okoz.
- Jó hővezető képesség: könnyen elvezeti a forgácsleválasztáskor keletkezett hőt.

Meg kell jegyezni, hogy a kisebb folyáshatárú, lágyabb ötvözetek – nem beszélve az ötvözetlen típusokról – forgácsolásakor gondot okozhat az anyag „kenődése". A 11.8. szakaszban bemutatott tulajdonságokat a 11-14. táblázat összesíti.

	Ötvöző	Szilárdság	Forgácsolhatóság	Hegeszthetőség	Hidegalakíthatóság	Melegalakíthatóság	Korrózióállóság	Eloxálhatóság
1000	–	1	1	4	4	4	4	4
2000	Cu	4	4	0	1	3	1	2
3000	Mn	2	2	4	3	3	4	3
4000	Si	2	1	3	–	2	4	1
5000	Mg	2	2	4	3	1	4	3
6000	Mg-Si	3	3	3	2	4	4	4
7000	Zn-Mg	3	3	3	2	3	2	2
7000	Zn-Mg-Cu	5	4	0	1	2	1	2

11-14. táblázat: A főcsoportok tulajdonságainak és feldolgozhatóságának minősítése; legjobb = 5

11.9. Nem nemesíthető Al-ötvözetek

11.9.1. Az Al-Mn ötvözetek

A mangán az ötvözet olvadékának megszilárdulásakor létrejött, diszperz fázisok révén növeli a szilárdságot, százalékonként kb. 40–50 MPa-lal. A 3003-as típus [AlMn1] mellett a kb. 1% Mg-tartalmú 3004-es és a 3005-ös (0,5% Mg) típusok a legismertebbek: mindegyiknek kicsi a nyúlása, ezért gyenge az alakíthatósága (11-15. táblázat).

Típus	Állapot	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A (%)
3003 [AlMn1]	O	120	–	25
	H14	160	120	5
	H18	190	170	3
3004 [AlMn1Mg]	O	140	–	22
	H14	190	140	5
	H18	230	200	3

11-15. táblázat: Al-Mn ötvözetek mechanikai jellemzői

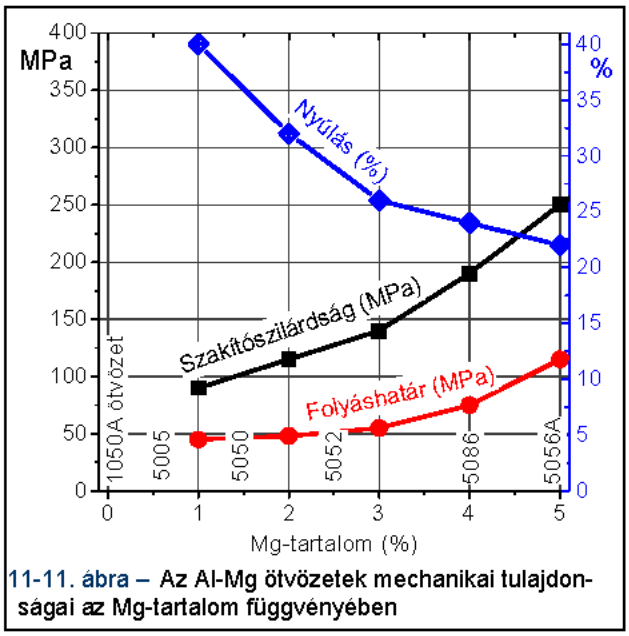
11.9.2. Az Al-Mg ötvözetek

450°C-on kb. 15% Mg-ot is képes oldani az alumínium. Lehűtve, ez az érték 2%-ra csökken, de a tapasztalat szerint csak kb. 5% Mg-tartalom felett és kis hőmérsékleten válik instabillá a szilárd oldat. Ilyenkor a Mg kiválik a szemcsehatárokra, Al_3Mg_2 összetételű β-fázis formájában. Ez azonban nem okoz érdemleges keményedést, ellenben erősen fokozza a szemcsehatármenti korrózióra való hajlamot. Mivel ugyancsak kb. 5% Mg-tartalomig jó az ötvözetek alakíthatósága, a gyakorlatban nem alkalmaznak nagyobb Mg-tartalmú ötvözeteket (11-16. táblázat).

Típus	Mg	Egyéb	Állapot	$Rp_{0,2}$ (MPa)	A (%)
5005	0,5–1,1	–	O	–	20
			H14	120	4
			H24	110	8
			H18	160	3
5150	1,3–1,7	–	O	–	25
			H14	150	6
5052	2,2–2,8	0,25Cr	O (H111)	60	20
			H14	180	9
			H28	220	4
5754	2,6–3,6	0,8Mn 0,1Cr	O (H111)	80	20
			H22	130	11
			H25	160	8
			H26	190	7
5086	3,5–4,5	0,5Mn 0,1Cr	O (H111)	100	18
			H22	190	8
			H24	230	7

11-16. táblázat: A magnéziummal ötvözött alumíniumok néhány típusa és mechanikai tulajdonságai

A magnézium okozta keményedés típusát tekintve *szilárdoldatos keményedés*. Egészen más hatásokra változnak (a 11-11. ábra szerint) a mechanikai tulajdonságok, mint a kiválásos keményedés működésekor (11-6. ábra). Itt szigorúan monoton a szilárdság növekedése a Mg-tartalom növekedésével, tehát nincs inflexiója a görbének. További szilárdoldatos keményedést – valamint a korrózióállóság és a hegeszthetőség javulását – okoz az, ha a Mg mellett a Mn, a Cr és a Ti is megjelenik ötvözőként.



11-11. ábra – Az Al-Mg ötvözetek mechanikai tulajdonságai az Mg-tartalom függvényében

Az Al-Mg ötvözetek legfőbb felhasználói tulajdonságai a következőkben összegezhetők:

- jó melegalakíthatóság: a préselt vagy sajtolt termékek alakítási hőmérséklete kb. 460°C,
- kedvező hidegszívósság,
- jó hegeszthetőség,
- kiváló korrózióállóság,
- esztétikus felület hozható létre anódos oxidálás (másként: eloxálás) alkalmazásával.

11.10. Nemesíthető ötvözetek

11.10.1. Al-Cu ötvözetek (2000-es csoport)

– Alakítható Al-Cu ötvözetek

Ennek az ötvözetcsoportnak a leginkább elterjedt típusa a 2117-es, amely 2,2–3,0% Cu-et és 0,2–0,5% Mg-ot tartalmaz. Hőkezelése levegőn való edzésből és érlelésből áll. Jól mélyhúzható és hegeszthető, de a korrózióállósága is jó. Egy másik jellegzetes típusa ennek a csoportnak a 2002-es ötvözet, amelynél a szilárdságot Si-ötvözéssel javítják. A keményítőfázis az $Al_5Cu_2Mg_8Si_6$.

– Nagyszilárdságú Al-Cu ötvözetek

Ennek az ötvözetcsoportnak a tagjai kb. 4% rezet tartalmaznak; nagy szilárdságukat nemesítés után nyerjük, viszont erősen romlik a korrózióállóság és a hegeszthetőség. Egyes típusokban további ötvözést alkalmaznak:

- Mg (pl. a 2017A vagy a 2024 ötvözet).
  Ezt a dúralumíniumnak is nevezett ötvözetet széles körben használják a repülés- és űrtechnikában. A keményítőfázis az Al_2CuMg.
- Si + Mg (pl. a 2014 ötvözet).
- Mg+Ni + Fe (pl. a 2618A ötvözet).
  A keményítőfázis az Al_2CuMg, míg a homogenizáló vagy oldó izzítással oldhatatlan Al_9NiFe fázis javítja a melegszilárdságot.
- Ni (pl. a 2218 ötvözet).
  A kb. 2% Ni-tartalmú ötvözetet T6 állapotban használják fel kovácsolással készített melegszilárdságot kívánó alkatrészekhez.
- Mn + Ti + Zr (pl. a 2219 ötvözet).
  A 2000-es ötvözetcsoportnak ez a legjobb hegeszthetőségű, melegszilárdságú és 200–325°C-ig kúszásálló tagja.
- Mn + Mg + Ti (pl. a 2001-es ötvözet) fő felhasználási területe a nyomástartó edények, palackok gyártása.

– Jól vágható és forgácsolható Al-Cu ötvözetek

A 2030-as és a 2011-es ötvözet kb. 1,3% Pb + Bi ötvözőt tartalmaz, ennek köszönhetően forgácsa könnyen törik.

11.10.2. Al-Mg-Si ötvözetek (6000-es csoport)

Széles körben alkalmazott ötvözetek tartoznak ebbe a családba, amelynek tagjainál a keményítőfázis az Mg_2Si vegyület. A 6000-es ötvözeteknek kiváló mind a melegalakíthatósága, mind pedig a hidegalakíthatósága, ebből adódóan a lemez jellegű termékek fő anyagaként szolgálnak. A hidegszívósságuk és a korrózióállóságuk is kiváló, ellenben a melegszilárdságuk csekély.

– **Al-Mg-Si típusú ötvözetek**

A legelterjedtebb típus a nagy sebességű alakításra alkalmas 6060-as és a csoporton belül legnagyobb szilárdságú 6061-es, amely Cu-et és Cr-ot is tartalmaz. A 6101-es (másként „Almelec") ötvözetet villamos távvezetéki kábelek anyagaként is széles körben használják.

– **Al-Si-Mg típusú ötvözetek**

E típusokban a Si mennyisége meghaladja a Mg-ét (6005), és Mn-nal tovább növelhető a szilárdság (6081, 6082). Az alumíniumkarosszériás gépkocsik anyagaként fejlesztették ki mintegy 10 éve a 6016 (meg a 6022, 6111, 5182) ötvözetet, amelynek a folyáshatára eléri a 250 MPa-t, jól festhető, és kiválóan mélyhúzhatók belőle, pl. a gépkocsik motortérfedelei.

11.10.3. Al-Zn ötvözetek (7000-es csoport)

A horgany (cink, Zn) oldhatósága a tizedére csökken az Al-ban, ha 445°C-ról lehűtjük. Mivel azonban 20°C-on még így is mintegy 5% Zn oldódik, a kiválásos keményedés kis Zn-tartalomnál nem lenne kihasználható. Emiatt csak további ötvözőket is tartalmazó típusokat fejlesztettek ki.

Nagyon jelentős hatás érhető el, ha a Zn mellé Mg-ot ötvöznek, ugyanis az inkoherens fázishatárt alkotó $MgZn_2$ egyensúlyi fázis képződését megelőző kiválások 100°C körüli érleléssel koherens fázishatárú, diszperz eloszlású rendszert alkotnak az Al mátrixban, és ezzel kimagaslóan nagy szilárdságnövekedés jár együtt. Az oldó izzítás után a túltelített szilárd oldat levegőn hűtéssel is létrejön, vagyis az ötvözet „önedződő". A kiválási folyamat is viszonylag lassú.

A csak Mg-mal ötvözött típusoknak (pl. 7020) nagyon rossz a korrózióállósága; érzékenyek a feszültségkorrózióra, és a diszperz kiválásokat tartalmazó mikroszerkezet nem eléggé stabil. Ezeket a kedvezőtlen tulajdonságokat javítják Cr és főleg Cu hozzáadásával, amely Zn mennyiségének növelését is lehetővé teszi (7075-ös ötvözet).

A horganyötvözésű Al-ötvözetek optimális tulajdonságait – kellő szívósság és korrózióállóság biztosítása a szilárdság csökkenése nélkül – ún. termomechanikus kezeléssel lehet beállítani.

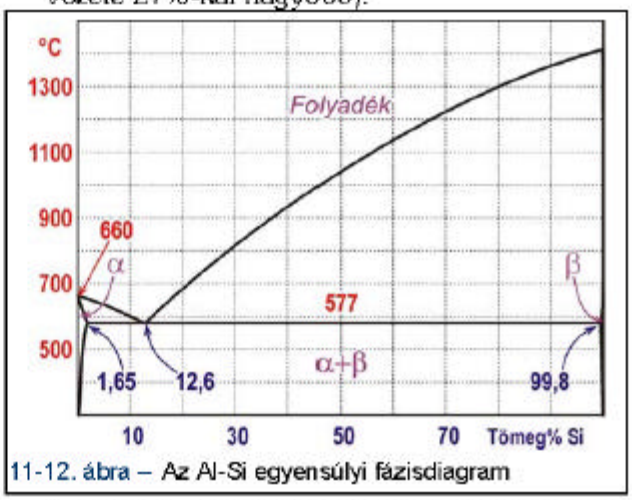
- A közbenső termomechanikus kezelés célja az öntött állapotra jellemző szerkezet kedvezőtlen hatásának csökkentése alakítás közbeni újrakristályosodás kikényszerítésével.
- A végső termomechanikus kezelés célja olyan diszlokációszerkezet kialakítása, amelynek a kiválásokkal való kölcsönhatása kedvezőbb.

11.11. Az öntészeti Al-Si ötvözetek

A szilícium alig oldódik az alumíniumban, ám 12,6% Si-tartalomnál eutektikum (az ömledékből közvetlenül dermedő, kétfázisú szilárd keverék) képződik (11-12. ábra). Az Al-Si ötvözetek szerkezetét és tulajdonságait erősen – és ellentétesen – befolyásolja két további alkotó: a Na és a P. A Na elnyomja az elsődleges Si-krisztallitok képződését, míg a foszfor az AlP_3 kiválások csíraképző hatása révén erősíti azt. Az igen elterjedt [AlSi13] (másként „Alpax") ötvözetek kiválóan önthetők.

Az Al-Si ötvözetek úgy ismertek, mint öntéssel való alakadásra rendelt, nem nemesíthető anyagok, ám rendelkezésre állnak alakítható és nemesíthető – Mg-, Cu-, Ni-, Co-tartalmú – típusok is.

- Az [AlSi7Mg] ötvözetben a Mg_2Si a keményedést okozó fázis.
- Az [AlSi9Cu3] ötvözetet gépkocsik hengerfejéhez és olajteknőihez (karter) használják.
- A hiperszilíciumos [AlSi20Cu], valamint az [AlSi22CuNiCo] ötvözet főleg robbanómotorok dugattyúinak gyártására alkalmazott anyag, mivel a jó kopásállósága és a melegszilárdsága mellett csökkenteni tudták a hőtágulását: 20°C-on csak $18 \cdot 10^{-6}$ 1/K, míg az 1100-as ötvözeté 27%-kal nagyobb).



11-12. ábra – Az Al-Si egyensúlyi fázisdiagram

A 8000-es ötvözetekre, a porkohászati ötvözetekre és az alumínium hibrid anyagokra vonatkozó néhány tudnivalót a 3.12.9. szakasz tartalmaz.

11.12. Alkalmazási példák

Az alkalmazásokat két irányból is áttekintjük: a fő ötvöző csoportok alapján, majd a rendeltetési területek szerint. A leltározás ízű szövegezés miatt a fejezet olykor talán kaotikusnak fog tűnni, de ha inkább kaleidoszkópnak tekintjük, úgy remélhetőleg kárpótlást ad a példák sokasága. Illusztráció ezekhez csak szűkösen adható, lévén a szerző igyekszik csak a saját képanyagával gazdálkodni. A típusjelek bő kavalkádjában való eligazodáshoz segítséget kaphat itt: http://www.euralliage.com.

11.12.1. Alkalmazási példák az ötvözési főcsoportok szerint rendszerezve

Az acélok után a legnagyobb tömegben felhasznált alumíniumot és ötvözeteit igen széles körben alkalmazzák. Az alkalmazás négy fő szektora a járműipari, az építőipari, a villamosipari, és a csomagolástechnikai szektor. A 11-17. táblázat jelzi, hogy érdekes eltérések mutatkoznak a világ egyes fejlett országait tekintve:

- Európában a közlekedési szektor a fő felhasználó, főleg Franciaországban,
- az USA-ban a csomagolóanyagként (főleg mint italosdoboz) való felhasználás a legjelentősebb; itt az alumínium részesedése háromszorosa az európai részaránynak,
- Japánban az építőipari felhasználás vezet.

Iparág	Európa	Franciaország	USA	Japán
Közlekedés	26%	33%	22%	29%
Villamosipar	10%	16%	10%	7%
Építőipar	21%	12%	22%	32%
Csomagolás	11%	10%	29%	8%
Egyéb	32%	29%	17%	24%

11-17. táblázat: Az alumínium fő alkalmazási területeinek megoszlása

– **Alakítható ötvözetek, 1000-es csoport**

1199-es ötvözet: dekorációs célokra, tükröző felületek (pl. fényszóróbetétek) bevonata, elektrolitikus kondenzátorok, elektronikai eszközök, számítógépek alkatrészei.

1050A, 1100 és 1200-as ötvözet: épületburkolatok, szórópalackok, dobozok, csomagolószerek.

1030, 1030B, 1100-as ötvözet: háztartási alumíniumfólia.

1340, 1350 és 1370-es ötvözet: villamos vezetékek, kábelsodronyok. A 11-13. ábrán Látható egy jellegzetes sodrony felépítése. Ennél a gyártmánynál nagyon sok szempontot mérlegelnek a távvezetékek építői, amelyek miatt jelenleg közel egy tucat sodronyszerkezet van forgalomban.

– **2000-es csoport**

2017A („dúralumínium"), 2014, 2024-es ötvözet: repülőgépek futóműve, szárnymerevítők, tartógerendák.

2618A ötvözet: kompresszorlapátok, a mindmáig egyetlen szuperszonikus utasszállító repülőgép, a Concorde, vázszerkezete.

2011, 2030-as ötvözet: jól forgácsolható ötvözetek, forgácsolt termékek gyártására elterjedt.

– **3000-es csoport**

3003-as ötvözet: hőcserélők, autóhűtők, klímaberendezések hőcserélői.

3004-es ötvözet: italosdobozok (az USA-ban kb. 100 milliárd darabot használnak fel évente), csomagolófóliák, közlekedési táblák.

3005-ös ötvözet: csomagolófóliák, antennák, hőszigetelések burkolata.

3105-es ötvözet: italosüvegek fémkupakjai.

– **Öntészeti ötvözetek, 4000-es csoport**

44100-as ötvözet („Alpax"): a legrégebben használt épületszerkezeti anyag, pl. kilincsek, fogantyúk, korláttalpak, összekötőelemek, továbbá hegymászó-felszerelések, jégcsákányok anyaga.

42100, 42200-as ötvözet: keréktárcsa, felfüggesztés, munkahengerek, traverzek, fékkengyelek, űrhajó-alkatrészek, könnyű páncélzat.

43300-as ötvözet: kitűnően önthető, nagy szilárdságra nemesíthető ötvözet. Gépkocsik motoralkatrészei, villamos készülékek anyaga. Megfelel az *MSZ EN 601:2004 Alumínium és alumíniumötvözetek. Öntvények. Az élelmiszerrel érintkező öntvények vegyi összetétele* szabvány követelményeinek.

45000, 45100-as ötvözet: hengerfej, karter.

46300-as ötvözet: motorblokk, kormányműalkatrészek.

47000-es ötvözet: vékony falú öntvények.

48000-es ötvözet: robbanómotor-dugattyúk; 12% Si mellett 1–1% Cu-et, Mg-ot és Ni-t tartalmaz. A 12%-nál nagyobb Si-tartalmú (18-25%) ötvözetekből a kétütemű motorok és a dízelmotorok dugattyúi készülnek.

– **Alakítható ötvözetek, 5000-es csoport**

5005-ös ötvözet: épületszerkezeti elemek, korlátok, ablakkeretek.

5050, 5052, 5454, 5754-es ötvözet: járművek lemezszerkezete, háztartási gépek, hajótestek, hőcserélők.

5086, 5083-as ötvözet: tengeri hajók, pótkocsik, metángázpalackok.

5283-as ötvözet: gázpalackok, tengeralattjárók merülőtartályai.

– **Alakítható ötvözetek, 6000-es csoport**

6060-as ötvözet: nagy sebességű húzással gyártható huzalok, szalagok.

6106, 6005A, 6061, 6082-es ötvözet: sajtolt profilok, járművázszerkezetek, födémszerkezetek, lépcsők, korlátok, hőfogórácsok, kandeláberek.

6061-es („Almelec") ötvözet: villamos távvezetéki sodronyok (légkábelek); vezetőképessége: 52,6% IACS (a tiszta rézé 100%).

– **Alakítható ötvözetek, 7000-es csoport**

7020-as ötvözet: rakéták hajtóanyagtartályai, könnyűharckocsik páncéllemezei.

7075-ös ötvözet: mint hagyományos alaptípus, csavarok, sportszerek, repülőgép-alkatrészek anyaga.

7049A ötvözet: T6 hőkezeltségi állapotban a legnagyobb szilárdságú Al-ötvözet.

11.12.2. Alkalmazások személygépkocsik alkatrészeihez

Az alumínium az „anyagok közötti harc" minden frontján jelen van: a motorblokknál az öntöttvassal, a dugattyúknál a kerámiákkal, az acéllal, a Mg-mal és a műanyagokkal a karterekné l, a rézzel pedig a hőcserélőknél küzd, míg a karosszéria elemeinél ismét az acélok és a műanyagok az „ellenfelei".

– **A motorblokk**

1924-ben a Farman gépkocsi motorblokkja volt az első, amely alumíniumból készült homokformaöntéssel. Az 1960-as években kezdtek igazán terjedni, anyaguk jellemzően a 46200-as ötvözet volt. A személyautók motorblokkjainak – országonként jelentősen változóan – jelenleg 20-50%-a készül alumíniumból. A német és az olasz gépkocsikra általában ez a jellemző, de az igazi úttörők a francia kocsik voltak, pl. a Peugeot 204 és a Renault R16.

– **A hengerfej**

Az USA kivételével szinte mindenütt alumíniumból készülnek gravitációs kokillaöntéssel, kisnyomású nyomásos öntéssel, főleg 45400-as és 46300-as ötvözetből a benzinmotorokhoz, illetve 43000-es ötvözetből a dízelmotorokhoz.

– **A dugattyú**

Az első kísérlet alumíniumdugattyú gyártására 1905-ben történt, és 1912-ben már sorozatban gyártotta a Chenard & Walker. 1930 óta szinte az összes gépkocsi dugattyúi 47000-es és 44800-as ötvözetből készülnek. A nagy dízelmotoroknál alkalmazzák a hipereutektikus – ahol a Si ≥ 11,7%; hiperszilíciumosnak is nevezik – ötvözeteket, amelyekben a Si-tartalom általában 16–22%.

A legelterjedtebb típus a horgannyal és kb. 50 ppm foszforral is ötvözött AlSi17Cu4, amelyet kereskedelmi nevén gyakran csak B390-es ötvözetnek neveznek, valamint ennek Mg-os változata, az AlSi17Cu4Mg. A hiperszilíciumos öntvények előnyei és hátrányai röviden a következők:

- Nagyobb keménység és emiatt nagyobb kopásállóság.
- Kitűnő önthetőség.
- Mérsékeltebb hőtágulás; az AlSi9Cu3-hoz képes kb. 15%-kal kisebb!
- A hipoeutektikus ötvözetekénél rosszabb forgácsolhatóság.
- Nagyobb olvasztási hőmérséklet.
- Drágábbak a termékek az alapanyag kisebb mértékű felhasználása miatt.

Az USA-ban korábban nagy mennyiségben használták a hiperszilíciumos ötvözetet nyomásos öntött, öntöttvas hengerpersely nélküli motorblokkok anyagaként, de mára ez a technológia szinte teljesen megszűnt, és visszatértek az öntöttvas motorblokkhoz vagy a hipoeutektikus ötvözethez.

A dugattyúknál, kompresszortesteknél és a levegőkezelő berendezés kopásnak kitett alkatrészeinél viszont fontos szerepet tölt be.

– **Olajteknők, karterek**

Olajteknő, vezérmű-, sebességváltó-, tengelykapcsoló- és kormányműház, olajszivattyú, vízpumpa: nyomásos öntéssel 46200-as ötvözetből.

– **Biztonsági elemek**

Függesztőkarok, fékkengyelek, keréktárcsák: Az új, nagy szilárdságú és nagy kifáradási határú ötvözeteket (42100) egyre több típusban alkalmazzák, kis nyomású kokillaöntéssel készítve az alkatrészeket.

– **Hőcserélők, hűtők, motortéri csövezések**

Az alumínium fokozatosan kiszorítja a rezet a fűtő-, hűtő és klímaberendezések gyártásában, annak köszönhetően, hogy megoldották a vékonyfalú csövek és lemezek levegőn való forrasztásának nehézségeit.

Igazi áttörést hozott a vízhűtők gyártásában a folyasztószer nélküli önforrasztó anyagok – réteges fémkompozitok – kifejlesztése. Együttes alakítással gyártják a két- vagy többrétegű csöveket, profilokat, lemezeket. A magot 1100, 1435, 3003, 3005, 3105, 6063, a forraszréteget 4004, 4045, 4047, 4104, 4343 ötvözet képezi. A forrasztott kötés kialakulásához szükséges anyagot a

40–70°C-kal kisebb olvadáspontú külső réteg megolvadása biztosítja. A hűtők kemencés forrasztással, automata sorokon készülnek.

– **Karosszéria**

Az alumíniumötvözetekből (5182, 6009, 6010, 6016) készült karosszériák jóval drágábbak, mint az acél, de a sportkocsik és a felső kategóriás gépkocsik területén jelentős részarányt képviselnek, ugyanis tömegcsökkentést csak az acél helyettesítése biztosíthat.

11.12.3. Utasszállító járművek

– **Vasúti és közúti járművek**

Az olyan közlekedési eszközöknél, amelyeknek gyakran kell megállni és elindulni (elővárosi vonatok, metrókocsik, villamosok, városi autóbuszok, utánfutók stb.) a súlycsökkentés fontos eleme a gazdaságos üzemeltetésnek. Ezeknek a járműveknek a fő szerkezeti anyagai a jól hegeszthető alumíniumötvözetek (6005A, 6061, 6082), pl. a városi autóbuszok anyaga: 5764.

Szolnokon működik a Stadler vagongyártó vállalat, amely Európa egyik legkorszerűbb ilyen üzeme: alumínium vázszerkezetű vasúti kocsikat gyárt, amelyek a hazai pályákon is futnak.

– **A tengeri közlekedés járművei**

A tengervízzel és a tengeri légkörrel szembeni kiváló korrózióállósága miatt az alumínium terjedése töretlen a parti vizek hajói, a vitorlás hajók, a csónakok, a parti mólók, pontonok gyártásában. A leginkább használt ötvözetek: 5454, 5754, 5083, 5086, 6005A, 6060, 6061, 6082, 42000, 44000, 51000 és 41000. Az öntvényeket a csomóponti elemekhez és a bonyolult alkatrészekhez használják, az árbocokat és a burkolatokat a 6000-es sorozat ötvözeteiből készítik.

A vitorlás hajók árbocainak profiljait főként 6106, 6005A, 6061, 6082 ötvözetből sajtolják. Ennek kapcsán megér egy kis kitérőt egy internetes fórumon talált vélemény, amely a „melyik a legjobb ötvözet árbocokhoz?" kérdésre adott válaszban fogalmazódott meg. A kisebb hajókhoz és a szörfökhöz a közepes szilárdságú 6060-as és a 6063-as T5-ös vagy T6-os hőkezeltségi állapotban, a nagyobb hajókhoz a 6061-T6 és a 6082-T6 (folyáshatár 240 MPa). Ritkán, de előfordul a jóval nagyobb szilárdságú 7075-T6/T9 is.

– **Légi közlekedés**

Az alumínium elterjedése és a repülés fejlődése egészen szorosan összekapcsolódott. A „dúralumínium" feltalálása 1903-ban új irányt szabott a repülésnek: a Zeppelin léghajók vázszerkezete ebből az anyagból készült, és az alumíniumvázas Breguet 14 repülőgépből 12 ezer darabot készítettek az I. világháború végéig. Még ma is az alumínium teszi ki a modern polgári repülőgépek tömegének legnagyobb hányadát. A mai idők polgári repülésének csúcsát képviselő Airbus A380-asban a következő az anyagok részaránya:

- 61% alumíniumötvözet,
- 22% kompozit (polimer mátrixú),
- 5% acél,
- 5% titánötvözet,
- 3% üveg,
- 4% egyéb.

A repülőgépek hagyományos alumíniumötvözetei a 2124, 2214, 7175, míg az új anyagok a 7010, 7050, 7150, 7475, amelyeket az anyagszerkezeti stabilitás érdekében különleges hőkezelési állapotban (T73, T736, T76) építenek be.

– **Katonai járművek**

Páncélozott tankok és járművek kerekei, lánctalpgörgői készülnek kovácsolt 2014-es ötvözetből. Páncéllemezek, rakétavetőcsövek, pontonjárművek anyaga a 7020 ötvözet, a kétéltű járművek, könnyűágyúk (helikopteres szállítás), lövedékek, rakétaalkatrészeké: 2014, 7049A, 7075.

11.12.4. Villamos és elektronikai alkalmazások

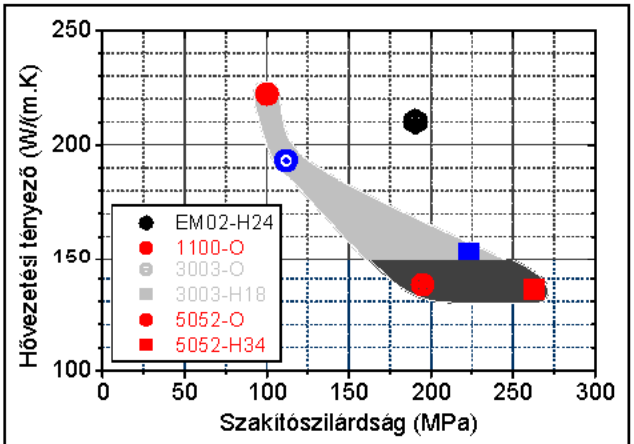
A villamos energia továbbítására szolgáló, alumínium anyagú vezetékek mintegy száz éve jelentek meg. A leggyakrabban alkalmazott típusok a legfeljebb néhány tized % szennyezőt tartalmazó ötvözetlen típusok: 1350, 1370, 1340, 1310. A 6101-es „Almelec" ötvözet egy változatát, az „Almeco"-t kifejezetten a lakóházak villanyvezetékei céljára fejlesztették ki, ugyanis jól bírja a villanyszereléssel járó hajlításokat, rángatást és egyéb igénybevételeket.

11-13. ábra – A miskolci Fux Zrt. új fejlesztésű, *Minel* márkanevű kábelsodronya; anyag: 1350-es ötvözet

A nagy tisztaságú (99,98–99,99%) alumínium az elektrolitikus kondenzátorok anyaga, míg az ultranagy tisztaságú (99,995–99,9995%), mind-

össze néhány tíz ppt* U- és Th-tartalmú típusok a nagy kapacitású elektronikai tárolók integrált áramköréhez használatosak.

A számítógépek processzorainak hűtésére olyan ötvözetet fejlesztett ki a japán Furukawa cég, amelynek a 200 MPa szakítószilárdsága ellenére a hővezető képessége közel olyan jó, mint az 1100-as ötvözeté (11-14. ábra). A jó hővezetési tulajdonságok a processzorhűtők mellett olyan termékek esetében is lényegesek, mint a lapos képernyők, fedélzeti navigációs kijelzők, fényforrások, kondenzátorházak, IC-tokok, lemezmeghajtók. Az ábrán jól megfigyelhető, hogy a maximális keménységig végzett hideghengerlés (H18) jelentősen rontja a 3003-as ötvözet hőelvezetését, míg a félkeményre hengerelés + stabilizálás (H34) nem. Meg kell jegyezni, hogy az 5052-es ötvözet vezetőképessége lágyított állapotban (O) sem volt éppen nagy.



11-14. ábra – Egyes alumíniumötvözetek szilárdsága és hővezetési tényezője

11.12.5. Az alumínium mint csomagolóanyag

Az alumíniumnak számos kedvező tulajdonsága van a konkurens csomagolóanyagokkal (üveg, műanyag, papír, karton, bádog) szemben.

- Ellenáll a légköri hatásoknak.
- Nem ereszti át a gázokat, a folyadékokat.
- Ártalmatlan az élelmiszerekre.
- Jól újra feldolgozható.
- Jól alakítható.
- Jól felületkezelhető (lakkozható és festhető).
- Jól összefér (kompatibilis) más anyagokkal a többrétegű csomagolóanyagokban.

Az élelmiszerek főzésére, sütésére és tárolására szolgáló ötvözetekkel szembeni elvárást az EN 601 és az EN 602 szabvány rögzíti; 0,25%-ban maximálja a Cu- és a Zn-tartalmat, 0,10%-ban a Pb- és 0,05%-ban a Ta-tartalmat. Ennek az előírásnak a 1050A, 1100, 1200, 3003, 3004, 3005, 5005, 5052, 5082, 5257, 5754, 4006, 6060, 6081, 6082 típusok felelnek meg. Az 5%-nál több Mg-ot tartalmazó ötvözetekből tilos élelmiszeripari célra szánt eszközöket, pl. edényeket készíteni.

Csomagolóanyagként megkülönböztetjük a merev, félmerev és a hajlékony csomagolásokat.

– Merev csomagolások
- Konzervdobozok: 3003, 3005, 5052.
- Szénsavas italok italosdobozai: 3004 (dobozteste), 5182 (fedél).
- Italosüveg-kupakok: 3003, 3105, 8011.
- Szórópalackok, tubusok: 1050A

– Félmerev csomagolások
- Lágy csövek fogkrémek és ragasztószerek tubusaihoz: 1070.
- Tepsik (tepsük), sütőtálcák: 3003.

– Hajlékony csomagolások
- Vékony fóliák: 8011, 8079.
- Üvegnyakkupakok: 1200.
- Fedelek, tejtermékek dobozainak zárófóliája, gyógyszertabletták tokozatának zárófóliája.

11.12.6. Háztartási eszközök:

– Konyhai eszközök
- Edények: 1050A, 3003.
- Teflonbevonattal és lakkozva: 4006.

– Háztartási készülékek
- Hűtőszekrények, mosógépek.
- Vasalótalp: EN AB49200 (AlSi9Cu3) nyomásos öntéssel, befoglalva a fűtőbetéteket is és a gőzcsatornákat.

– Fémbútor, sportszer, szabadidős tevékenység
- Uszodai szerelvények.
- Kempingfelszerelések: 6060, 6061, 6005A, 6106.
- Labdaütők.
- Sílécek (7049, 7075).
- Gerely.
- Fényképezőgépváz.
- Kerti szerelvények, fűnyírógép, szerszámnyelek.

– Kerékpár
- Csövek kengyeles vagy ragasztott csatlakozásokkal: 2017A, 2024, hegesztett csatlakozásokhoz: 6061.
- Öntvény csatlakozók: 21000.
- Kovácsolt hajtókar: 2017A.
- Öntött hajtókar: 21000, 42100.
- Keréktárcsa (felni): 6061.
- Sárhányó: 3003.

* ppt (part per trillion), azaz tíz a mínusz tizenkettediken

11.12.7. Építészeti, ipari és mezőgazdasági célú alkalmazások

– **Alumínium az épületekben és az építészetben**

Az épülethomlokzatok, falburkolatok, tetők, valamint az ablak- és ajtókeretek, erkélyek, korlátok stb. széles körben elterjedt anyagai az alumíniumprofilok és lemezek, amelyekkel olyan épületeken is találkozunk, mint a repülőterek, vasútállomások, toronyházak. Ugyancsak elterjedten alkalmazzák a fémbútorok anyagaként, gyakran színesre eloxálva.

– **Vegyipar**

Gyártókészülékek, szerelvények, tárolóedények: oxigénnel dúsított víz, tömény salétromsav, trágya, műanyagok, papír, élelmiszer és gyógyszer, desztilláló, ioncserélő, tengervíz-sótalanító.

– **Olajipar**

Tengeri kitermelőhelyek (az első, 6060-6061-es ötvözetből épített „offshore platform" 1957-ben épült, Venezuelában), csővezetékek, tárolókádak; az alumínium jól ellenáll a kénvegyületeknek.

– **Kriogén technológiák anyaga**

Föld alatti és szállítható tartályok cseppfolyós gázokhoz.

– **Mezőgazdaság**

Üvegházi vázszerkezetek, öntözőszerkezetek: 3003, 3004, 3005, 5052. Gyorscsatlakozók szerelvényei, tűzivízvezetékek és tömlők csatlakoztató szerelvényei: 44100, 42000.

– **Nagyméretű vázszerkezetek**

Állványzatok, mozgóhidak, daru- és kotrógépgémek, sportcsarnokok és hangárok tetőszerkezete, tetőburkolata, nyílászárórendszerei.

– **Köztéri szerkezetek, berendezések**

Útjelző táblák, kandeláberek, hídkorlátok, függőhidak, útkorlátok, tengerparti villanyoszlopok: 6005A, 6060, 6061.

11.12.8. További alkalmazások

Kopásmentes termékek: a 6% óntartalmú Al-Sn ötvözetek (A-E6UN, 8280) súrlódási nyomatéka egészen kiváló az acéllal annak köszönhetően, hogy az ón kenőhatást fejt ki. Hidraulikus és hidropneumatikus rendszerekben, valamint siklócsapágyperselyekhez, csúszógyűrűkhöz tömegével alkalmazza az autóipar.

A 20% Sn-tartalmú ötvözetek (8081) rendszerint acéllal alkotott bimetál csapágycsészék formájában készülnek.

– **Segédanódok**

A vízbe, különösen a tengervízbe merülő acélszerkezetek korrózióvédelmére jelenleg a legelterjedtebben az alumíniumot alkalmazzák, mivel a másik igazán alkalmas fémnél, a cinknél, jóval kisebb tömegű (Zn-ből háromszor, Mg-ból kétszer annyi kellene) segédanód biztosítja ugyanazt a védőhatást. A segédanód anyaga Al-Zn-Hg (Hydral 2B), Al-Zn-In (Hydral 2C) vagy Al-Zn-Sn ötvözet.

– **Nagynyomású / cseppfolyós gázok tárolása**

2001-es vagy 7060-as ötvözetből készülhetnek gázpalackok, 5013 és 5283-ból tengervíztárolótartályok. A 6082-es ötvözet (AlSi1MgMn / EN AW 6082) a hazai, háztartási pébégázpalackok fő anyaga.

– **Fémszemcse és fémpor**

A metálfestékek adalékai (pigmentek) a fémszemcsék és porok. Nagyon jelentős felhasználó az építőanyag-ipar: a Magyarországon Ytong néven ismert falazóanyag gyártásakor a cementet, mészkövet, gipszet és homokot tartalmazó keverékhez alumíniumport adnak, amely a mészkővel reagálva hidrogénbuborékokat képez, és így alakul ki a nagyon könnyű, 80 térfogat% porozitású kerámiahab.

A porok alakítószerszámban való sajtolásával majd e nyers darabok szinterelésével készülnek az olvadékból közvetlen kristályosítással nem előállítható ötvözetek.

– **Kohászati alkalmazások**

A tiszta fémek gyártásának egyik gyakori módja, hogy a fémoxidokat nem szénnel vagy szénmonoxiddal, hanem tiszta alumíniummal redukálják, ugyanis az alumíniumnak szinte az összes fémnél nagyobb az affinitása az oxigénhez. Az aluminotermikus reakción alapul a B, Ba, Ca, Cr, Co, Mg, Mn, Mo, Ta és V előállítása.

Az acélgyártásnál alapvető dezoxidálószer az alumínium, jellemzően 0,03–0,05% mennyiség marad az acélban, de egyes, különleges rendeltetésű – csökkentett sűrűségű és a hidrogén okozta késleltetett törésnek ellenálló – Mn-Al acélokban akár 3–12% is lehet a mennyisége.

Az alumínium számos színesfémötvözetnek fontos ötvözője, 1-12% határok között változó mennyiségben: Cu, Mg, Ti, Zn, Ni. A rézhez ötvözve kapjuk az alumíniumbronzokat. A Mg-nak, Zn-nek és a Ti-nak a legfontosabb ötvözőjeként tartjuk számon az alumíniumot; e színesfémek áttekintésekor kerülnek majd szóba az említett ötvözetek.

11.13. Az alumíniumötvözetek új típusai

A hagyományos ötvözetek korlátaiba ütköző felhasználók által támasztott újabb igények folyamatosan arra ösztönözik a fémkohászati kutatókat, hogy olyan anyagokat fejlesszenek ki, amelyek megfelelnek eme újabb igényeknek: különösen a szilárdságnövelés és a súlycsökkentés igénye erős az autóipar és a repüléstechniai ipar részéről. Az 1980-as években kezdődött anyagfejlesztések a következő fő irányokban haladtak:

- Al-Li ötvözetek kifejlesztése,
- szuperképlékeny alakításra alkalmas ötvözetek kifejlesztése,
- új ötvözetek a porkohászati úton gyártandó termékekhez,
- alumíniummátrixú kompozitok fejlesztése: önforrasztó réteges szerkezetek,
- alumíniummátrixú kompozitok fejlesztése: részecskeerősítésű és szálerősítésű kompozitok.

– Al-Li ötvözetek (8000-es csoport)

A lítium ötvözőként való alkalmazása különösen érdekes eredményeket hozott, mivel ez az ötvöző egyszerre csökkenti érzékelhetően a sűrűséget – Li-%-onként 3%-kal –, és egyben növeli a rugalmassági modulust – Li-%-onként 6%-kal. A repülőgépgyártás és az űrhajózás mindkét következménnyel sokat nyer, hiszen az űrbe juttatott eszközök minden grammja átlagosan 13 euróba kerül, és az Al-Li ötvözetek 8-12%-kal kisebb sűrűségűek. Másfelől pedig a nagyobb Young-modulus hasznos a vázszerkezeti anyagok merevségének növelése szempontjából.

A már száz éve ismert Al-Li ötvözetek mindegyike kiválásosan keményíthető, és a fő ötvözőn kívül még Cu-et, Mg-ot, Zn-et, Zr-ot, Ag-öt és Mn-t is tartalmazhatnak. A *European Aluminium Association* elsőként a 2090, 2091, 8090 és 8091-es típusokat szabványosította.

A fő keményítőfázis az Al_3Li – ellentétben a többi ilyennel – még hosszú idejű öregítés után is koherens fázishatárú marad. A Zr (0,1%) hozzáadása és a T8 hőkezelés elvégzése (megeresztés az alakítás után) jelentősen javítja a K_{Ic} törési szívósságot: az Al_3Zr kiválások csíraképződési helyként szolgálnak az Al_3Li-kiválások számára, ily módon ún. „duplex” kiválások jönnek létre, amelyeket a diszlokációk nem tudnak átvágni. Ez a mikroszerkezeti sajátosság a nagyobb szívósság, fáradással szembeni ellenállás mellett a szilárdságot is növeli, különösen a húzásra terhelt alkatrészeknél; ezért a 7075-ös és a 2024-es ötvözeteket váltották fel velük a repüléstechnikai iparban.

A „Weldalit 049” család Al-Cu-Li-Mg-Ag ötvözetei (2094, 2096, 2195) kitűnően hegeszthetők, csakúgy, mint a szintén űrtechnikai alkalmazásra kifejlesztett 2197-es típus (Al-Cu-Li-Mn).

A 8000-es ötvözetcsoportnak nem csak lítiumos tagjai vannak – miként a lítiumos ötvözetek sem csak a 8000-es csoportban találhatók.

- Az 1–2% vasat tartalmazó ötvözetekből főként vékony (10–100 μm) szalagok készülnek italosüveg-nyak- és háztartási fólia céljára: 8011 (AlFeSi), 8006 (AlFeMn), 8018 (AlFeSiCu).
- A 6% Sn-t és Cu, Ni stb. adalékot tartalmazó 8020-as, illetve a 20% Sn-tartalmú 8081-es ötvözet siklócsapágyperselyek anyaga.

– Szuperképlékeny ötvözetek

A szuperképlékeny ötvözetek* jelentősége abban áll, hogy belőlük egyetlen képlékenyalakítási műveletben, csekély erővel olyan, bonyolult alakú gyártmányok állíthatók elő, amelyek a hagyományos ötvözetekből csak több lépésben vagy egyáltalán nem készíthetők el. Egyes alumíniumötvözetek szuperképlékenysége régóta ismert, de nem terjedtek el a kis szilárdságuk miatt. Néhány éve viszont az intenzív kutatások eredményesnek bizonyultak, és kidolgoztak több, nagyszilárdságú szuperképlékeny ötvözetet, amelyek mikroszerkezeti sajátosságai a következők:

- Két, kb. azonos mennyiségű, diszperz eloszlású stabil fázis.
- 1–2 mikrométeres szemcseméret.
- A fő ötvözési rendszerek: eutektikus vagy / és eutektoidos ötvözetek, pl. Al-33Cu; Al-35Mg.

A Supral ötvözeteket – pl. Supral 100 (2004, Al-Cu6-Zr0,4) – főként Angliában használják, a relatíve kis igénybevételű alkatrészek anyagaként. Más típusok ötvözője lehet még: Mg, Ge, Cr, Li.

A finomszemcsés (6–12 μm) 7475-ös ötvözet 515–520°C-on szuperképlékenyen alakítható.

Az Al-Li ötvözetek (2090, 8090, 8091) szuperképlékenysége még jelenleg is kutatások tárgya, különösen az alakítással egyidejűleg végezhető diffúziós hegesztéssel kombinált folyamatok tisztázása áll előtérben.

– Porkohászati alumíniumötvözetek

A porkohászati gyártásról előre kell bocsátani, hogy nagyon költséges technológia, hiszen jó néhány műveletet kell elvégezni, amelyek időben és egyedi költségeikben is összegeződnek. A fő technológiai lépések a következők:

** A szuperképlékeny alakváltozást egyszerűen definiálhatjuk: olyan, kontrakció nélküli képlékeny alakváltozás, amelynek a mértéke meghaladja az 1000%-ot*

- porgyártás,
- hidegsajtolás,
- gáztalanítás: izzítás vákuumban,
- melegsajtolás,
- hagyományos alakítási műveletek elvégzése: folyatás, kovácsolás, hengerlés stb.

A porkohászati úton előállítható ötvözeteknél a gyártó nem ütközik abba a korlátba, amelyet a hagyományos ötvözeteknél az ötvözőnek a szilárd oldatban való oldhatósági korlátja jelent. Ennek köszönhetően olyan „ötvözetek" is előállíthatók, amelyek szilárdsága, kopásállósága és melegszilárdsága lényegesen nagyobb, mint az olvadékból gyártható ötvözeteké. A 8–12% Fe-tartalmú, továbbá V-ot, Si-ot, Mo-t és ritkaföldfémeket (RE) tartalmazó ötvözetek akár 100–150°C-kal nagyobb hőmérsékletig is alkalmazhatók, mint az e téren hagyományosan legjobb 2219-es ötvözet, amely 200–250°-ig melegszilárd. Ezek a porkohászati ötvözetek a sűrűségre egyenértékűsítve szinte elérik a legelterjedtebb Ti-ötvözet (Ti-6Al-V) melegszilárdságát.

A szilárdság, szívósság, kifáradási ellenállás és korrózióállóság szempontjából egyaránt kiemelkedő 7075-ös hagyományos ötvözet szilárdsága jelentősen növelhető a porkohászati eljárással készített gyártmányoknál, mégpedig anélkül, hogy a szívósság és a korróziós ellenállás romlana. A 7064-es ötvözet (AlZnMgCuCoCrZr) és a CW67-es ötvözet (AlZnMgCuZr) a két elterjedt típus; a hengerelt lemezek hosszirányában mért jellemzőiket a 11-18. táblázat tartalmazza.

Hagyományos	7075-T7651	500	580	10	35
Porkohászati	7090-T7	595	630	10	26
	7064-T7x / T76	630	655	13	32
	CW67 T7x	620	650	10	41

11-18. táblázat: A porkohászati ötvözetek mechanikai tulajdonságainak összehasonlítása a 7075-ös ötvözetéivel

A porkohászati gyártáshoz szükséges porok előállításának különleges módszereiből alakultak ki olyan különleges gyártási módszerek, mint a *gyorsdermesztés* és a *mechanikai ötvözés*. Amikor a porok gyártásánál nem csak egyetlen fémet őrölnek apró szemcsékké, hanem többfélét, úgy az őrlőtestek között egyidejűleg és ismétlődően mennek végbe aprózódási, összenyomódási és összehegedési folyamatok. Az őrlés közben adalékot, pl. sztearinsavat, is használnak az összehegedés szabályozására, a felületek oxidálódásának (Al_2O_3) vagy karbidok (Al_4C_3) képződésének serkentésére. Ennek a végeredménye homogén szemcseméretű ötvözetpor, amelyből porsajtolással vagy porfröccsöntéssel és ezt követő zsugorítással állíthatók elő a gyártmányok.

Néhány ötvözetporfajtát említve közülük:

- IN9052: Al–4%Mg–0,5%O–1,1%C, kitűnő korrózióállóságú ötvözet,
- IN9021: Al–4%Cu–1,5%Mg–0,5%O–1,1%C,
- 905XL: Al–4%Mg–1,3%Li–0,5%O–1,1%C.

Ez utóbbi ötvözet a következő előnyöket hordozza a „rendes" 7075-T73 ötvözettel szemben:

- azonos szilárdság,
- E = 80 GPa; amannál csak 69 GPa,
- sokkal jobb feszültségkorróziós ellenállás,
- kisebb sűrűség: 2,58 a 2,80-nal szemben.

A 905XL-nek vannak olyan változatai, amelyek 3-4% Li-ot és Be-ot is tartalmaznak; űrtechnikai eszközökhöz fejlesztették ki őket.

A kopásnak és a súrlódásnak jól ellenálló anyagok szintén porkohászati termékek. Az Al-Si-Ni-Cu-Mg+Fe+Zr és az Al-17Si-Cu-4Mg+grafit. ötvözet melegkopási ellenállása egyaránt kiváló.

Az egyszerűbb technológiákat is tovább kutatják, pl. az 1985-ben az *Osprey Metals* által szabadalmaztatott porlasztásos öntést.

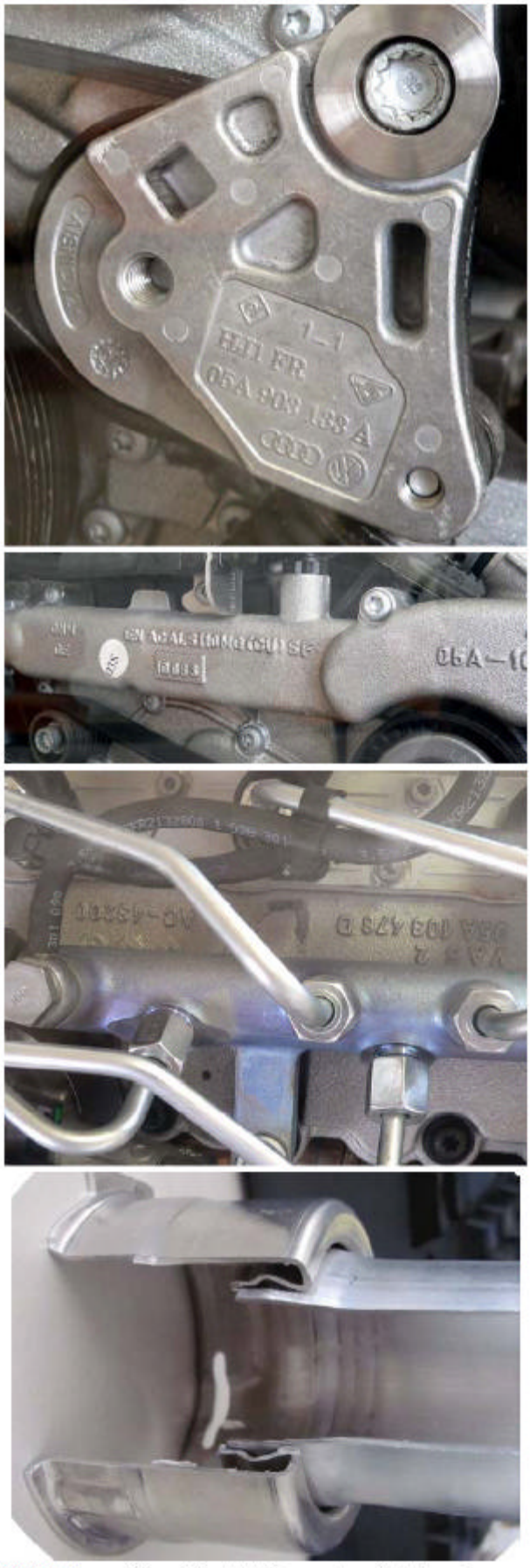
11.14. Újrahasznosítás

Az alumínium újrahasznosítása semmiféle nehézséget nem okoz, sőt, kifejezetten könnyűnek mondható. Belső újrahasznosításról beszélünk, ha az alapanyaggyártási technológián belül keletkező hulladékok újraolvasztása történik. Külső újrahasznosításról, ha a folyamat a klasszikus begyűjtés, elválasztás más fémektől és fajtánkénti válogatás szerint megy végbe. A legismertebb újrahasznosítási szektor az italospalackokra épít: 80%-nál nagyobb az újrahasznosítás aránya az évente kb. 2 millió tonnás piacon.

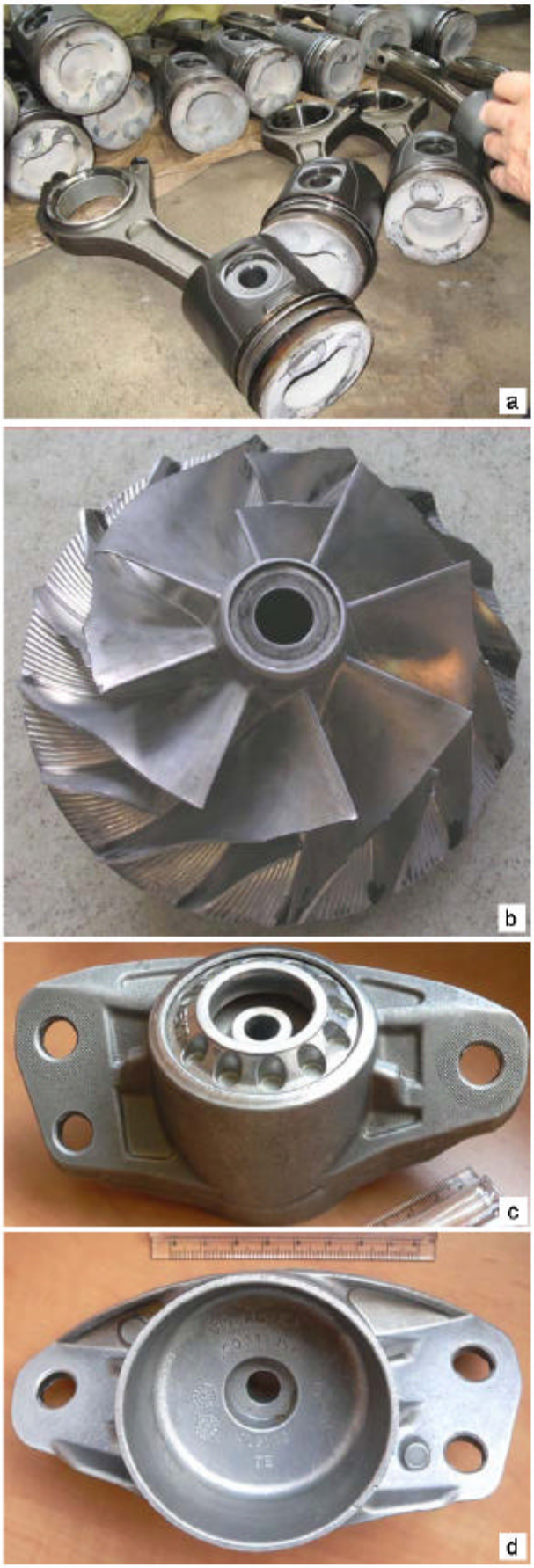
A begyűjtésen alapuló alumíniumgyártás neve az újraolvasztás, terméke a *szekunder alumínium*. Az újrahasznosítás különleges feladatokat támaszt, ha nincs (megfelelő) válogatás, de vannak belekeveredett anyagok, pl. a gépjárművek motorolajteknői, amelyek tartalmaznak acél csavarbetéteket, kötéseket. Ezekből az újraolvasztott öntészeti ötvözetek készülnek. Felhasználásuk: jóval olcsóbb, mint a primer alumíniumé, de a nyomásos öntés, a kokillaöntés a több szennyező miatt zárványosabb öntvényeket hoz létre, és a szigorú összetételi határok nem biztosíthatók.

Az eddigiekben áttekintett alkalmazások egy kis részére illusztrációkat mutatnak a fejezet további ábrái (11-15–11-33. ábra).

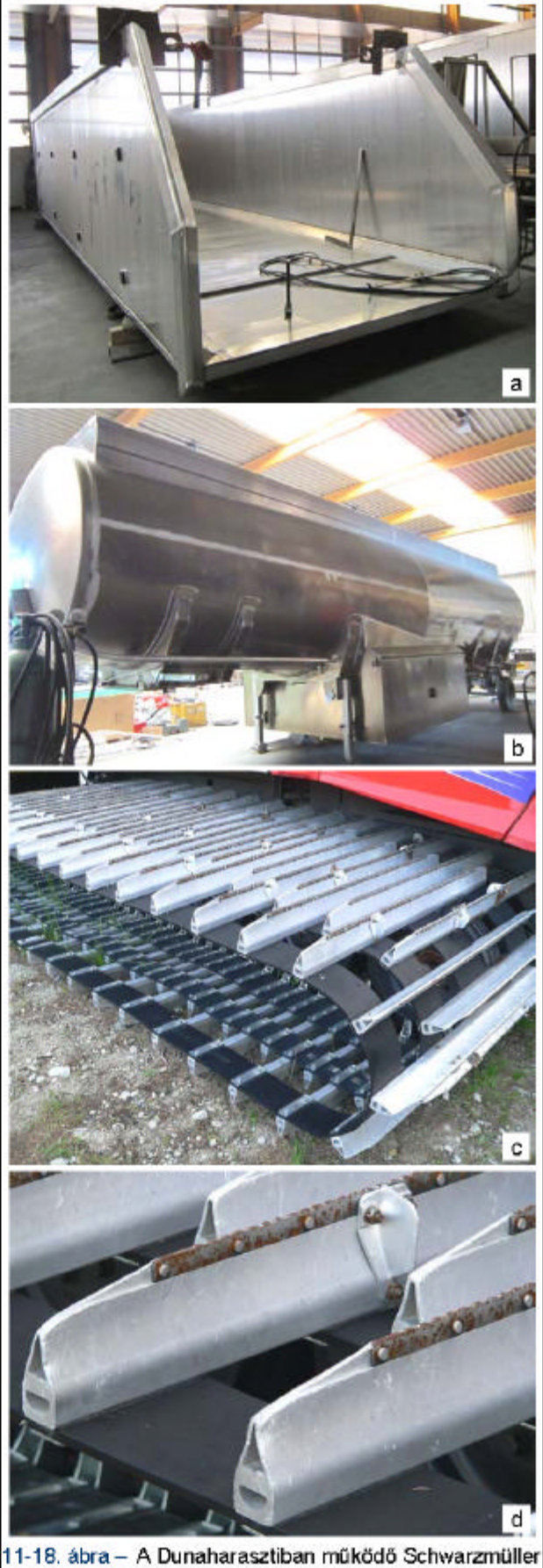
11-15. ábra – Alumíniumból épített járművek



11-16. ábra – Alumíniumöntvény motoralkatrészek, valamint motortéri csövezések



11-17. ábra – Gázmotordugattyúk (a), turbótöltő turbinakereke (b) és a VW egy AlSi12 anyagú öntvénye (c, d)

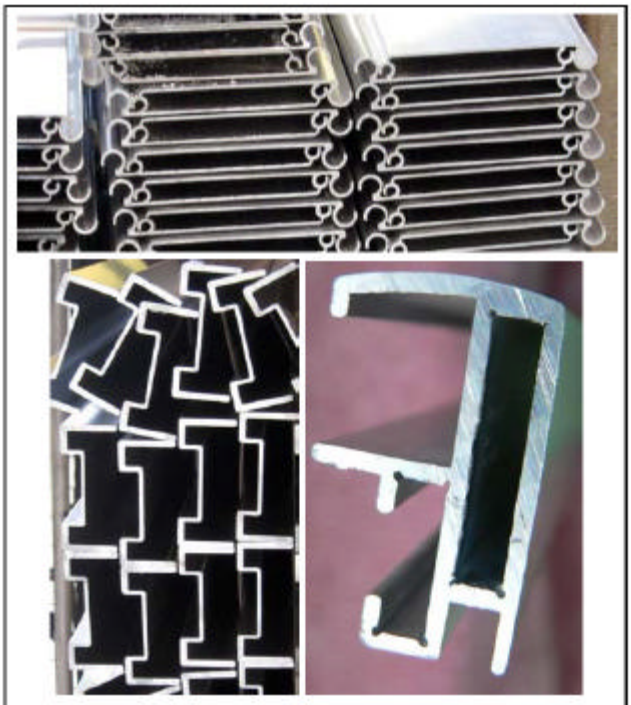


11-18. ábra – A Dunaharasztiban működő Schwarzmüller által gyártott kamionpótkocsik gyártás közben (a, b). Sípályakezelő jármű hernyótalpa (c, d)

11-19. ábra – Köztéri táblatartó (elrepedt) csatolóelemei

11-20. ábra – Kovácsolt alkatrészek

11-21. ábra – Öntött, sajtolt, hegesztett mólóalkatrészek



11-22. ábra – Sajtolt profilok metszete

11-23. ábra – Fém–fém kompozit cső kisajtolása a dortmundi egyetem laboratóriumában

11-24. ábra – Árnyékolószerkezet épületablakon

11-25. ábra – A kazánházi szigetelt gőzvezetékek burkolatai alumíniumlemezekből készülnek

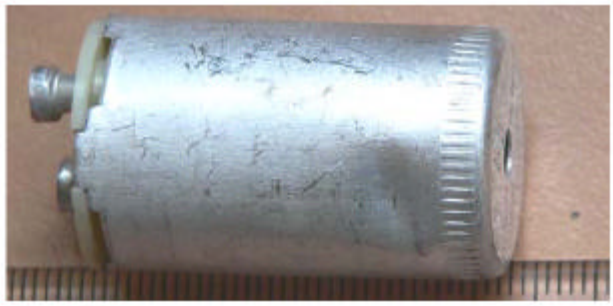
11-26. ábra – Műalkotástalapzat réteges korróziója; Lyon

11-27. ábra – Cseppfolyósnitrogén-tárolótartályok (fent). A propánbutángáz tárolására szolgáló palackok: hagyományos alumíniumpalackok, acélpalack (kék) és üvegszálas műanyag kompozit alapanyagú palack

11-28. ábra – Alumínium fémhab egy darabja

11-29. ábra – Italok, vegyi anyagok, fémporok tárolására szolgáló palackok, dobozok, fedelek, zárófóliák és fedőfóliák

11-30. ábra – Ragasztóanyagos tubus



11-31. ábra – Fénycsőgyújtó alumíniumháza

11-32. ábra – Tejeskanna, teniszütők és régi menzai evőeszközök

11-33. ábra – Nevezetes párizsi és budapesti épületek, amelyekben meghatározó szerepet kapott az alumínium felhasználása a homlokzat, a tetőburkolat, a tetőszerkezet vagy a belsőépítészeti fémszerelvények anyagaként

12. fejezet
A réz és ötvözetei

La bassinoire (ágymelegítő); Musée comtois, Besançon

12. A réz és ötvözetei

A réz és ötvözetei széles körben előállított és felhasznált anyagok. A fémek ember általi felhasználása és megmunkálása a rézzel vette kezdetét, ami annak köszönhető, hogy a Föld sok táján lehetett ún. *termésrezet* találni. A továbbiakban a következő rézanyagokkal foglalkozunk:

- ötvözetlen réz vagy vörösréz,
- gyengén ötvözött rézötvözetek: Cu-Ag, Cu-Cd, Cu-Te, Cu-Cr, Cu-Be ötvözetek,
- erősen ötvözött rézötvözetek: bronzok, sárgarezek.

12.1. A vörösréz

12.1.1. Fizikai tulajdonságok

A réz legfontosabb fizikai tulajdonságai szobahőmérsékleten:

- Olvadáspont: 1083°C.
- Sűrűség: 8 930 kg/m^3.
- Hőtágulási együttható: 16,6·10^{-6} 1/K
- Hővezetési tényező: 385 W/(m·K)
- Fajlagos ellenállás: 1,7241·10^{-6} Ω·cm.

A fizikai tulajdonságok közül kiemelkedően jó a réz hővezetési tényezője és villamos vezetőképessége. A villamos ellenállás értékét 20°C-on ρ = 17,241 nΩ·m értékben határozták meg, 1913-ban. Ez az érték szolgál viszonyítási alapként a többi anyag vezetőképességének megadására, vagyis a réz vezetőképessége 100% IACS*. A réz kitűnő villamos vezetőképességét csak az ezüst múlja felül 106% IACS értékkel.

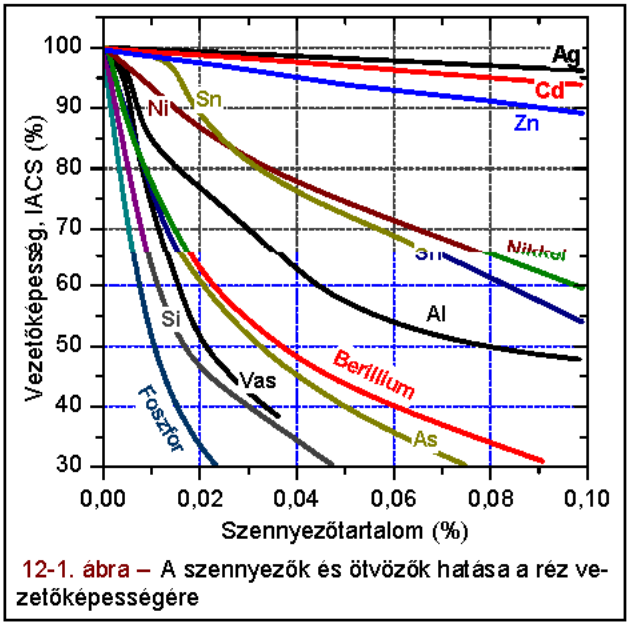
12.1.2. A szennyezők hatása

A szennyezők közül külön kell említeni a mechanikai tulajdonságokat rontó oxigént, valamint a vezetőképességet rontó ötvözőket. A szilárd rézben alig oldódó oxigén Cu_2O (réz-oxidul) fázist alkot, amely fázissal a réz eutektikumot képez, vagyis az eutektikus koncentrációnál – 0,4% oxigén – az olvadékból közvetlenül kristályosodik a Cu és a Cu_2O fázis finom keveréke. Az eutektikum olvadáspontja kisebb (1 062°C), mint a primeren megszilárduló rézszemcséké (1 083°C), ezért a megszilárdulás utolsó szakaszában kialakuló eutektikum a szemcsehatárokon helyezkedik el, és elridegíti, repedésre, törésre hajlamosítja az anyagot, különösen redukáló atmoszférában (pl. hidrogén) 300°C fölé való hevítéskor.

A hidrogén redukálja a Cu_2O fázist, miközben nagy nyomású vízgőz képződik, amely ugyancsak elridegedést okoz: ez a jelenség a *hidrogénbetegség*, vizsgálatára az MSZ EN ISO 2626:1998 szabvány vonatkozik.

A nagytisztaságú réz kedvező villamos és hővezetési tulajdonságait minden esetben rontják a szennyezők, főként a foszfor hatása jelentős, de 0,1%-os mennyiségig ugyancsak erősen rontja a vezetőképességet a Si, As, Be, Fe és Al is. A roszszabb vezetőképesség, pl. növeli a villamos vezetékek veszteségét, illetve rontja a hőcserélők termikus hatásfokát.

A vezetőképesség-romlást okozó foszfor a réz oxigénmentesítésekor marad oldva a rézben, néhány század százalék mennyiségben. A mechanikai tulajdonságokra nincs hatással, de ilyen kis mennyiségben is rendkívül erősen rontja a vezetőképességet, amint ezt a 12-1. ábra jelzi.



12-1. ábra – A szennyezők és ötvözők hatása a réz vezetőképességére

12.1.3. Az ipari rezek típusai

– Oxigéntartalmú rezek

A Cu-tartalom legalább 99,90%. A villamos és hővezető képessége egyaránt kitűnő, villamos vezetők anyagaként alkalmazzák, de csak nemredukáló atmoszférában. A szabványos típusok** finomítása (tisztítása) ma már döntő mértékben elektrolízissel történik, az alaptípus jele: Cu-ETP. Egyre kevésbé alkalmazzák az átolvasztással való finomítást, mivel e rezek oxigéntartalma nagy; az alaptípusok a Cu-FRHC (99,9% Cu) és az öntészeti célú Cu-FRTP (99,85% Cu).

* A rövidítés egy szabvány nevét takarja: IACS = International Annealed Copper Standard

** MSZ EN 1412:1998 Réz és rézötvözetek. Európai számjelölési rendszer

– **Oxigénmentes (dezoxidált) rezek**

A Cu-tartalom legalább 99,9%, amelyet elektrolitikus, esetleg tűzi átolvasztásos finomítással biztosítanak. Az oxigénmentesítést foszforral végzik; ennek köszönhetően a réz jól hegeszthető lesz, és nem ridegedik el nagy hőmérsékleten. A foszfor mint dezoxidálószer maradéka azonban erősen rontja a vezetőképességet. A foszfor mennyisége 0,013–0,50 (Cu-DHP, 90–70% IACS) vagy a szigorúbb előírásnak megfelelő típusnál 0,004–0,012% (Cu-DLP, 98-85% IACS). Ezek a típusok jól alakíthatók, mélyhúzhatók, hegeszthetők, de a vezetőképességük esetenként jóval kisebb, mint a foszformentes típusoké.

– **Oxigénmentes, nagy vezetőképességű réz**

Legalább 99,95% (Cu OF, IACS ≥ 100%), illetve 99,99% (Cu-OFE, IACS ≥ 101%) rezet tartalmaznak, az utóbbit elektronikai célra alkalmazzák. A dezoxidálószert védőgázos kemencében való újraolvasztással távolítják el, vagy nagyon gondosan ellenőrzik a dezoxidens adagolását. Ez a réztípus üveggel is összehegeszthető.

12.1.4. Mechanikai tulajdonságok

A tiszta réz nagyon lágy anyag, a folyáshatára 40–50 MPa. A főként vezetékanyagként való alkalmazásokban a szilárdságát és a nyúlását a hidegalakítottságának mértéke határozza meg. A vezetékanyag lemezeket, szalagokat, síneket hengerléssel, a huzalokat pedig húzással állítják elő, és az alakítás függvényében a 12-1. táblázat szerint alakulnak a mechanikai tulajdonságok.

Lágyított	OS	70	230	45
Negyedkemény	H11	210	270	25
Félkemény	H12	250	300	14
Kemény	H14	320	350	6

12-1. táblázat: A hidegalakítás hatása a réz néhány mechanikai tulajdonságára; tessék észrevenni, hogy az egyezményes folyáshatár itt a 0,5% maradó alakváltozáshoz van megadva, tehát nem sajtóhibáról van szó!

A hidegalakított réztermékek megfelelő hőkezelés hatására újrakristályosodnak. Az újrakristályosodási hőmérséklet* a szennyezőtartalom és az előzetes hidegalakítás mértékének függvénye.

Megjegyzés: hidegalakított állapotban mérve a Young-modulus 125 GPa, a Poisson-tényező 0,35, a kifáradási szilárdság 100–120 MPa, amely 70–80-ra csökken a lágyítás hatására.

12.1.5. Korrózióállóság

Szobahőmérsékleten a réz felületét összefüggő és jól tapadó Cu_2O réteg borítja, amely megvédi a felületet a korróziótól. A levegőben lévő nedvesség, valamint a kén- és széntartalmú komponensek hatására ez az oxidréteg feketés vagy zöldes elszíneződést szenved. A rezet általában megtámadják a vegyi anyagok, a tengervíznek azonban jól ellenáll. A réz érzékeny a *kavitációra*, és az érzékenysége annál erősebb, minél nagyobb a vízben oldott oxigén és szén-dioxid, illetve minél kisebb a Ca^{2+} és Mg^{2+} ionok mennyisége. Ilyen kedvezőtlen esetekben az áramlási sebességet a rézcsöves hőcserélőkben 1,2 m/s-ban korlátozzák.

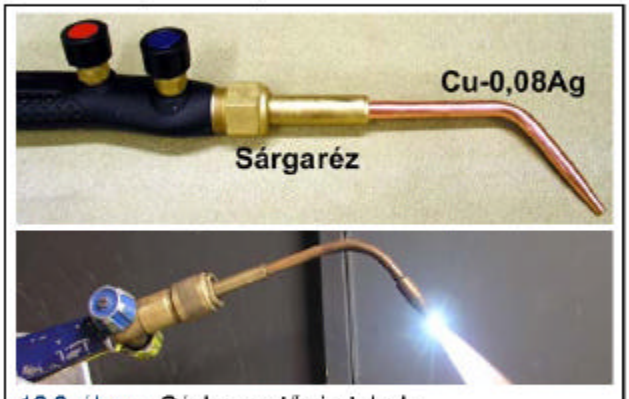
12.2. A gyengén ötvözött rézötvözetek

A rézötvözeteknél a „gyengén ötvözött" kategóriába azok tartoznak, amelyek ötvözőtartalma nem haladja meg az 1%-ot; kivételt képeznek a Cu-Be ötvözetek, itt ugyanis 2%-ig terjed a Be-tartalom. A szóban forgó ötvözetek általában megmaradnak jó villamos vezetőnek, ugyancsak megőrzik a korrózióállóságukat, miközben a szilárdságuk jelentősen növelhető hidegalakítással vagy kiválásos keményítéssel.

A gyengén ötvözött rézötvözetek csoportjába öt fontosabb alcsoportot sorolunk:

– **Cu-Ag ötvözetek**

Mintegy 0,08% ezüst hatására a 200°C körüli újrakristályosodási hőmérséklet több mint 50%-kal növekedik, egyben a melegszilárdság és a kúszásállóság is javul, ezért olyan berendezésekben alkalmazzák, ahol az üzemi hőmérséklet nagy, pl. hegesztő- és forrasztópisztolyok, fokozottan melegedő villanymotorok, ónozóberendezések.



12-2. ábra – Gázhegesztő pisztolyok

* *Újrakristályosodási hőmérsékleten, technológiai értelemben, azt a hőmérsékletet szokás érteni, amelyen 1 órás hőn tartás a mechanikai tulajdonságok teljes mértékű megújulását és a kristályszerkezet teljes újraszerveződését eredményezi.*

– **Cu-Cd ötvözetek**

0,7–1,0% kadmiummal ötvözve a rezet, a szilárdság, a kifáradási határ, a kúszáshatár mintegy a kétszeresére növekedik az alakítással keményített termékeknél, pl. nagyszilárdságú vezetékek, ponthegesztőgépek elektródái (12-3. ábra), villamos vezető rugók. A hajdan az egész világot behálózó telefonvezetékek az ún. telefonbronzból készültek (CuCd1Sn0,5 vagy CuCd0,9Sn0,4). Néhány évtizede a gépkocsik hűtőjének anyagaként is elterjedten alkalmazták, de a hegesztésnél, forrasztásnál keletkező mérgező füst miatt megszűnt az e célra való alkalmazásuk.

Az élő szervezetre veszélyes anyagok gyártásban való korlátozásáról szóló 2002/95/EK irányelv alól a gyártók mentesíteni kívánták a Cu-Cd ötvözeteket. Az indok az volt, hogy nincs más ötvöző, amely a vezetőképesség erős romlása nélkül ennyire tudná növelni a hajlításnak és rezgésnek kitett villamos vezetékek kifáradással szembeni ellenállását. Ám az uniós tiltás 2006. július 1-én életbe lépett. Jó példa az anyagkutatások mozgatórugóinak sokféleségére, hogy ez a környezetvédelmi alapú tiltás vitte a nagy gyártókat a kadmium nélküli alternatíva kidolgozására, és ez néhány év alatt sikerült is egy sokalkotós rendszer, a Cu-Ag-Fe-Ti-Cr-Si-P ötvözet* formájában.

– **Cu-Te ötvözetek**

A 0,3–0,7%-ban a rézbe ötvözött – de abban nem oldódó telluridokat képező – tellúr szinte nem is rontja a vezetőképességet, ám jelentősen növeli a szilárdságot és az újrakristályosodási hőmérsékletet, mindezen túl pedig különösen megjavítja a forgácsolhatóságot. Ugyanezt a hatást, vagyis a forgácsolásnál képződő forgács törékenységét biztosítja a Se, a S és az Pb.

A nagypontosságú lézerfúvókák (12-3. ábra) anyaga is a jól forgácsolható Cu-Te ötvözet, de az új fejlesztések a mintegy tízszer simább belső felületet (R_A = 100 nm) biztosító hidegalakítás érdekében Cu-Ag és Cu-Zr ötvözetre tértek át.**

– **Cu-Cr ötvözetek**

A króm kiválásos keményedést biztosít a rézkróm ötvözeteknek: 1000°C-ról vízben edzés és 450°C-os megeresztés hatására 450 MPa-ra nő a szilárdság, és ez 450°C üzemi hőmérsékletig meg is őrizhető, emiatt ponthegesztő elektródák, fékberendezések alkatrészei és nagy teljesítményű villamos kapcsolók anyagaként használják.

12-3. ábra – Ellenállás-ponthegesztő elektródák (fent), használt és új plazmaívhegesztő-fúvókacsúcsok (középen és lézersugaras vágáshoz használt lézerfúvókák (az alsó képen)

– **Cu-Be és Cu-Co-Be ötvözetek**

Kiválásosan keményedő, azaz nemesíthető ötvözetekről van szó; az edzési hőmérséklet 800°C, a megeresztésé 320°C. Az elérhető szakítószilárdság a nemesítést követő hidegalakítás után akár 1 500 MPa (!) is lehet, és ezt 300°C-ig megőrzik a szóban forgó ötvözetből készített rugók, alátétek, membránok, szikrázásmentes érintkezők, amelyek vezetőképessége viszont csak negyede a tiszta rézének. Amennyiben legalább 50% IACS értékű villamos vezetőképesség szükséges, a 900 MPa szilárdságú Cu2,5Co0,5Be ötvözet alkalmazható.

* *A Leoni 2007-ben fejlesztette ki a Histral márkanevű anyagot*

** *United States Patent 7363796 (2008)*

12.3. Erősen ötvözött rézötvözetek

A nagymennyiségű ötvözővel való ötvözés általában kettős célt szolgál: a szilárdság érdemi növelését és a viszonylag drága réz olcsóbb komponenssel való helyettesítését, amelynek természetesen az a következménye, hogy számottevően növekedik a fajlagos ellenállás, tehát romlik a villamos vezetőképesség. A fő ötvözők a Zn, az Sn és az Al, amelyek mindegyike jól oldódik a rézben. Az ötvözetek a kisebb ötvözőtartalomnál LKK kristályszerkezetű szilárd oldatok, nagyobb mennyiségben viszont – a vegyületekhez hasonlóan kémiai képlettel leírható – intermetallikus fázisokat is tartalmaznak, mint pl. CuZn, Cu_5Sn, Cu_3Al, amelyek lágy fázisok, illetve Cu_5Zn_8, Cu_4Sn, Cu_9Al, amelyek viszont rideg fázisok.

12.3.1. Sárgarezek (Zn = 5–45%)

A sárgarezek fő ötvözője a horgany, amelynek mennyisége 5–45% lehet, ezen kívül további ötvözők is előfordulhatnak, ha valamilyen különleges tulajdonságot kívánnak vele javítani. A növekvő horganytartalommal az anyag színe is változik a rózsavöröstől a sárgáig. A sárgarezek jól önthetők, hideg- és melegalakíthatók, húzhatók, mélyhúzhatók, forgácsolhatók.

– **Egyszerű vagy ötvözetlen sárgarezek**

A cinktartalomtól függően többféle szilárd oldat jöhet létre a Cu-Zn kétalkotós ötvözetekben (α, β, β' és γ), de ipari felhasználásra csak kétféle ötvözetcsoport kerül:

- Az α-ötvözetek (Zn < 33%) hidegen és melegen egyaránt jól alakíthatók, szilárdságuk a Zn-tartalommal és a hidegalakítással növekedik.
- Az α- és β-fázist egyaránt tartalmazó ötvözetek Zn-tartalma 33 és 45% közé esik, tulajdonságaikat a β-fázis mennyisége szabja meg. Ez a fázis növeli a szilárdságot és a forgácsolhatóságot, de csökkenti a szívósságot, vagyis ridegebbé, a kifáradással szemben érzékenyebbé teszi a sárgarezet. A β-fázis lágy, de mivel 455°C-on átalakul β'-vé, ún. rendezett rácsú szilárd oldattá, amely viszont kemény és törékeny, a képlékenyalakítást a β → β' fázisátalakulás hőmérséklete felett szokták végezni. Az előalakított gyártmány lehűlve nagy szilárdságú lesz, és jól forgácsolható.

– **Ötvözött sárgarezek**

Az ólom nem oldódik a Cu-Zn ötvözetben, hanem apró gömböcskéket alkot, amelyek következtében a forgácsolásnál a leválasztott forgács könnyen összetöredezik. Az ólom emellett egyfajta kenést is biztosít, csökkentve így a súrlódást a forgácsolószerszám és a munkadarab között. A 3% Pb-tartalmú CuZn40Pb3 ötvözetből készülnek a lemezekből kivágással gyártott alkatrészek.

Az Sn, Al, Si ún. β-képző ötvözők, tágítják a β-fázis stabilitásának hőmérséklet-tartományát, ezáltal javítják a melegalakíthatóságot, mivel kisebb hőmérsékleten is lehetővé teszik. Másként befolyásolja az ötvözetek szerkezetét a Ni, Mn, Fe: ezek a lágy α-fázis mennyiségét növelik, és így biztosítják a jobb (főleg hideg-) alakíthatóságot. Némely esetekben kívánatos a kopásállóság javítása: ilyenkor alkalmazzák a CuZn29Sn1 vagy a CuZn22Al2 ötvözetet hőcserélőcsövek anyagaként, a tengerjáró hajók hajócsavarjait pedig a nagy szilárdságú és jól önthető vagy kovácsolható CuZn40MnAl ötvözetből készítik.

A mechanikai tulajdonságokat a 12-2. táblázat foglalja össze; ***d*** jelöli az átmérőt, ***s*** pedig a lemezvastagságot.

Típus	Állapot	R_m # $R_{p0,5}$ (MPa)	A (%)
CuZn10	Lágyított	275 # 100	45
	H11	320 # 250	25
	H12	370 # 320	12
	H14	430 # 380	5
CuZn40	Lágyított	370 # 160	40
	H11	390 # 265	30
	H12	440 # 315	25
	H14	510 # 440	2
CuZn39Pb2	d ≤ 3, s ≤ 7	480 # 350	5
	d ≥ 30, s ≥ 50	350 # 180	25
CuZn29Sn1	Lágyított	380 # 180	50
	H34	450 # 380	25
CuZn22Al2	Lágyított	400 # 200	45
	H34	550 # 450	20
CuZn40MnAl		580	15

12-2. táblázat: A hidegalakítás hatása a réz néhány mechanikai tulajdonságára (tessék észrevenni, hogy az egyezményes folyáshatár itt is a 0,5% maradó alakváltozáshoz van megadva, tehát nem sajtóhibáról van szó!)

12.3.2. Korrózióállóság

A sárgarezek korrózióállósága a felhasználási területükön általában jó, de 15% Zn-tartalom felett két jellegzetes korróziós problémával kell esetükben számolni, amelyek a következők:

- a szezonális törés és
- a cinktelenedés (vagy talán szebben kifejezve: cinkvesztés).

A szezonális törés néven ismert károsodás a nagy páratartalmú levegőn lép fel olyankor, amikor az alkatrészekben hidegalakításból, forrasztásból vagy az üzemi terhelésből adódóan stb. származó *maradó feszültségek* vannak (eredetileg sárgaréz lőszerhüvelyek repedéseiként észlelték a 20. század elején, az indiai monszun meleg párás viszonyai között, és erről kapta a nevét). Megelőzni feszültségcsökkentő hőkezeléssel lehet, amelyet 300–320°C-on kell végezni. Valójában a hidegen alakított és a maradó feszültséget tároló sárgaréz feszültségkorróziós töréséről van szó.

A cinktelenedés hatására a sárgarézben porózus és rézdús zónák alakulnak ki. A Zn eltűnése folytán vörösesre színeződik a sárgaréz, és jelentősen veszít a szilárdságából. Főként a kétfázisú ötvözeteket érinti; a horganydús β-fázist támadja a korróziós hatású víz. Az α-sárgarezekben minden más fémes ötvözőt is érinthet ez a jelenség: pl. az alumíniumtalanodás, a nikkeltelenedés stb. Az alfa-ötvözeteknél (de csak ezeknél) elkerülhetők az ötvözőszegényedési folyamatok 0,04% As (arzén) hozzáötvözésével. A cinktelenedés ellen arzénnal védetté tett sárgarezeket a tengervízállóságukat leginkább kihasználó haditengerészetről nevezték el „admiralitás sárgaréznek".

Maga a folyamat – a könnyen félreérthető elnevezés ellenére – nem csak a cink szelektív kioldódását jelenti, hiszen a réz vele együtt szintén oldódik, viszont a cink fokozott hajlama kétségtelenül meghatározó. A cinktelenedéssel szembeni ellenállást szabványos* korróziós próbával és metallográfiai vizsgálattal lehet meghatározni.

12.3.3. A bronzok (ónbronzok)

A történelmi korokban kialakult „bronz" elnevezés valójában csak a 3–20% Sn-tartalmú Cu-Sn ötvözetekre vonatkozik, de ha nem az ón a fő ötvöző, akkor is gyakran bronzként említik az ötvözeteket, a fő ötvöző előtagként való megadásával, pl. alumíniumbronz, kadmiumbronz stb.

– Ötvözetlen (egyszerű) bronzok

Az ipari felhasználású ónbronzok Sn-tartalma jellemzően 3–20%, kivéve a „harangbronzokat" (Sn = 20–25%) és a „tükörbronzokat" (30–35% Sn). A harangok jól ismert hangzását a nagy Sn-tartalom miatt az öntvényekben kialakuló kemény és rideg δ-fázis biztosítja. Az ipari bronzok a következő csoportokba sorolhatók:

- Jól alakítható bronzok (α-bronzok), amelyek szilárdsága az Sn-tartalommal és a hidegalakítással növekedik.
- Öntészeti bronzok (α+δ szerkezetű bronzok), amelyek tulajdonságait a kemény δ-fázis mennyisége szabja meg. Ez utóbbi mennyiségét az óntartalom mellett a lehűtési sebesség is befolyásolja.

– Ötvözött bronzok

- *Foszforbronzok* (pl. CuSn8P): a kb. 0,3% foszfor Cu_3P kiválásokat képez, és így jelentősen növekedik a szilárdság.
- *Ólmozott bronzok* (CuSn8Pb3Zn6): az ólom – miként a sárgarezeknél is említettük – nem oldódik a szilárd oldatban, de akár 7%-ig is „ötvözhetik" a bronzokba, mivel kitűnően javítja a forgácsolhatóságot és a tömítő képességet. Esetenként akár 30%-ot is elér az Pb-tartalom: ezek az anyagok jó siklási tulajdonságokat mutatnak, ezért siklócsapágyak, csúszópályák stb. anyagaként alkalmazzák őket.
- *Horganybronzok* (pl. CuSn5Zn5Pb5): a cink megkönnyíti az olvadékban oldott gázok eltávozását a megszilárduláskor, ezzel javítja az önthetőséget és az alakíthatóságot. A tömíthetőséget segíti elő az ólom (< 6%), ezért, ez az ötvöző jól alkalmazható víz- és vízgőzrendszerek (pl. csaptelep), továbbá az olajipari csővezetékek szerelvényeinek anyagaként.

Különféle állapotú bronzok mechanikai tulajdonságait a 12-3. táblázat foglalja össze.

CuSn8	Lágyított (R370)	370-450	< 300	> 50
CuSn8	Kemény (R660)	660-750	> 620	> 3
CuSn10-C	Homoköntés (GS)	> 250	> 130	> 18
CuSn10-C	Folyamatos önt. (GC)	> 280	> 170	> 10
CuSn5Zn5Pb5-C	Homoköntés (GS)	> 200	> 90	> 13
CuSn5Zn5Pb5-C	Nyomásos öntés (GM)	> 220	> 110	> 6

12-3. táblázat: Ónbronzok mechanikai tulajdonságai

12.3.4. Alumíniumbronzok / kuproalumíniumok

A 4–14% Al-tartalmú alumíniumbronzok jól ellenállnak a tengervíz okozta korróziós hatásoknak, a feszültségi korróziónak, a korróziós kifáradásnak, emellett nagy szilárdságú anyagok is.

– Ötvözetlen kuproalumíniumok

Fő ötvözetcsoportjaik a következők:

Az egyfázisú ötvözetek (α-ötvözetek) Al-tartalma 8%-ig terjed, ezek jól alakíthatók hidegalakítással.

* *MSZ EN ISO 6509:2000 Fémek és ötvözetek korróziója. A réz-cink ötvözetek cinktelenedésével szembeni ellenállás meghatározása (ISO 6509:1981)*

A kétfázisú ötvözetekben ($\alpha+\gamma_2$) a γ_2-fázis növeli a szilárdságot, de korlátozza a hidegalakíthatóságot. Mivel a γ_2-fázis 565°C-on jön létre a csak e felett létező β-fázis eutektoidos bomlásával, az említett hőmérséklet felett az ötvözetek nagyon jól alakíthatók. Ha a lehűtés nem kellően lassú, a β-fázis egy része nem tud átalakulni $\alpha+\gamma_2$ fázissá. Gyors hűtés, vagyis edzés alkalmával – hasonlóan az acélokhoz – a martenzites átalakulással martenzites β'-fázis jöhet létre, amely megeresztéssel átalakítható (ez a hőkezelés azonban meglehetősen ritka).

– Ötvözött kuproalumíniumok

Az egyfázisú ötvözetekben vassal vagy nikkellel – CuAl7Fe2,5 és CuAl6Ni2 – növelik a szilárdságot; ebből az anyagból verték egykoron több országban is a váltópénzeket.

A többfázisú ötvözetekben vas, nikkel és mangán az ötvöző, amelyek a szilárdság növelése mellett a korrózióállóságot is növelik, és hajócsavarok, turbinalapátok anyagaként szolgálnak. A jó hőátadási és hővezetési tulajdonságok miatt hőcserélőcsövek és hőcserélőlemezek anyagai is lehetnek. Mechanikai tulajdonságaikat a 12-4. táblázat foglalja össze.

Ötvözet	Állapot	R_m (MPa)	A (%)
CuAl6	Lágyított	340–400	60–70
CuAl6	Keményített	450–550	10–35
CuAl8Ni4Fe2	Megeresztett	630–750	15-30

12-4. táblázat: Az alumíniumbronzok szakítószilárdsága és nyúlása különféle hidegalakítási állapotban

12.3.5. A nikkelbronzok / kupronikkelek

A réz és a nikkel tetszőleges koncentrációban képesek oldani egymást. Különösen előnyösen alkalmazhatók olyan berendezések anyagaként, amelyek nagy sebességgel áramló tengervíz hatásának vannak kitéve. Az ipari ötvözetek a két fő alkotóelem, a Cu és a Ni mellett néhány százalék vasat és mangánt is tartalmaznak. A hengerelt lemezek, szalagok általános célra, a csövek pedig főként hőcserélőkben kerülnek felhasználásra.

A villamosipari alkalmazásokban kerül felhasználásra a „konstantán" elnevezésű, 40–45% nikkelt tartalmazó ötvözet, amelynek fő jellegzetessége, hogy a villamos ellenállása nem változik a növekvő hőmérséklettel sem.

– Az alpakka (Cu-Ni-Zn ötvözetek)

Tulajdonságai a sárgarezek és a kupronikkelek közé esnek. Kétféle csoportjuk terjedt el:

- Jól alakítható, egyfázisú ötvözetek.
- Melegalakítható és jól forgácsolható, kétfázisú ötvözetek.

A klasszikus összetételeket a CuZn28Ni9, a CuZn27Ni18, a CuZn45Ni9 és a CuNi26Zn17 ötvözetek képviselik.

12.3.6. Egyéb rézötvözetek

– Szilíciumbronzok / kuproszilíciumok

Legelterjedtebb típusaik a CuSi3Mn és a CuSi2Al2,5, amelyeknek a jó a súrlódási jellemzőjük és szilárdságuk korrózióállósággal párosul.

– Ólombronzok / kuproólmok

CuPb8, CuPb15, CuPb20, CuPb30, a jó siklási tulajdonságaik miatt használják őket csapágyperselyek anyagaként.

12.3.7. Alakemlékező rézötvözetek

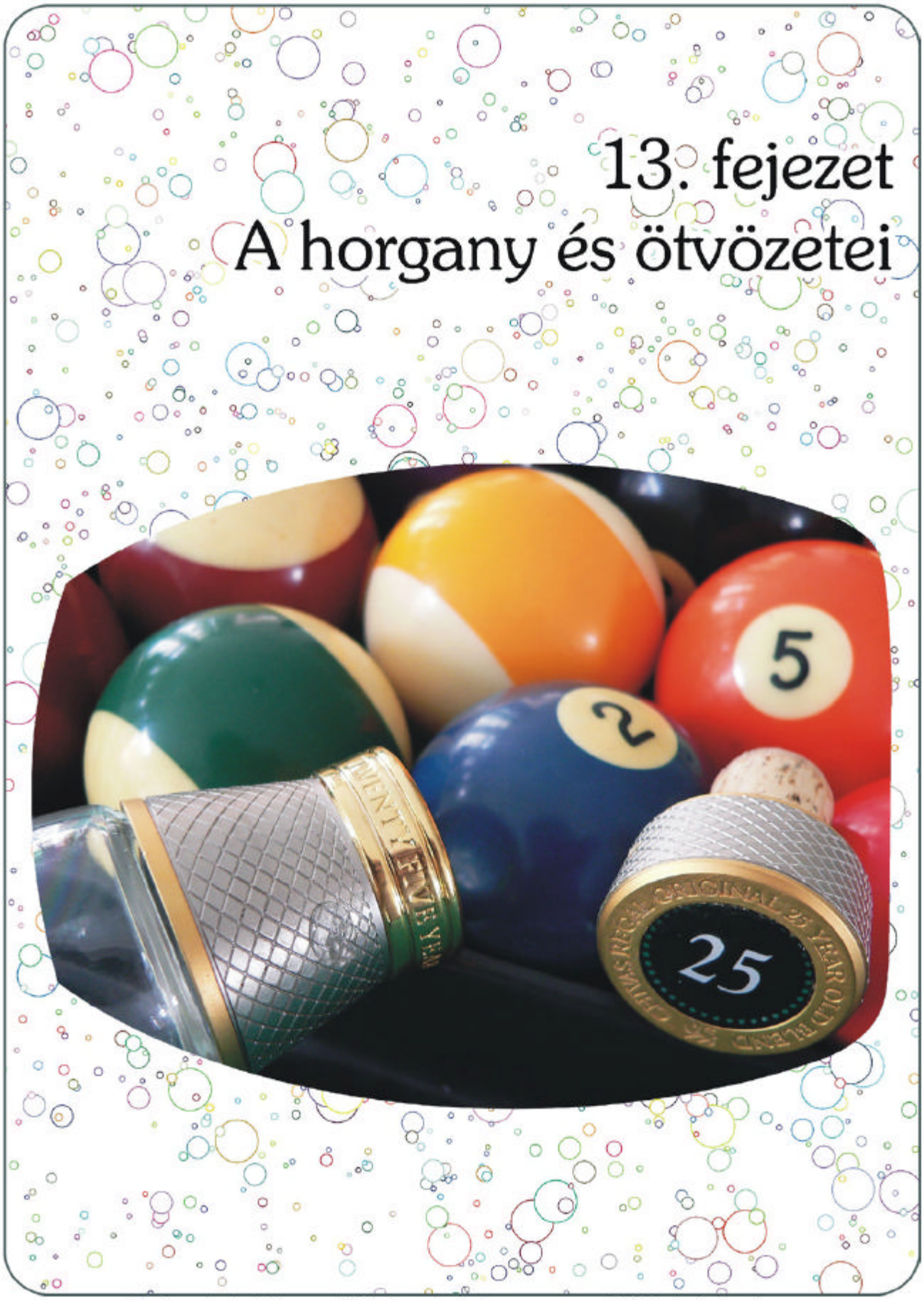
Sajátosságuk a termoelasztikus jellegű és reverzibilis martenzites átalakulás; eme ötvözeteknél is beszélünk ausztenites és a martenzites fázisról, melyek között az egyensúly eltolódhat mindkét fázis irányába a hőmérséklet és a belső feszültség változásával. A fázisátalakulásnak van egy termikus hiszterézise mind a hevítés, mind a hűtés során, amely kb. 40–60°C (a rézalapú alakemlékező ötvözeteknél).

Amikor egy alakemlékező ötvözetből készült alkatrészt a martenzites állapotában alakítanak, később visszanyeri eredeti alakját, ha az ausztenites fázis stabilitásának hőmérsékletére hevítik. Ez az ún. *egyutas alakmemória* jelensége.

Két fő, Cu-alapú alakemlékező ötvözetcsoport ismeretes: a Cu-Zn-Al és a Cu-Zn-Ni ötvözetek, amelyek valójában a sárgarezek közé sorolhatók. Az alakemlékező sárgarezeknél a reverzibilis ausztenit ↔ martenzit átalakulás fázisátalakulási hőmérséklete –100 és +170°C között változtatható az ötvözőtartalommal. Az ausztenites fázis martenzitessé való átalakulását nemcsak termikus hatás (hűtés) idézheti elő, hanem – jellemzően ikresedéssel végbemenő – alakváltozás is.

Amikor csak a hevítés / hűtés okozta alakváltozás jelentkezik – amely nem tévesztendő össze a hőtágulással –, akkor beszélünk *a kétutas alakmemória* jelenségről. Ennek a „képességnek" a működéséhez az anyagot „be kell tanítani". Ezt követően (elméletileg) végtelen sokszor képes az anyag a betanítási hőmérsékleteken megszabott alakját felvenni pusztán a hőmérséklet-változás hatására. Az alakemlékező ötvözetek alkalmazásairól és további jellegzetességeiről lásd a 16.8. fejezetet.

13. fejezet
A horgany és ötvözetei



25 éves ital tárolására szolgáló italos palack horganyötvözetből készült zárószerkezete

13. A horgany és ötvözetei

A horgany (cink, Zn) legfontosabb fizikai tulajdonságai szobahőmérsékleten:

- Olvadáspont: 419°C.
- Párolgási hőmérséklet: 906°C.
- Sűrűség: 7133 kg/m^3.
- Hőtágulási együttható: 29,1·10^{-6} 1/K.
- Hővezetési tényező: 113 W/(m·K).
- Fajlagos ellenállás: 5,916·10^{-6} Ω·cm.
- Young-modulus: 93 GPa.

13.1. A cink

Az ipari felhasználásra gyártott elsődleges – vagyis ércéből előállított – cinket a tisztasága szerint öt típusba sorolja be a vonatkozó szabvány*. A Z1…Z5 jelölésű típusok a tisztaságukban térnek el egymástól: a Z5-ös cink névleges tisztasága 98,5%, a Z1-esé 99,995%. A fő szennyező az ólom, a többi (Cd, Fe, Sn, Cu, Al) mennyisége döntően néhány ezred százalékban van korlátozva. A szennyezőtartalom ilyen szigorú korlátozását a korrózióállóság fenntartása indokolja.

A tiszta vagy másként ipari cink felhasználását az alábbi tulajdonságai határozzák meg.

- A felületén kialakuló cink-karbonát védőréteg által biztosított korrózióállósága.
- Az elektrokémiai tulajdonságai, melyek révén alkalmas a más fémekből készült szerkezetek korrózió elleni védelmét lehetővé tenni.

A korrózió elleni védelmi szerepét gyakran segédanódként („áldozati” anód) látja el, de a legfőbb alkalmazásában horganybevonatként kerül az ötvözetlen acél alapanyagok felületére, tűzi mártó horganyzással.

A mechanikai tulajdonságait tekintve jelentősen javítja a cink szilárdságát néhány tized százalék Cu vagy Ti, amelyek szilárdoldatos keményedést és szemcsefinomodást okoznak; folyáshatára ekkor legalább 110 MPa. Az ötvözetlen cink szakítószilárdsága 110–140 MPa, nyúlása 50–60%. Már 100°C feletti hőmérsékleten jelentkezik a kúszás.

13.2. A Zn-ötvözetek

A horgany mint szerkezeti anyag viszonylag kevéssé ismert. Ugyanakkor meglepően széles az az alkalmazási terület, amelyen nem csak létjogosultságot, de jelentős szerepet és elfogadottságot is kivívott magának. Talán leggyakoribb feldolgozási módjának az öntés számít, szemben a jóval elterjedtebb szerkezeti anyagoknál megfigyeltekkel, ahol az öntészet általában nem elsődleges feldolgozási mód. Az öntészeti szakma egyik különleges ágazatának számít a horganyöntészet.

A horganyöntészetben szinte minden technológiai vonulat jelen van, és az öntészeti technológia fejlődésének eredményei azonnal megjelennek. Ennek megfelelően az öntészeti és az ahhoz kapcsolódó technológiáknak egyaránt meghatározó a szerepe a cink feldolgozásában.

- Gyorsprototípus-gyártás (homokformába öntés + forgácsolás).
- Kis sorozatok gyártása (kokillaöntés).
- Nagy sorozatok gyártása (nyomásos öntés).
- Felületkezelés (tűzi mártó horganyzás).

Ha arra a kérdésre keressük a választ, hogy mivel magyarázható a Zn-ötvözetek kiterjedt öntészeti alkalmazása, a válasz kézenfekvő: kedvezőek a mechanikai és fizikai tulajdonságaik, és kiemelkedően jó az önthetőségük, amely lehetővé teszi, hogy akár a legbonyolultabb formájú, finom részleteket és egészen vékony falakat is tartalmazó termékeket hozzanak létre belőlük.

Az öntészeti Zn-ötvözetek** családjának szabványos tagjaira vonatkozó jelölések a 13-1. táblázatban láthatók.

ZnAl4	ZL0400	ZL3	ZP0400	ZP3
ZnAl4Cu1	ZL0410	ZL5	ZP0410	ZP5
ZnAl4Cu3	ZL0430	ZL2	ZP0430	ZP2
ZnAl6Cu1	ZL0610	ZL6	ZP0610	ZP6
ZnAl8Cu1	ZL0810	ZL8	ZP0810	ZP8
ZnAl11Cu1	ZL1110	ZL12	ZP1110	ZP12
ZnAl27Cu2	ZL2720	ZL27	ZP2720	ZP27
ZnCu1CrTi	ZL0010	ZL16	ZP0010	ZP16

13-1. táblázat: A horganyötvözetek szabványos típusai

A horganyötvözeteket összetételi rendszerük szerint csoportosítva is áttekintjük röviden. A fő ötvöző az alumínium, amelynek kb. 5%-os mennyiségénél képződik a Zn-Al rendszerben az eutektikum, de használnak más ötvözeteket is.

* *MSZ EN 1179:2003 Cink és cinkötvözetek. Elsődleges cink. MSZ EN 13283:2003 Cink és cinkötvözetek. Másodlagos cink*

** *MSZ EN 1774:1999 Cink és cinkötvözetek. /…/ Tömb és olvadék. & MSZ EN 12844:1999 /…/ Öntvények. Követelmények*

– **Hipoeutektikus Zn-Al ötvözetek, Al = 4%**
- Az 1930-as években fejlesztették ki az első, hipoeutektikus ötvözeteket, elterjedt nevükön *Zamak-ötvözeteket*. A 4% alumíniummal (ZnAl4) és a még 1% Cu-zel is ötvözött típus (ZnAl4Cu1) főként olyan alkatrészek alapanyaga, amelyek precíziós öntéssel készülnek.
- A 4% Al mellett 3% rezet (ZnAl4Cu3) is tartalmazó *Kayem-ötvözetek* jóval keményebbek, a koptatóhatásoknak jobban ellenállnak. Fő alkalmazási területüket a műanyagok takarékos megmunkálószerszámai jelentik: kivágó- és mélyhúzószerszámok, nyomásos öntés).

– **Hipereutektikus Zn-Al ötvözetek, Al=6–12%**

Az alumíniumtartalom növelése mellett további ötvözők is módosítják a horganyötvözetek tulajdonságait.
- Az 1950-es években fejlesztették ki a 6–8% Al-tartalmú, hipereutektikus Zamak-ötvözeteket: kopásállóságuk és hőállóságuk kiváló.
- A *TONSUL-ötvözet*, amely az előzőtől a Mg-mal való ötvözése tekintetében tér el, és elsősorban ékszerek, bizsuk alapanyaga.
- A 12% Al- és 1% Cu-tartalmú ötvözetek (*ILZRO 12)* nagyméretű termékek gravitációs öntésére szolgálnak, pl. irodai székek lába.

– **Hipereutektoidos ötvözetek, Al = 26–35%**

Az Al-tartalom növelése 27%-ra, sőt, 35%-ra erősen növeli a szilárdságot: a folyáshatár a 400 MPa-t is elérheti. Az öntvények porózus felülete kedvező kenőolaj-tárolási szerepet tölt be a súrlódásos kapcsolatok alkatrészeinél.

– **Alumíniummentes Zn-Cu-Ti ötvözetek**
- Zn-Cu ötvözetek
  Építőipari szerkezetek öntött alkatrészei, pénzérmék és mélyhúzószerszámok anyaga lehet.
- Zn-Cu-Ti és Zn-Cu-Cr-Ti ötvözetek
  A ZnCu1CrTi vagy *ILZRO 16* ötvözet* növelt hőmérsékleten nagy terhelésnek kitett, nagy, homokformaöntésű alkatrészek anyaga, folyáshatára 300 MPa. Tetőszerkezetek, ereszcsatornák, napenergiagyűjtők anyaga lehet.
- Zn-Pb-Cd-Fe ötvözet
  A hagyományos Leclanché-féle szárazelemek cinkhengere készül belőle, de mélyhúzó szerszámok anyagaként is ismert.

Az említett fő ötvözők mellett a cinkötvözetek szabványai a szennyezők – Pb, Cd, Sn, Fe, Ni, Si, Ta, In és Mn – megengedett értékére is szigorú korlátokat szabnak.

A mechanikai tulajdonságok között a szilárdság eléri az ötvözetlen acélokét, egyes típusok pedig meglepően nagy nyomószilárdsággal (600 MPa) és kifáradási határral (140 MPa) bírnak. Az ötvözetek nyúlása viszont alig éri el a 10%-ot, különösen öntött állapotban. Érdekes, hogy az öntést követően, 1–2 év alatt lezajló öregedési folyamatban a szilárdság akár 25%-kal is csökkenhet; ez is magyarázza, hogy miért oly kevéssé tartósak az olcsó „spiáter" anyagú termékek.

A Zn-ötvözetek kiváló öntészeti tulajdonságaihoz a kis olvadáspont és a zömüknél kicsi dermedési hőköz mellett még az is hozzájárul, hogy a mérettartomány széles, a termékek gazdaságosan állíthatók elő, és az alapanyag alkalmas a legtöbb öntési technológiával való feldolgozásra. A nyomásos öntés és a precíziós öntés a legelterjedtebb a Zn-ötvözetek öntészetében, az ötvözetek között pedig a Zn-Al ötvözetek, amelyeket széles körben használnak nagymerevségű írógépházak, számítógépházak, telefonkészülékek anyagaként.

13.3. Alkalmazási példák

A horganyötvözetek kiváló adaptációs képességük folytán széles felhasználói körben terjedtek el, pl. autóipar, épületszerelvények, háztartási eszközök, gázhálózati szerelvények, villamos és elektronikai ipar, luxuscikkek gyártása stb.

– **Prototípusgyártás**

A prototípusok Zn-ötvözetből való gyártásának két indoka lehet: A) Lehetővé teszi, hogy optimális feltételekkel készítsék el és tegyék vizsgálhatóvá a nagy sorozatban gyártandó alkatrészeket. B) Alkalmas arra, hogy kielégítsék az egyedi, kis darabszámú igényeket. A horganyötvözet prototípusok gyártását az öntés mellett forgácsolással is végzik. Az egyszerűsített, néhány ezer besajtolási élettartamú szerszámban nyomásos öntéssel készülő prototípusokkal megvalósul a „valódi technológia – valódi anyag" elv. Előnyös, hogy az így készült prototípusok nem csak esztétikai és méretellenőrzésnek vethetők alá, hanem mindenféle mechanikai vizsgálat is elvégezhető rajtuk.

– **A Kayem-ötvözetek alkalmazása**

Az űrtechnikától az autóiparig alkalmazzák könnyűfém-, sárgaréz-, acél- és műanyaglemezek mélyhúzó-, hajlító- és kivágószerszámainak anyagaként. A szerszámok gravitációs öntéssel készülnek. A Kayem-ötvözetek gazdaságosságát a következő tényezők adják: élettartam, méretpontosság, felületi állapot, gyors legyárthatóság, amelyek optimuma a kis és közepes sorozatban ké-

* *ILZRO = International Lead-Zinc Research Organization*

szülő alkatrészeknél jelentkezik. Ugyancsak kedvezők a Kayemek súrlódási és kopási tulajdonságai, a hővezető képessége, a szabad ég alatti tárolás lehetősége és az egyszerű újra- feldolgozhatóság. A nagyobb mechanikai igénybevételnek kitett szerszámrészeket szerszámacélból készítik.

A kiváló önthetőség azt jelenti, hogy a legfinomabb részletek is tökéletesen kialakulnak a formában, a dermedéskor fellépő deformációk csekélyek, ami csökkenti vagy elhagyhatóvá is teszi az utómunkálatokat. Könnyűszerrel lehetséges vegyes anyagú (Kayem + acél) szerszámokat is készíteni, amikor a matrica vagy a bélyeg anyaga acél. A Kayem-ötvözetből készített szerszámok az önkenő jellegük miatt szorosan illeszthetők.

– **Luxuscikkek horganyöntvényekből**

Akadnak olyan luxuscikkek, pl. parfümös üvegek, illatosító készletek, italosüveg-dugók, amelyek horganyötvözetből készülnek precíziós öntéssel, és több érdekességet is mutatnak:

- különleges és bonyolult formák önthetők,
- a nehéz fémes anyag „tömeghatást” kelt,
- cink, műanyag és üveg összekombinálható,
- fényes és matt aranyozást is tartalmazhatnak.

A márkás italok üvegeinek esztétikus, luxushatást keltő zárókupakjait (pl. a fejezetcímlapon) gyakran készítik nyomásos öntéssel. Öntés után ragasztással összeszerelik a parafa béléssel. Az öntést 2–16 kamrás szerszámban végzik, attól függően, hogy mekkora a szükséges darabszám. A feliratok, vésetek természetesen már az öntőformában kialakulnak. A felületet polírozással finomítják. Az arany-, ezüst- stb. díszítés galvanizálással, PVD-eljárással vagy lakkozással készülhet.

A felső kategóriás személygépkocsik egyik lényeges különbsége a tömegautókhoz viszonyítva, hogy a luxuskategóriában nem takarékoskodnak az anyagválasztásnál. Nemcsak a kárpit bőr, de itt nem mellőzik a rozsdamentes acélt, az alakemlékező ötvözeteket stb. A kilincs készülhet ZP3 ötvözetből precíziós öntéssel. A homyok belemarása után kromátozással, majd „lágy” festékkel nyeri el végső, „bőrhatású” felületi minőségét.

– **Működtető-, rögzítő- és zárószerkezetek**

Röntgencsőfoglalatok: Fogászati berendezések röntgencsöveinek foglalata ZP5 ötvözetből készül. Az anyagválasztást a szilárdság mellett a következő tényezők indokolják: nagy atomtömeg a röntgensugár-elnyelés miatt, jó tömítési jellemzők, kataforézissel való feketíthetőség.

Jegykezelő automata: A tömegközlekedési eszközökön működő jegykezelő automaták szerkezetének fődarabjai gyakran horganyöntvények. Nagy méretpontosságú alkatrészekről lévén szó (0,03–0,05 mm-es tűrés), vákuumos öntéssel készítik őket, s ennek révén nincs szükség utólagos forgácsoló megmunkálásra.

Ugyancsak szigorú tűrésekkel készülő gyártmányok a tehergépkocsik fékszelepházai (ZL5).

Önmetsző rögzítőcsapokat fejlesztettek ki gipszkarton válaszfalak, burkolatok és álmennyezet rögzítésére. A Zn-ötvözet szilárdsága jó, a becsavaráskor biztonságosan ellenáll a törésnek. A kedvező korróziós tulajdonságok miatt nem kell tartani semmilyen elszíneződéstől, rozsdásodástól, amely az acélnál felléphet. A precíziós öntés gazdaságos gyártást tesz lehetővé nagy sorozatban.

Ablaknyitó szerkezet: A fából, műanyagból készült ablakkeretek nyitó-záró szerkezete is gyakran készül horganyötvözetből. Számos apró alkatrészt tartalmaznak, amelyek szilárdsága és kopásállósága is kedvező. A teljesen acélból készülő szerkezetekhez képest 30%-os méretcsökkenést lehet elérni a Zn-ötvözetekkel, ami igen előnyös az ablakkeretekbe munkálandó fészkek készítésekor.

Kábeltoldó saru: Az optikai kábelek toldásakor egyedi tartókészülékben rögzítik a kábelvégeket. A kábelsaruk anyagaként használják a Zn-ötvözeteket. A szilárdság, a méretpontosság és a jó forgácsolhatóság leglényegesebb tulajdonság.

Telefonkészülék-ház: A köztéri telefonkészülékek vandálbiztos (vagyis dühöngőknek ellenálló) fajtáit horganyötvözetből öntik. A legvékonyabb falak vastagsága alig éri el az 1 mm-t. A prototípusai homokformázással készülnek ZP12 ötvözetből, a sorozatgyártás precíziós öntéssel zajlik. Zajmentes számítógépházak és strapabíró egerek is készülnek horganyból.

Szekrényzárak és kulcsok: Háztartási és irodai ajtók, szekrények, fiókok, postaládák, számítógépek, bőröndök számkódos záraiban a nyitó-záró szerkezet, a foglalat és a kulcsok gyakori anyagai a horganyötvözetek; felületük lehet nyers vagy nikkelezett, krómozott, rezezett.

– **Húzózár (cipzár)**

Kevés olyan öntészeti termék van, amelyet ennyire sokan használnak – és ennyire nem tudják róla, hogy miből is készül. A csúszkatest, a kengyel és a fogazat horganyötvözetből készül. Az automatikus összeszerelés miatt a mérettűrései 0,05 mm-esek. Az öntvénynek a könnyű mozgathatóság miatt nagyon finom felületűnek kell lennie a belső lapokon is. Alkalmazási példák láthatók a 13-1–13.4. ábra fényképein.

13-1. ábra – Vandálbiztos köztéri telefonkészülék

13-3. ábra – A Budapesten 1893 és 2003 között működött Perion Akkumulátorgyár egy „góliát" szárazeleme, valamint a „laposelem" szén–cink cellái; a sárgaréz kivezetéseket forrasztott kötés rögzíti a hátrafolyatással gyártott cinkhengerhez

13-2. ábra – Zárbetétek, kulcsok és asztaldísz, valamint húzózárcsúszka

13-4. ábra – Horganyzott kerítésoszlop, vizesvödör és elkorrodálódott horganyzott csavar

14. fejezet
A magnézium és ötvözetei

Az 1783. november 21-én felemelkedett első légi jármű Le Campion metszetén

14. A magnézium és ötvözetei

14.1. A magnézium tulajdonságai

A 12-és rendszámú magnézium ezüstfehér színű, lágy fém. Sikerét annak köszönheti, hogy a fémes szerkezeti anyagok között a legkönnyebb. Az alumíniumnál is jóval kisebb a sűrűsége, mindössze 1,738 g.cm^{-3}. Kristályszerkezete sűrű illeszkedésű hexagonális (HCP).

A forráspontja 1090°C, az olvadáspontja 648,8°C, amely hőmérsékleten már kisvákuumban is szublimál. Ez a jellegzetessége jól hasznosítható a tiszta fém gyártására irányuló kohászati folyamatokban, de a Mg és ötvözeteinek vákuumos olvasztását lehetetlenné teszi.

Hőtágulási együtthatója 29,9·10^{-6} 1/K: ez az alumíniuménál is nagyobb, vagyis jelentős zsugorodásokkal kell számolni az öntészeti alkalmazásokban. 155 W/(m·K) értékű hővezetési tényezője nem sokkal marad el az alumíniumétól (237), és a 4,46·10^{-3} Ω·cm-es fajlagos ellenállása is hasonló mértékben rosszabb (tehát nagyobb).

Kémiai tulajdonságait tekintve, a tiszta magnézium oxidációja szobahőmérsékleten lassú. Oxidja, az MgO nagyon stabil, száraz atmoszférában 450°C-ig jól védő felületi réteget alkot. A nedvesség azonban nagyon előnytelenül befolyásolja a korróziós viselkedést. Levegőn való égése csak az olvadáspont (egyes esetekben pedig 310°C) felett lehetséges, viszont ott nagyon heves. A nitrogénnel kedvezőtlen hatású nitridet (Mg_3N_2) formál, ezért az öntészeti alkalmazásokban ezt a gázt is ki kell zárni az olvadék környezetéből.

A fémmagnézium mechanikai tulajdonságai a színfémek között közepesnek nevezhetők: Young-modulusa 47 GPa, folyáshatára kb. 50 MPa, szakítószilárdsága 200 MPa, nyúlása 10%. Természetesen, az ötvözők jelentősen befolyásolják ezeket a jellemzőket.

A magnézium históriájában az első fontos állomás a magnézium felfedezése, amely *Humphrey Davy* (1778–1829) angol kémikus nevéhez fűződik 1808–ban. Kézzel fogható mennyiségű fémként 1831-ben sikerült előállítani (*Antoine Alexandre Brutus Bussy*) a földkéreg nyolcadik leggyakoribb elemét.

Ipari előállításának első módszerét *Henry Sainte-Claire Deville* és *Henry Caron* dolgozta ki (1857). Egy véletlen folytán észrevették a magnézium pirotechnikai alkalmazásának lehetőségét, s így az 1862-ben megrendezett londoni világkiállítás óta az attrakciók közé tartozik.

– A magnézium piaca

A második ezredforduló táján jelentős átalakulások zajlottak le a magnéziumtermelésben. Az USA-ban töredékére zuhant az elsődleges magnézium termelése, de eközben a világ legnagyobb újrafeldolgozója lett. Kína viszont szinte a nulláról indulva egyeduralkodó lett: a világtermelésnek már több mint a felét adja. A kereslet erőteljes növekedése miatt új gyártókapacitások épültek Kínában, Ausztráliában, Kanadában, Izlandon és Kongóban. A magnézium ára az elmúlt években folyamatosan 2000 USD/tonna körül mozgott. A kínai termelés felfutása a növekvő nyugati kereslet mellett is jelentős árcsökkenésre vezetett.

14.2. A magnézium felhasználása

A megtermelt mennyiség felhasználása terén a következőképpen alakult a fogyasztói szektorok megoszlása 2002-ben.

- 40% az alumíniumötvözetek gyártása,
- 35% a nyomásos öntés,
- 16% jut az acélgyártásra (kéntelenítés),
- 9% az egyéb területeknek (pl. segédanódos korrózióvédelem, öntöttvasgyártás, Ti- és Zr-gyártás stb.).

A felhasználásban a Föld régióit tekintve az USA és Kanada használja fel az összfogyasztás 49%-át, Európa a harmadát, Ázsia és Óceánia pedig 14%-ot. A továbbiakban – a teljesség igénye nélkül – bemutatunk néhányat a fontosabb és érdekesebb alkalmazási területek közül.

14.2.1. Autóipari alkalmazások

Gyorsan növekedik tehát az öntészeti felhasználás, amely a járműgyártás és az informatikai ipar radikális változásaival függ össze. Nagy előnyt jelent a kiváló önthetőség, hiszen öntéssel nagyon vékony falvastagságok is elérhetők. A magnézium szinte végleges alakra önthető, így nem igényel különösebb utómegmunkálást sem. A termelékenység növekszik, a termék előállítási költsége pedig csökken. Az autóiparban már az 1930-as évek közepén kezdték jelentősebb mennyiségben használni a magnéziumötvözeteket: *Ferdinand Porsche* 1934-ben kb. 25 kg magnéziumötvényt tervezett a Volkswagen kardántengelyházba és a léghűtéses motorokba (a Mercedes történetírói pedig 1900-ra teszik az első, magnéziumból készült motoralkatrészt). Az "egyliteres" tanulmányautóját a Volkswagen 2001-ben gyártotta: tömege 260 kg, ebből 35 kg Mg-ötvözet és Mg-alapú kompozit. Az üléstartókeret és a teljes vázszerkezet magnéziumból készült.

Az utakon futó gépkocsikban is számos Mg-alkatrész található: olajteknő, a VW Golf hajtóműháza, a 3 kg tömegű Mercedes-ajtókeret, kormánykerék-fémváz, féktárcsák stb.

Jelenleg a magnézium átlagos mennyisége egy járműben kb. 2 kg, de a nagy gyártók tanulmányai szerint több mint 100 kg alkatrész potenciálisan kiváltható magnéziummal.

A magnézium is egyike azoknak a szerkezeti anyagoknak, amelyek jövője nagymértékben összefügg az autóipar jövőbeni változásaival. Ugyanakkor meg kell említeni, hogy a túl nagy mennyiségű magnéziumnak lehetnek kedvezőtlen hatásai is: a Firehaus.com internetes portál 2004 decemberében arról számolt be, hogy egy kigyulladt Cherokee Jeepet a tűzoltók vízzel akartak eloltani, de az eredmény hatalmas tűzijáték lett, mivel az égő magnézium a vízzel hevesen reagált.

14.2.2. Repülőgépgyártás, űrkutatás

A második világháború alatt előtérbe került a magnéziumötvözetek alkalmazása a repülőgépgyártásban. Óriási mennyiségű repülőgépet gyártottak a harcoló felek, s ezekben nagy szerepet kaptak a Mg-ötvözetek, amelyek a gépek önsúlyát voltak hivatottak csökkenteni. Magnéziumból készítették mintegy 70 ezer repülőgép egyes hajtóműalkatrészeit és kerekeit. Az amerikai Convair B-36 "Peacemaker" típusú bombázóba darabonként mintegy 10 tonna (!) Mg-ot építettek be.

A második világháború után a magnéziumgyártó ipar hanyatlásnak indult, amelyhez az is hozzájárult, hogy az 1950-és években megjelent a titán, amely ugyan háromszor nehezebb a magnéziumnál, de szilárdsága és korróziós jellemzői a gázturbinás repülőgépek és az űrtechnikai eszközök építésében jó néhány területen „esélyt sem adtak" a magnéziumnak.

Ennek ellenére számos, főleg katonai légi járművet fejlesztettek ki, elsősorban az USA-ban. 1950-ben jelent meg a Westland Aircraft S55 típusú helikoptere, amelynek külső lemezburkolata 115 kg ZW3 típusú Mg-ötvözetet tartalmazott. Az F80C vadászrepülő gyakorlatilag teljesen magnéziumötvözetből készült.

14.2.3. Hőtágulásmentes Mg-kompozitok

Az űrtechnikai eszközök esetében mindent elkövetnek a fellövési tömeg csökkentésére. Mg-ötvözetből (AZ31, azaz Mg-3%Al-1%Zn), ill. Mg-mátrixú kompozitból kis tartóelemeket, tükröket, zérus hőtágulású műszeralkatrészeket készítenek. E téren igen hasznos, hogy a kompozitok erősítőanyagaként használt szénszálat viszonylag jól nedvesíti a Mg-olvadék (ami nem mondható el az alumíniumról). Érdekes módon a Mg/C-kompozitok sűrűsége nagyobb, mint a fémmagnéziumé. Az Mg/C-kompozit anyagú szerkezetek esetén akár nulla is lehet az axiális irányú hőtágulás és mintegy 2 ppm/K a transzverzális irányú. Emellett ennek az anyagnak a fajlagos merevsége másfélszerese a berilliuméának, és 9,5-szöröse az Invar-36 ötvözetének. E különleges hőtágulási tulajdonság nagyon fontos, hiszen az űreszközök több száz fokos hőingadozásnak vannak kitéve a napsugárzás miatt.

14.3. A magnéziumötvözetek

A magnéziumötvözeteket rendeltetésük szerint a következőképpen oszthatjuk fel:

- Öntészeti ötvözetek (két alcsoport)
  - – Jól önthető ötvözetek.
  - – Mg-Al-Zn ötvözetek.
- Alakítható ötvözetek (hat alcsoport)
  - – Al-Zn ötvözésű ötvözetek.
  - – Mn-ötvözésű ötvözetek.
  - – Zr-ötvözésű, Th-mentes ötvözetek.
  - – Zr-Th ötvözésű ötvözetek.
  - – Ritkaföldfém-tartalmú ötvözetek.
  - – Li-ötvözésű ötvözetek.

A magnézium fő ötvözőit és azoknak a tulajdonságokra gyakorolt hatását a következők szerint lehet összegezni:

Ittrium (Y) – növeli a szilárdságot, 250–300°C-ig biztosítja a melegszilárdságot, javítja a korrózióállóságot.

Ritkaföldfémek (RE) – Az „RE" gyűjtőjellel jelölt elemek a ritkaföldfémek. Szorosan véve a 14 lantanoida és a lantán tartozik ide, de gyakran ide sorolják a lantán „felső" szomszédjait, a Sc-ot és az Y-ot is. Ezek javítják az öntészeti jellemzőket, a korrózióval szembeni ellenállást, növelik a szilárdságot és a kúszáshatárt, 250°C-ig a melegszilárdságot (főleg a Nd) és csökkentik az öntvények mikroporozitását.

Cirkónium (Zr) – Növeli a szilárdságot, javítja az önthetőséget, a rezgésekkel szembeni ellenállást, szemcsefinomító hatású.

Tórium (Th) – 350°C-ig biztosítja a kúszásállóságot, csökkenti a ridegséget és a mikroporozitási hajlamot (főleg a Zn-tartalmú ötvözetekben).

Cink (Zn) – Növeli a szilárdságot és csökkenti a képlékenységet, szemcsefinomító hatású, javítja az önthetőséget, 5,5% feletti mennyiségben csökkenti a mikroporozitást.

14.4. Öntészeti ötvözetek

14.4.1. Jól önthető ötvözetek

Az alaptípusok 0,6–0,7% Zr-ot tartalmaznak, s egyben jól hegeszthetők. A Zr miatt egyes ötvözők nem vihetők be a rendszerbe, mivel azokkal a Zr káros hatású intermetallikus fázisokat képez. A tilalmas ötvözők: Al, Si, Fe, Mn, Co, Ni, Sb, Sn.

– Mg-Zr-Zn-RE ötvözetek

Nagyon bonyolult alkatrészek gyártására is alkalmasak. A ritkaföldfémek miatt kicsi az eutektikus hőmérséklet, s ez a porozitás ellen is kedvezően hat. A legismertebb ebben a kategóriában az RZ5 típus. Az RZ5 ötvözet névleges kémiai összetétele: Mg, 3,5–5,0% Zn, 0,4–1,0% Zr, 0,8–1,7% RE. Az európai szabványok* a ritkaföldfémekre nézve ezt a csoportot „Ce-ban dús" jelzővel illetik. Egyre kevésbé használják a RE-mentes típusokat (pl. ZK51), mivel azoknak rossz az önthetőségük és a hegeszthetőségük.

– Mg-Zr-Ag-RE ötvözetek

Az ismételt hőterhelések sem rontják a mechanikai tulajdonságokat 200°C-ig. A legelterjedtebb típus a MSR-B, amely 2,5% ezüstöt tartalmaz. Költségkímélési céllal kidolgozták az 1,5% Ag és 0,07% Cu-ötvözésű típust (EQ21). Az ezüst miatt ezek a típusok érzékenyek a korrózióra, felhasználásuk csak felületkezelt állapotban lehetséges. A ritkaföldfémek közül ebben a csoportban a Nd jellemző ötvöző.

– Th-tartalmú ötvözetek

A kb. 2%-ig menő Th-ötvözés mellett a Zn-tartalom 6%-ig növelhető a mikroporozitás veszélye nélkül. A HZ32 ötvözet 2,5–4,0% tóriumot tartalmaz, a ZH62 ötvözet pedig 1,5–2,2%-ot. A termikus fáradásnak és a kúszásnak jól ellenálló termékek alapanyagaként használják, homokformába is jól önthető. Fő alkalmazási területük a repülőgép-hajtóművek egyes alkatrészei, ahol az Al- és a Ti-ötvözeteket képesek kiváltani. A radioaktivitás miatt különleges megmunkálást igényelnek, ezért az ittriumos típusokkal váltják fel őket. A tóriumos típusok a radioaktivitásuk miatt nem is szerepelnek az EU öntészeti ötvözeteket tartalmazó szabványaiban.

– Mg-Zr-Y-RE ötvözetek

A brit Magnesium Elektron Ltd. (MEL) fejlesztése: nagyon jó a korróziós ellenállása, eléri jó néhány alumíniumötvözetét. Kedvező mechanikai tulajdonságai az ötvözőkön kívül az extra kis szennyezőtartalomnak köszönhetők. A Nd és a „nehéz" ritkaföldfémek a jellemző ötvözők. Az ittrium (amelynek oldhatósága 11,5 tömeg% és nagyon megdrágítja a termékeket) 250–300°C-ig biztosítja az alkalmazhatóságot.

Az autóipar elsősorban az 5,2Y-1,8RF-0,5Zr-1,8Nd összetételű, WE54-es típust alkalmazza, amely 1000 órát meg nem haladó ideig akár 350°C-on is használható. A nagyobb szívósságú, 250°C-on 5000 óra kúszási élettartamú WE43 típust (4,0Y-1,8RF-0,5Zr-2,2Nd) a repülőgépipar és az űrkutatási ipar céljaira fejlesztették ki.

14.4.2. Az Mg-Al-Zn ötvözetek

Az öntészeti magnéziumötvözetek Mg-Zr-Zn-RE csoportjához képest ezeket szélesebb körben használják, mivel jóval olcsóbbak. Összetett formák kitöltésére is alkalmasak, de önthetőségüket erősen meghatározza két körülmény: hajlamosak a mikroporozitásra és érzékenyek a falvastagságváltozásokra. Jellemző öntési technológiájuk a nyomásos öntés. Az olvadék oxidációjának csökkentésére 10 ppm körüli Be-ötvözést alkalmaznak. A klasszikusnak számító ötvözetek nagy tisztaságú változatainál (AZ61, AZ81, AZ91) lényegesen javult a korrózióval szembeni ellenállás. Az alumínium mint fő ötvöző mind az önthetőséget, mind pedig a szilárdságot növeli.

– Mg-Al kétfázisú ötvözetek

Az alumínium maximális oldhatósága 12,7% (437°C-on). A szilárd oldat is legsűrűbb hexagonális (HCP) kristályszerkezetű, mint maga a fém-magnézium. Szobahőmérsékleten azonban az Al oldhatósága 1% alá csökken. A lehűléskor delta- és térközepes köbös (TKK) gamma-fázis ($Mg_{17}Al_{12}$) válik ki. A megszilárdulást az Mg-ban dús dendritek képződése határozza meg; a 2-35. ábrán egy nagy Mg-dendrit látható.

– Mg-Zn kétfázisú ötvözetek

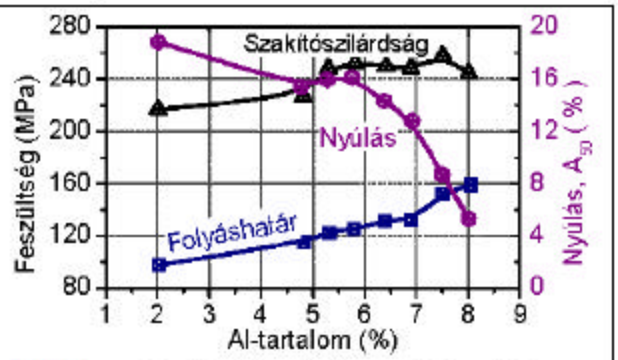
A Zn oldhatósága 6,2% 342°C-on, szobahőmérsékleten 2% alá csökken. A szilárd oldat (alfa) is legsűrűbb hexagonális (HCP) kristályszerkezetű. A horgany kissé javítja a szívósságot, a korrózióállóságot, csökkenti az olvadáspontot és növeli az ömledék hígfolyósságát. A mikroporozitási és a melegrepedési hajlam növelése miatt 3%-ban szokás maximálni a mennyiségét.

---

* MSZ EN 1753:1999 „Magnézium és magnéziumötvözetek. Magnéziumötvözetből gyártott tömbök és öntvények",
MSZ EN 1754:1999 „Magnéziumötvözetből gyártott anódok, tömbök és öntvények. Jelölési rendszer",
MSZ EN 12438:1999 „Magnézium és magnéziumötvözetek. Magnéziumötvözetek öntött anódokhoz"

– **Mn-nal ötvözött Mg-Al-Zn ötvözetek**

A Mn hozzáadása az Mg-Al-Zn rendszerhez nem befolyásolja a mechanikai tulajdonságokat, viszont jelentősen javítja a korrózióállóságot. A Mn megszünteti a Ni és a Fe káros hatását. A mechanikai tulajdonságokat az Al-tartalom határozza meg a 14-1. ábrán látható jelleg szerint. Az Al-Zn ötvözésű Mg-ötvözetek alkalmazási határhőmérséklete nem mehet 120°C fölé. Jellegzetes gyártmány, egy gépkocsi Mg-Al-Mn ötvözet anyagú kormányszerkezeti eleme látható a 14-2. ábrán.



14-1. ábra – Az Al-tartalom hatása az öntészeti Mg-ötvözetek mechanikai tulajdonságaira

14-2. ábra – Kormánytartó szerkezet foglalata

– **Si-tartalmú ötvözetek**

Az AS21 és AS41 ötvözetekben a szilíciumtartalom 1% körüli. A Si a Mg-mal intermetallikus fázist képez, és ezek a kiválások jelentősen javítják a kúszásállóságot.

– **Ritkaföldfém (RE-) tartalmú ötvözetek**

Az AE42 ötvözet 4% alumíniumot és 2% ritkaföldfém-keveréket tartalmaz, amely keveréknek a belső megoszlása: 52–55% Ce, 23–25% La, 16–20% Nd és 5–6% Pr. Ezek az Al-mal Al_2RE és Al_4RE típusú intermetallikus fázisokat képeznek. A gyors hűtéssel gyarapítható utóbbiak különösen erősen gátolják a kúszási mikromechanizmusokat, s így az ötvözet kúszásállósága kivételesen jó.

– **Cu-tartalmú ötvözetek**

A ZC63 (MgZn6Cu3Mn0,5) ötvözet az északamerikai autógyártók kedvelt típusa: motorblokkokat is öntenek belőle.

14.4.3. Az öntészeti ötvözetek tulajdonságai

Az öntészeti Mg-ötvözetekre nagyon sok nemzeti szabvány van érvényben. Gyakori, hogy egy országon belül több szabványrendszer is él; ezek egyike mindig repülőgépipari szabvány. A főbb jelöléseket az 14-1. táblázat tartalmazza. A 14-2. és a 14-3. táblázat tartalmazza a felhasználói szempontból lényeges mechanikai tulajdonságokat a kokillaöntésű és a nyomásos öntésű termékekre. A homokformába öntéssel készült termékek mechanikai tulajdonságai gyakorlatilag megegyeznek a kokillaöntésűekével.

Szembetűnő, hogy a nyúlásértékek nagyon kicsik, de ez természetes következménye a hexagonális kristályszerkezetnek. Meg kell említeni, hogy a Mg-ötvözetek esetében jelentős eltérés mutatkozik a húzó, ill. a nyomó igénybevétel esetén mért szilárdság értékében (a folyáshatárok gyakorlatilag azonosak, de pl. az egyik leggyakoribb ötvözet, az RZ5 típus szakítószilárdsága húzásra > 210 MPa, nyomásra pedig > 330 MPa.

Az öntéssel gyártott alkatrészeket az esetek döntő többségében hőkezelik, ezzel nyerik el a gyártmányok a felhasználó szempontjából jellemző mechanikai tulajdonságaikat (14-3. ábra).

Csoport	Európai Unió		USA
	Hosszú jel	Rövid jel	ASTM
MgAlZn	MBMgAl8Zn1	MB21110	AZ 81
	MBMgAl9Zn1(A)	MB21120	AZ 91
	MBMgAl9Zn1(B)	MB21121	—
MgAlMn	MBMgAl2Mn	MB21210	—
	MBMgAl5Mn	MB21220	—
	MBMgAl6Mn	MB21230	AM 60
MgAlSi	MBMgAl2Si	MB21310	—
	MBMgAl4Si	MB21320	AS 41
MgZnCu	MBMgZn6Cu3Mn	MB32110	ZC 63
MgZnREZr (Ce-dús)	MBMgZn4RE1Zr	MB35110	ZE 41
	MBMgRE3Zn2Zr	MB65120	EZ 33
MgREAgZr (Nd-dús)	MBMgRE2Ag2Zr	MB65210	QE 22
	MBMgRE2Ag1Zr	MB65220	EQ 21
MgREYZr (Nd, Sm, Gd)	MBMgY5RE4Zr	MB95310	WE 54
	MBMgY4RE3Zr	MB95320	WE 43

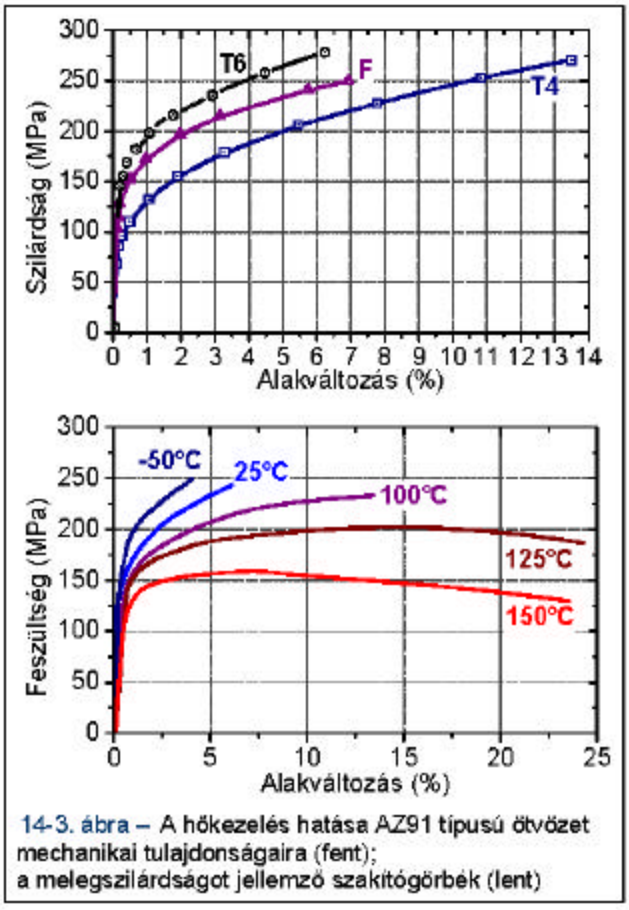
14-1. táblázat: Az öntészeti Mg-ötvözetek jelölései

Csoport	Anyag	Állapot	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A50 (%)
MgAlZn	MB21120	F	> 160	> 110	> 2
		T4	> 240	> 120	> 6
		T6	> 240	> 150	> 2
MgZnCu	MB32110	T6	> 195	> 125	> 2
MgZnREZr	MB35110	T5	> 210	> 135	> 3
	MB65120	T5	> 145	> 100	> 3
MgREAgZr	MB65210	T6	> 240	> 175	> 3
	MB65220	T6	> 240	> 175	> 2
MgYREZr	MB95310	T6	> 250	> 170	> 2
	MB95320	T6	> 220	> 170	> 2

14-2. táblázat: A kokillaöntésű Mg-ötvözetek

Csoport	Anyag	Állapot	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A50 (%)
MgAlZn	MB21120	F	200–260	140–170	1–9
MgAlMn	MB21210	F	150–220	80–100	8–25
	MB21220	F	180–230	110–130	5–20
	MB21230	F	190–250	120–150	4–18
MgAlSi	MB21310	F	170–230	110–130	4–14
	MB21320	F	200–250	120–150	3–12

14-3. táblázat: A nyomásos öntésű Mg-ötvözetek



14-3. ábra – A hőkezelés hatása AZ91 típusú ötvözet mechanikai tulajdonságaira (fent); a melegszilárdságot jellemző szakítógörbék (lent)

A hőkezeléstípusok egyezményes jelölése és jelentése a következő:

- F = öntött állapot, utólagos hőkezelés nélkül,
- T4 = oldó izzítás és természetes öregítés,
- T5 = hűtés + öregítés, túlöregítés (stabilizálás)
- T6 = oldó hőkezelés + a maximális keménységre végzett öregítés.

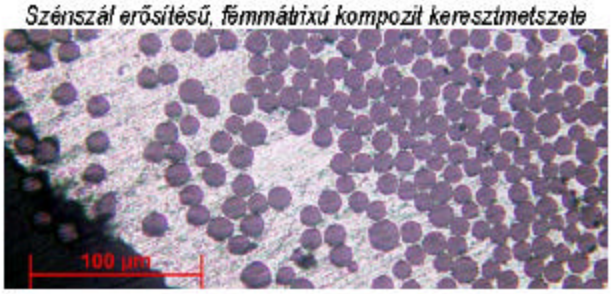
Magnéziumötvözetből készül számos elektronikai berendezés vázszerkezete. Az ilyen videokamerák, fényképezőgépek, hangfaldobozok, számoló és számítógépek, szkennerek, folyadékkristályos monitorok borítása egyetlen, erős magnéziumötvözet vázra van felerősítve, amely teljes védelmet biztosít az elcsavarodás, ütközés és más külső behatások ellen.

– Magnéziummátrixú kompozitok

Az egyre könnyebb, ugyanakkor nagyobb terhelhetőségű sporteszközök – teniszütők, golfütők stb. – iránti igény jelentősen megnövekedett a fogyasztói társadalom kiszélesedésével.

- A teniszütők fejének kerete készülhet magnéziumból, vagy Mg-alapú kompozitból. Az erősítő szénszál növeli a merevséget, ami lényeges szempont az ütés erősségét illetően.
- A jó minőségű görkorcsolyák keréktartó váza magnéziumötvözetből készül.
- A szuperkönnyű orsóval szerelt, lepkéző horgászbotokon a sok bedobás és visszatekerés közben nem elhanyagolható az orsó tömege, valamint a készség kiegyensúlyozottsága.
- A kerékpársport és a kerékpáros közlekedés világszerte nagy népszerűségnek örvend. A könnyű kerékpárok iránti igény világosan érzékelhető. A jó öreg acélvázas bringák vázának tömege 4–5 kg körül mozgott. A nemesíthető Cr-Mo acélból készült korszerű típusoké is csak kivételes esetben megy 3 kg alá. Az alumíniumvázak (a 6061-es ötvözet jellemző) tömege 2,5–3,5 kg. A Mg-ötvözet kerékpárvázak viszont jelentősen csökkentik a lendítőtömeget: 1,2–1,5 kg-ot nyomnak mindössze (14-4. ábra). A szénszálas kompozitból épített – és egy vagyonba kerülő – csodák pedig nem érik el az 1000 grammot sem.

Szénszál erősítésű, fémmátrixú kompozit keresztmetszete



14.5. Alakítható Mg-ötvözetek

– Al-Zn ötvözésű Mg-ötvözetek

Ez a csoport foglalja magába a leginkább klasszikusnak számító típusokat. Az Al-tartalom 3–8,5% között, a Zn-tartalom 0,5–5,5% között változik. Az AZ31B típus a legkisebb szilárdságú, de mégis a legelterjedtebb, mivel egyedül ezek alkalmasak a hengerléssel való feldolgozásra. Mechanikai tulajdonságaik közepesnek mondhatók, viszont nagyon jól hegeszthetők. Láttuk, hogy az öntészeti ötvözetek esetében a húzó- és a nyomó folyáshatár nem tért el; az alakítható ötvözeteknél azonban fel kell hívni a figyelmet arra, hogy számos típusnál a nyomó folyáshatár csak 60–70%-a a húzásra érvényesnek.

A nagyobb szilárdságú AZ61A és AZ80A típusok a folyatással és a kovácsolással készülő gyártmányok alapanyagai. Ezeket alakítás után nemesítik.

– Mn-ötvözésű Mg-ötvözetek

A Mn szilárdságnövelő hatása nem túlságosan jelentős. Ezek az ötvözetek leginkább az elektrokémiai alkalmazások, az acélok katódos védelme szempontjából érdekesek. Az M1A típus Mn-tartalma 1,6%. A HM21A típus a 0,7% Mn mellett 2% Th-ot is tartalmaz; 345°C-ig melegszilárd, hengerelt gyűrűk és süllyesztékes kovácsolással készülő gyártmányok alapanyaga.

– Zr-ötvözésű (tóriummentes) Mg-Zn ötvözetek

A 0,5–0,6% Zr szemcsefinomító és szemcsedurvulás-gátló hatású ötvöző. A kis és közepes Zn-tartalmú típusok hengerelhetők. Az öntészeti ötvözetek között említett RZ5 típus előrefolyatással és kovácsolással is feldolgozható. A ZK30, ZK40A és a ZK60A ötvözetekből elsősorban rudak és csövek készülnek.

– Th-ötvözésű ötvözetek

A Th hozzáadásának célja a melegalakíthatóság és a melegszilárdság növelése, de a tórium radioaktivitása problémássá teszi a feldolgozást.

– Ritkaföldfém- (RE-) tartalmú ötvözetek

A ritkaföldfémek javítják a melegalakíthatóságot. Az öntészeti ötvözeteknél már megismert WE43 és WE54 típusok képviselik a szóban forgó csoportot.

– Li-tartalmú ötvözetek

A lítiummal ötvözött típusokra (14-4. táblázat) a növelt mértékű hidegalakíthatóság és a kitűnő hegeszthetőség jellemző. A hagyományos ötvözetek mélyhúzásra nem alkalmasak, de a lítiummal való ötvözés lehetővé teszi annak köszönhetően, hogy a 6%-nál nagyobb Li-tartalom esetén egyre nagyobb mennyiségű térközepes köbös kristályszerkezetű fázis alakul ki az ötvözetben.

Ötvözet	Li %	Zn %	Al %	$R_{p0,2}$ MPa	A_{50} %
AZ31	–	1	3	105	11
Mg-Li 1	8,6	1,09	–	135	42
Mg-Li 2	9,3	1,10	–	160	40
Mg-Li 3	10,1	1,10	–	161	39
Mg-Li 4	15,6	1,07	–	101	45

14-4. táblázat: Li-ötvözésű Mg-ötvözetek összetétele és mechanikai tulajdonságai szobahőmérsékleten

Az európai szabványosítás nem érintette azt a helyzetet, miszerint az alakítható Mg-ötvözeteket az 1950–ben alapított European Association of Aerospace Industries, az AECMA szabványai szerint tipizálják. A legfontosabb alakítható Mg-ötvözetek típusait, összetételét és folyáshatárát a a 14-5. táblázat összegzi.

Ötvözet	Európa	Németo.	USA	$R_{p0,2}$ (MPa)
	AECMA	DIN 1729	ASTM	
Mg00,8	—	3.5003	—	—
MgMn2	—	3.5200	M1A	150–170
MgAl2Zn	—	—	—	150–170
MgAl3Zn	—	—	AZ31C	150–170
MgAl3Zn	MG-P-62	3.5312	AZ31B	160
MgAl6Zn	MG-P-63	3.5612	AZ61A	180–200
MgAl8Zn	MG-P-61	3.5812	AZ80A	200–230
MgZn3Zr	MG-P-43	—	ZK30	200–230
MgZn6Zr	—	—	ZK60A	220–250
MgY4Nd3Zr	—	—	WE43A	155–170
MgY5Nd4Zr	—	—	WE54	190–220

14-5. táblázat: Az alakítható Mg-ötvözetek jelölése és folyáshatára

A Mg-ötvözetek egyik igen fontos tulajdonsága a rezgéscsillapító képesség (14-6. ábra). Míg az Al-ötvözetek csillapítóképessége csak kb. 1–2% és az öntöttvasé is csak 12–17%, a Mg-ötvözetek – mégpedig elsősorban a binér ötvözetek – a rezgések 20–66%-át képesek elnyelni (az AS21 ötvözetnél 60%, az 1% Zr-tartalmú K1A ötvözetnél 66%). Ez a kivételes adottság a terhelés hatására bekövetkező képlékeny alakváltozás mechanizmusát meghatározó, nagyfokú ikresedési hajlammal magyarázható.

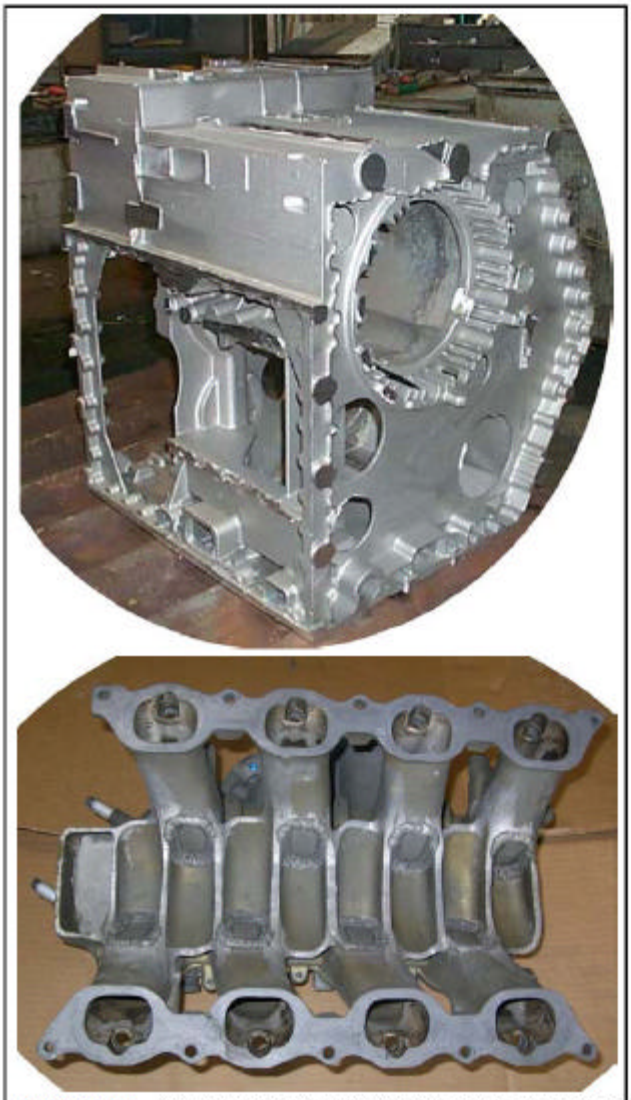
14.6. Különleges alkalmazások

A magnéziumötvözetek korrózióval szembeni ellenállását jelentősen megnövelte a nagytisztaságú ötvözetek gyártástechnológiájának kifejlesztése. Ez utat nyitott a repülőgép- és helikoptergyártásba való betörésnek. Az 1990-es években indított új helikopterfejlesztési programok (MD500, Apache, Eurocopter EC120, NH90, Sikorsky S92) mindegyikében jelentős szerepet kaptak a Mg-ötvözetek. A hajtóművek össztömegének átlagosan 2%-át teszik ki (az Al-ötvözetek aránya 6%). A Rolls-Roys Tay, Trent stb. hajtóművek középső burkolatának anyaga RZ5 ötvözet, az RB211 gázturbinához kapcsolódó sebességváltóké EZ33. A katonai és polgári repülőgépek számos típusánál választottak Mg-ötvözeteket, pl. a Mirage 2000 kerekeihez, az AlphaJet ablakkereteihez, tankok karter- és váltóházához (14-5. ábra).

A francia gyorsvasút a TGV első két generációs járműveiben az ülések kerete alumíniumötvözetből készült, tömegük 26 kg. Az éppen 10 éve debütált, 3. generációs TGV Duplex magnézium üléskereteinek tömege csak 14 kg, és jelentősen nőtt a rezgéscsillapító hatás.

A főleg Japánban és Németországban fejlesztett, 30–40% Li-tartalmú Mg-Li ötvözetek sűrűsége nem ritkán kisebb, mint a vízé. A fejlesztések célja egyrészt nagy fajlagos ellenállású ötvözetek előállítása, másrészt pedig a jelentős tömegcsökkentés, pl. a Ferrari-BBS keréktárcsája esetében.

14-4. ábra – Magnézium pedálkengyel egy kerékpáron



14-5. ábra – Mg-ötvözetből öntött harckocsi-hajtóműház (fent) és szívósor. Az utóbbi tömege 4,3 kg, míg ugyanaz az alkatrész alumíniumból 9,3 kg, poliamidból 6,2 kg

14-6. ábra – Magnéziumöntvény gépkocsi kormánykerékváz

15. fejezet
A titán és ötvözetei

Koponyaimplantátum koponyamodellen

15. A titán és ötvözetei

15.1. A titán tulajdonságai

A 22-es rendszámú titán a színesfémek jól ismert fajtája. 1790-ben (vagy 1791-ben) fedezte fel *William Gregor* angol szerzetes Cornwall-i vasércben, és tőle teljesen függetlenül – mégpedig Magyarországon! – *Martin Heinrich Klaproth* német vegyész, aki a „keresztapja" is volt az új elemnek, amikor szeparálta az általa „magyar vörös schörl" néven említett titán-dioxidot, azaz a rutilt. A fémtitánt – amelyet eleinte menachin néven is emlegettek az egyik érce, a menachanit (ma már inkább ilmenit) után – elsőként *Jöns Jacob Berzelius* izolálta 1825-ben, de előállítani csak 1910-ben sikerült az Új Zélandi születésű amerikai *Matthew A. Hunternek* a Rensselaer Polytechnic Institute-ban. Alkalmazási területei miatt bátran a legfontosabb színesfémek szűk elitjébe sorolhatjuk, az alumínium, a réz, a nikkel és a horgany társaságában. Nagy hőmérsékleteken erős affinitást mutat az oxigén, a nitrogén, a hidrogén és a karbon iránt, emiatt számos nehézség adódik a gyártásánál és az alkalmazásainál.

Az ötvözetlen titánnak szilárd fázisban két allotrop módosulata ismert. A 882°C-ig, az ún. T_β hőmérsékletig stabil alfa-titán legsűrűbb hexagonális kristályszerkezetű. A csak 882°C-tól az olvadáspontig (1 668°C) stabil béta-titán térközepes köbös rácsszerkezetű (a = 332 pm), és fajtérfogata nagyobb, mint az alfa-titáné. Az ötvözés hatására szobahőmérsékleten is stabil alfa+béta kétfázisú tartomány jelenhet meg az egyensúlyi diagramokon. Nagy nyomáson további allotrop módosulatok is létrejönnek: ω-Ti, γ-Ti.

Más fémekkel összevetve, jelentős különbségek mutatkoznak a fizikai tulajdonságokban. A 15-1. táblázat mutatja a titán, a vas és az alumínium néhány fizikai tulajdonságát. A titán szilárdságának növelésére főleg az Al és a V szolgál.

Miként az alumínium vagy a króm, a titán is passziválódik, vagyis a felületén jól tapadó, összefüggő oxidréteg alakul ki, amely kivételesen jó korróziós ellenállást biztosít a titánnak és a titánötvözeteknek, beleértve az eróziós korrózióval, valamint a halogenidekkel szembeni ellenállást is. Ez a kiváló passzivitás az alapja a biokompatibilis anyagként való felhasználásnak is. Ugyanakkor meglehetősen kevéssé áll ellen egyes forró, tömény savaknak (sósav, kénsav, szerves savak). A 15-2. és a 15-3. táblázat adataiból összehasonlítható a titán és más ötvözetek korrózióssebessége tengervízben, ill. forró salétromsavoldatban [8].

Fizikai tulajdonság		Titán	Fe	Al
Sűrűség	(g/cm³)	4,51	7,8	2,7
Olvadáspont	(°C)	1 668	1 536	660
Young-modulus	(GPa)	110	204	71
Hővezetési tényező	(W/mK)	21,6	71	242
Hőtágulási tényező	(10^{-6} 1/K)	8,64	12,3	23,7
Fajhő	(J/(kg·K)	0,518		900
Fajlagos ellenállás	(μΩ·cm)	47,8		2,66

15-1. táblázat: A titán fontosabb fizikai tulajdonságai a vassal és az alumíniummal való összehasonlításban

Áramlási sebesség	Kitéti idő (nap)	Korrózióssebesség (mm/év)		
		Titán (T40)	Monel 30	Al
9,8 m/s	365	< 0,0025	0,3	1,0
8,5 m/s	60	$1{,}2 \times 10^{-4}$	0,05	–
7,2 m/s	30	$5{,}10 \times 10^{-4}$	0,12	–

15-2. táblázat: A titán, a Monel és az alumínium korrózió viselkedése tengervízben

Hőmérséklet	Titán (T40)	1.4301 acél
116°C	0,03–0,17 mm/év	3,8–13,2 mm/év

15-3. táblázat: A titán és az X5CrNi18-10 (1.4301) korrózióálló acél egyenletes korróziójának sebessége forrásban lévő, 90%-os töménységű salétromsavoldatban

15.2. A titán előállítása

A titán előállítása nem tartozik a műszaki menedzseri alapismeretek közé. Ám mivel az 1950-es évek elején a Mechanikai Technológiai Tanszéket vezető *Gillemot László* professzort a fémtitán előállítási technológiájának hazai megvalósításában vitt jelentős szerepéért tüntették ki 1957-ben másodszor is a Kossuth-díjjal, tisztelgésképpen egy kis kitérőt teszünk ebbe az irányba.

A két legfontosabb titánérc a rutil, a természetes TiO_2 és az ilmenit ($FeTiO_3$). A szokásos előkészítési technológiákkal 90–99% Ti-oxid-tartalmú rutilt és 40–60%-os ilmenitet lehet kapni. 2000-es adatok szerint a legnagyobb érctermelők a következő országok: Ausztrália (1 433 kt), Dél-Afrika (1 057 kt), Kanada (760 kt), Ukrajna (331 kt), Norvégia (309 kt) és az USA (300 kt).

A világ titánigényét alapvetően a titán-dioxid határozza meg; a fémkereslet csak 6%-át teszi ki a teljes szükségletnek, 2005-ben kb. 50 kt volt. A rutilfelhasználásból a festékipar részesedése 59%, a műanyag- és gumiiparé 21%, a papíriparé 13%. A közönséges műanyagok rutiltartalma akár 3–25% is lehet: padlók, tetőfedési anyagok, nájlonzacskók, PVC ablakkeretek gyártásánál alkalmazzák, ugyanis növeli az átlátszatlanságot, és véd az UV-sugárzás káros hatásaitól. A papírgyártásban a rutilpigmentet az átlátszóság csökkentésére és a fényesség növelésére használják: a papírokban a rutil töltőanyag jellemző mennyisége kisebb, mint 5%. A nem titán-oxidos papírokhoz jóval több töltőanyag szükséges. A rutil viszont erősen koptatja a gyártóhengereket, ezért kifejlesztették a csak mérsékelten koptató szemcsézetű pigmenteket. Az USA-ban több mint 1 millió tonna a rutilpigment-felhasználás [9].

A fémtitán előállításának két fő szakasza van. Az első lépés a *titánszivacs előállítása*, majd a szekunder metallurgia, vagyis a vákuumos raffinálás (tisztítás, finomítás) és ötvözés. Ezt követik a kohászati alakítási technológiák (kovácsolás, hengerlés). A titánnak az oxigénhez való affinitása igen nagy; emiatt a titán-dioxid közvetlen redukciója gyakorlatilag nem lehetséges, ugyanis a titán erős karbidképző lévén rögtön reagálna a szénnel, amely az oxidjából redukálni tudja. Emiatt a titán (és cirkónium) kinyerése egy intermedier termékből történik, a fém kloridjából.

A $TiCl_4$ titán-tetraklorid lehetővé teszi az érc további komponenseitől való elválasztást, majd oxigénmentes közegben történik meg a kloridok metallotermikus redukciója. A metallurgiai folyamat fő szakaszai a következők:

i.) Az érc (ilmenit) kis forrpontú, gáz fázisú kloriddá alakítása karboklóros kezeléssel (a reakció erősen exoterm). Az 15-2. ábrán vázolt folyamat mintegy 800°C-on, vákuumban vagy védőgázban a következő egyenlet szerint megy végbe:
$FeTiO_3 + 3Cl_2 + 3/2\ C \rightarrow FeCl_2 + TiCl_4 + 3/2\ CO_2$

ii.) A titán-tetraklorid gáz (forrpontja 136°C) szeparálása, tisztítása, desztillálása.

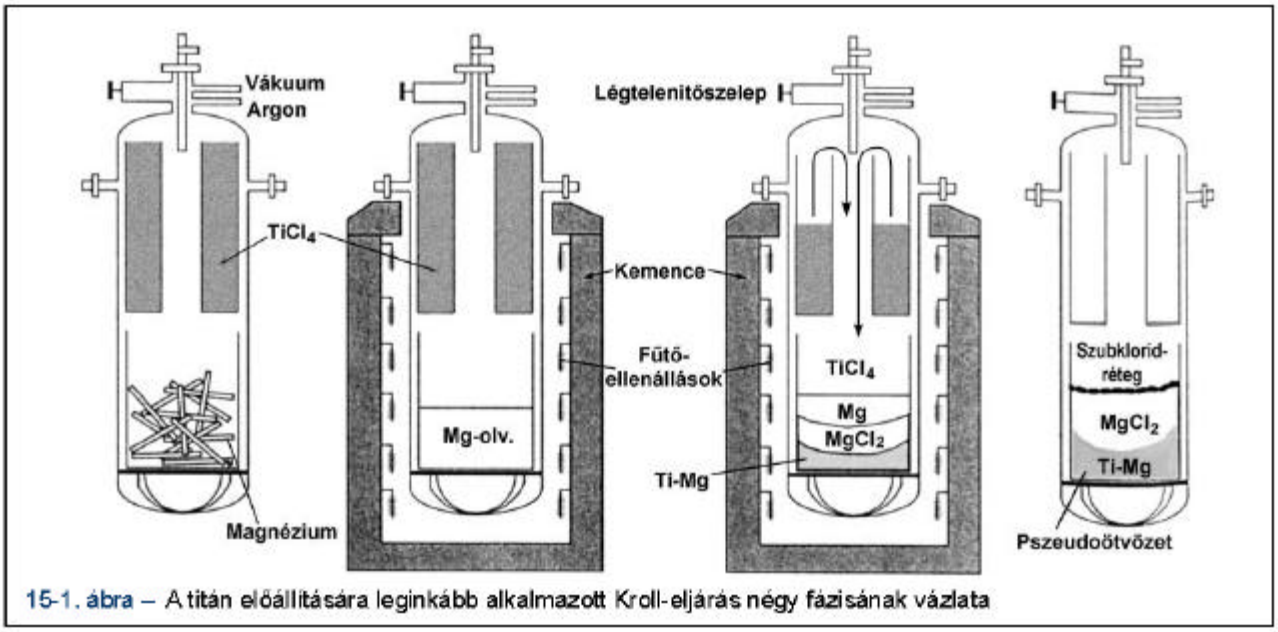
iii.) A titán-tetraklorid redukciója magnéziummal a Kroll-eljárás keretében (metallotermikus kezelés) a következő reakció szerint:
$TiCl_4 + Mg \rightarrow 2\ MgCl_2 + Ti$

iv.) Vákuumos lepárlás a titánnak a magnéziumtól való elválasztására: e folyamat végterméke a titánszivacs.

v.) A magnézium-klorid elektrolízise a fém visszanyerése érdekében,

vi.) A titánszivacs vákuumos átolvasztása, tisztítása, majd képlékenyalakítása.

A 650°C-on olvadó magnézium helyett esetenként nátriumot is alkalmaznak: ez a Hunter-eljárás lényegi eltérése a Kroll-eljárástól. A Kroll-féle redukciós módszer négy lépését illusztrálja a 15-1. ábra. A reaktor hőálló acélból készült zárható tartályának aljára szilárd magnézium kerül, a titán-tetraklorid pedig gyűrű alakú kosarakba.



15-1. ábra – A titán előállítására leginkább alkalmazott Kroll-eljárás négy fázisának vázlata

A tartály leszívása után felfűtik a kemencét. Megolvad a magnézium, és a középső zónában intenzíven szublimálni kezd a titán-tetraklorid. Ennek gőze nehezebb az argonnál, ezért leszáll a Mg-olvadék felületére, és reakcióba lép vele. E reakció mechanizmusa nem ismert, de végeredményben kis, mintegy 10 mikrométeres titánrészecskék képződnek, amelyek elkeverednek a magnéziumban. *Nem* oldódnak, hanem ülepednek – ezért nevezik ezt a ≈30% Mg-tartalmú elegyet pszeudoötvözetnek. A reakciótermékek felső rétegében a Mg-klorid helyezkedik el, amelynek a tetején néhány szubklorid alkot egy vékony réteget. Ezeket a frakciókat a reaktortartály kinyitása után mechanikai módszerekkel választják el.

A titán elválasztása a magnéziumtól a Ti-Mg pszeudoötvözet desztillálásával történik, amelyet vákuumos harangkemencében végeznek kb. 1000°C-on. A magnézium elpárolog, és kondenzáció után visszanyerhető. A Mg kipárolgása a pszeudoötvözetből erősen pórusossá teszi a titánt, amely termék innen kapta a titánszivacs elnevezést. A titánszivacsgyártás energiafogyasztása kb. 45 ezer kWh/t (a cirkóniumé 57 ezer), amelyből 12 ezer kWh/t esik a magnéziumnak a kloridjából való visszanyeréshez szükséges elektrolízisre.

A szekunder metallurgia keretében a titánszivacsot átolvasztják, majd a végterméknek megfelelő bugákat öntenek, s ezeket hengerlik, ill. kovácsolják. Az átolvasztási technológiák közül leginkább a vákuumos ívkemencés átolvasztás, az elektronsugaras átolvasztás (Electron Beam Cold Hearth Melting) és a plazmaíves átolvasztás terjedt el. Az elektrosalakos átolvasztás nem nyert teret, pedig számos olyan fejlesztési lépésen ment keresztül, amelyek gazdaságosságban is és minőségben is a többi módszer elé helyeznék. Ehhez azonban jelentős beruházások kellenének, amelynek nem kedvez a stagnáló, sőt szűkülő piac. Valószínűleg ugyanezen okból maradt mindeddig csak álom a folyamatos öntés is. Ennek ellenére folyamatosan születnek az új kutatási eredmények és az új metallurgiai módszerek, pl. az ultratisztaságú titán előállítására a CMSF-eljárás (Clean Metal Spray Forming).

15.3. A legfontosabb titánötvözetek

A titánötvözetekre a nagy felhasználók a saját szabványos jelöléseiket alkalmazzák. Az USA-ban 7 különféle szabványt használnak. Az európai és a magyar osztályozás az ötvözők által meghatározott szövetszerkezet szerint alakult ki, de hasznos még a rendeltetés szerinti felosztás is.

A tiszta titánok csoportjának (ez az 51-es anyagcsoport a CR ISO/TR 15608:2000 szabványban) négy alcsoportját különítjük el, mégpedig az alapján, hogy mennyi az oldott oxigén mennyisége a fémben. A legtisztább fémtitán oxigéntartalma < 0,20%, a további három csoport határértékei: 0,25%, 0,35% és 0,40%.

A titán ötvözői két csoportra oszthatók aszerint, hogy a titán alfa- vagy béta-fázisának stabilitását segítik elő. Az alfaképzők: Al, O, C és N. A bétaképzőkből 3 alcsoport képezhető. Az izomorf béta-képzők korlátlanul oldódnak: Mo, V, Nb. Az eutektoidos béta-képzők kiválásokat képeznek: Mn, Fe, Cr, Si, Ni, Cu. A semleges bétaképzőknek csekély a hatásuk, ezek a Zr és az Sn.

Az ötvözők szövetszerkezetre gyakorolt hatása alapján három csoportba sorolhatók az egyes titánötvözet típusok, nevezetesen:

- **α-fázisú és kvázi-α-fázisú ötvözetek**

Az alfa-titánötvözetek a fent említett szabvány szerint az 52-es anyagcsoportot alkotják, és a következő ötvözetek tartoznak közéjük:

- Ti-0,2Pd
- Ti-2,5Cu
- Ti-5Al-2,5Sn
- Ti-8Al-1Mo-1V
- Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo
- Ti-6Al-2Nb-1Ta-0,8Mo.

- **(α + β) fázisú ötvözetek**

Ez az 53-as anyagcsoport, amelybe a következő ötvözetek tartoznak:

- Ti-3Al-2,5V
- Ti-6Al-4V
- Ti-6Al-6V-2Sn
- Ti-7Al-4Mo.

- **β-fázisú és kvázi-β-fázisú ötvözetek**

Az 54-es anyagcsoportba a következő ötvözetek tartoznak:

- Ti-10V-2Fe-3Al
- Ti-13V-11Cr-3Al
- Ti-11,5Mo-6Zr-4,5Sn
- Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo.

Miként a rozsdamentes acéloknál a Schäffler-diagramot, a titánötvözeteknél is alkalmazzák az ötvözetek szövetszerkezete szerinti ábrázolást: a vízszintes tengelyre a Mo-egyenérték, a függőleges tengelyre pedig az Al-egyenérték kerül:

$$Mo_{eq} = Mo + \frac{V}{1,5} + \frac{Cr}{0,6} + \frac{Fe}{0,35} + \frac{Cu}{1,3} + \frac{Nb}{3,6}$$

$$Al_{eq} = Al + \frac{Sn}{3} + \frac{Zr}{6} + 10 \cdot (O + C + 2 \cdot N)$$

A legfontosabb ötvözeteket is és az ötvözetlen, „tiszta” titánokat is a repülési iparág besorolásai szerint érdemes felsorolni, mert a kereskedelemben is leginkább így szerepelnek (15-4. táblázat).

Anyagjel	USA	Német	Francia	Egyéb
Ötvözetlen titán				
Ti-1	Grade 1	3.7024	T35	IMI 115 Ti-P01
Ti-2	Grade 2	3.7034	T40	IMI 125 Ti-P02
Ti-3	Grade 3	3.7054	T50	IMI 130 Ti-P03
Ti-4	Grade 4	3.7064	T60	IMI 155 Ti-P04
Titánötvözetek				
Ti-64	Grade 5	3.7164	TA6V	IMI 318 Ti-P63
Ti-20		3.7124	TC	IMI 230 Ti-P11
Ti-525	Grade 6	3.7114.		IMI 317 Ti-P65
Ti-800	AMS 4908			
Ti-811	AMS 4915			
Ti-662	AMS 4971	3.7174		
Ti-6242	AMS 4975	3.7144		

15-4. táblázat: A titán és a Ti-ötvözetek leggyakoribb jelöléseinek összehasonlító táblázata

Az ötvözetlen titánok között a Ti-1 anyagminőségre a következő tulajdonságok és kémiai összetételi szennyező-határértékek jellemzők:

- Szakítószilárdság: R_m = 440 MPa.
- Folyáshatár: $R_{p0,2}$ = 282 MPa.
- Nyúlás: A = 30%.

Fe	N	O	H	C
≤ 0,12%	≤ 0,05%	≤ 0,18%	≤ 0,015%	≤ 0,08%

Ugyanezek a jellemzők a Ti-4 ötvözetre:

- Szakítószilárdság: R_m = 590–735 MPa.
- Folyáshatár: $R_{p0,2}$ = 470 MPa.
- Nyúlás: A = 8%.

Fe	N	O	H	C
≤ 0,30%	≤ 0,08%	≤ 0,40%	≤ 0,015%	≤ 0,08%

További ötvözőkkel rengeteg típust állítanak elő. Az imént felsorolt típusoknak kidolgozták az extra kis mennyiségű, intersztíciósan oldódó szennyezőt tartalmazó (ELI) és a ruténiummal ötvözött változatait is; ennek a széles spektrumnak a katonai alkalmazások állnak a hátterében.

15.3.1. Korrózióálló titántípusok

E célra az ötvözetlen (Ti-1–Ti-4) és a gyengén ötvözött típusokat (Ti-0,2Pd; Ti-08Ni-0,3Mo) használják, amelyek közepes szilárdságúak. A szilárdságot a növekvő oxigéntartalom növeli. Felhasználásukban meghatározó jelentőségű az ár.

Az ötvözött típusok közül a TA3V (Grade 9), Beta C (3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo, AMS 4939) és a Beta 21S (15Mo-3Nb-3Al-0,2Si, Grade 21) típusok tartoznak e csoportba.

Orvostechnikai célra az ötvözetlen titán mellett a következő ötvözetek terjedtek el: Ti-6Al-4V ELI (AMS 4907, ASTM F 136), Ti-6Al-4V (Grade 5), Ti-6Al-7Nb (IMI367), Ti-5Al-2.5Fe, Ti-6Al-4V (TA6V), Ti-13Nb-13Zr, Ti-12Mo-6Zr-2Fe.

15.3.2. Nagyszilárdságú titántípusok

Legalább másfél tucatnyi típust lehet ebbe a kategóriába sorolni. Ötvözőtartalmuk 25%-ig terjed, folyáshatáruk meghaladja a 800 MPa-t. A legelterjedtebb típus immár 40 éve a 6% Al-ot és 4% V-ot tartalmazó TA6V (ASTM Grade 5), mely a titánötvözetek piacának több mint a felét fedi le. Alfa+béta szerkezetű ötvözet. A repülőgépek hajtóműveinek és szerkezeti elemeinek, továbbá a kriogéntechnikai berendezéseknek a fontos alapanyaga. Szuperképlékenyen is jól alakítható; ezzel a technológiával préselik egyetlen darabból egyes harci repülőgépek haslemezét. Az űrtechnikai eszközök alapanyagául szolgáló Ti-10V-2Fe-3Al ötvözet folyáshatára meghaladja az 1200 MPa-t.

15.3.3. Kúszásálló és hőálló ötvözetek

A nikkelötvözeteknél jóval nagyobb szilárdságuk és kisebb tömegük miatt játszanak fontos szerepet, de rendkívül drágák. A 700°C-ig alkalmazható, 24% Al és 11% Nb-tartalmú ötvözet ára 4–5-szöröse az általános kereskedelmi típusokénak.

15.4. A titán és ötvözeteinek alkalmazása

A titán alkalmazási területe – köszönhetően a különleges fizikai, mechanikai, és korróziós tulajdonságainak – igen kiterjedt, amint azt az alábbi példák is illusztrálják.

– Turbóreaktorok, gázturbinák

A sűrűségre vetített fajlagos szilárdság kiemelkedően jó értéke mellett a 600°C feletti hő- és korrózióállóság a magyarázata a Ti-ötvözetek ilyen irányú felhasználásokban játszott meghatározó szerepének. A helikopter-hajtóművek alkatrészein túl fontos szerepet kaptak a titánötvözetek az Airbus 380 utasszállító valamint az F/A-22 va-

dászbombázó hajtóműveinél is. Ez utóbbi repülőgép szerkezeti anyagainak 39%-a titánötvözet (mellette 24% kompozit, 16% alumíniumötvözet és 1% műanyag, s csak a maradék acél).

Az 1962-ben kezdődött francia Concorde-programban kifejlesztett gépek 185 tonnás saját tömegének 2%-a volt titánötvözet, az új Airbusoknál ez az érték 6% (15 tonna titán, továbbá 140 tonna Al-ötvözet és 35 tonna műanyag és kompozit).

– **Vegyipari szivattyúk, csővezetékek, hőcserélők**

Ezekben az alkalmazásokban a kiváló korrózióállóság a meghatározó.

– **Versenyautók, versenymotorok nagy terhelésnek kitett alkatrészei**

A kedvező sűrűség révén csökkenthető az alkatrészek tehetetlenségi nyomatéka, a motor és a járművek tömege. A rugóként való alkalmazásokban az acélénak csak a felét kitevő rugalmassági modulus előnyeit aknázzák ki, emellett szelepek, hajtókarok, dugattyúk, kipufogórendszerek, féktárcsák alapanyaga lehet a titán.

– **Páncélzatok, fegyverek**

Az olcsónak számító titántípusok alkalmazásával számos esetben helyettesíthető az acél mind a katonai, mind pedig a polgári eszközök lövedékek elleni páncélzatainál. Az amerikai harci repülőgépek haspáncéljától a golyóálló sisakon és a búvármellényeken át a kézifegyverekig igen széles az alkalmazások köre.

– **Orvosi eszközök, protézisek, implantátumok**

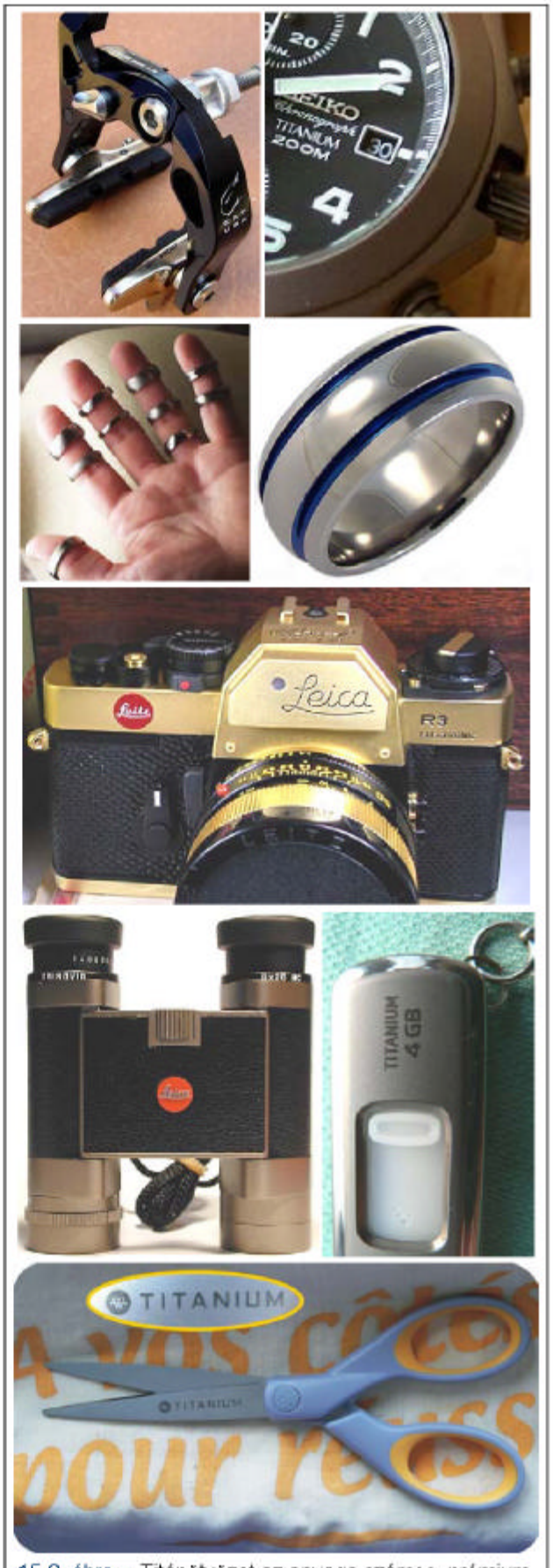
Számos orvostechnikai alkalmazásban – sebészeti, fogászati, kardiológiai protézisek, rögzítők, orvosi műszerek, kerekeskocsik, hordágyak stb. – használják ki a titán szilárdságát, amágnesességét, kis tömegét és főleg a biokompatibilitását.

– **Sportszerek**

A titán az egyik „slágeranyag" a sportszerek gyártásában. Lényegében véve nemes anyagnak tekintik a fogyasztók. Ez a megítélés a kétségtelenül nem csekély ár mellett a kiváló funkcionális jellemzők miatt is megérdemelt. Golfütők, teniszütők, tollaslabdaütők, kerékpárok, horgászorsók stb. készülnek titánötvözetekből (15-2. ábra).

– **Óragyártás, optikai eszközök**

A már jól ismert kiváló tulajdonságok tették a titánötvözeteket a gyakran ékszer funkciót betöltő „felső kategóriás" órák, gyűrűk, szemüvegek, fotócikkek, távcsövek és egyéb díszítők alapanyagává (15-2. ábra).



15-2. ábra – Titánötvözet az anyaga számos, prémium kategóriás sportszernek, ékszernek, nagymerevségű optikai és elektronikai eszköznek, nagy éltartósságú vágószerszámnak

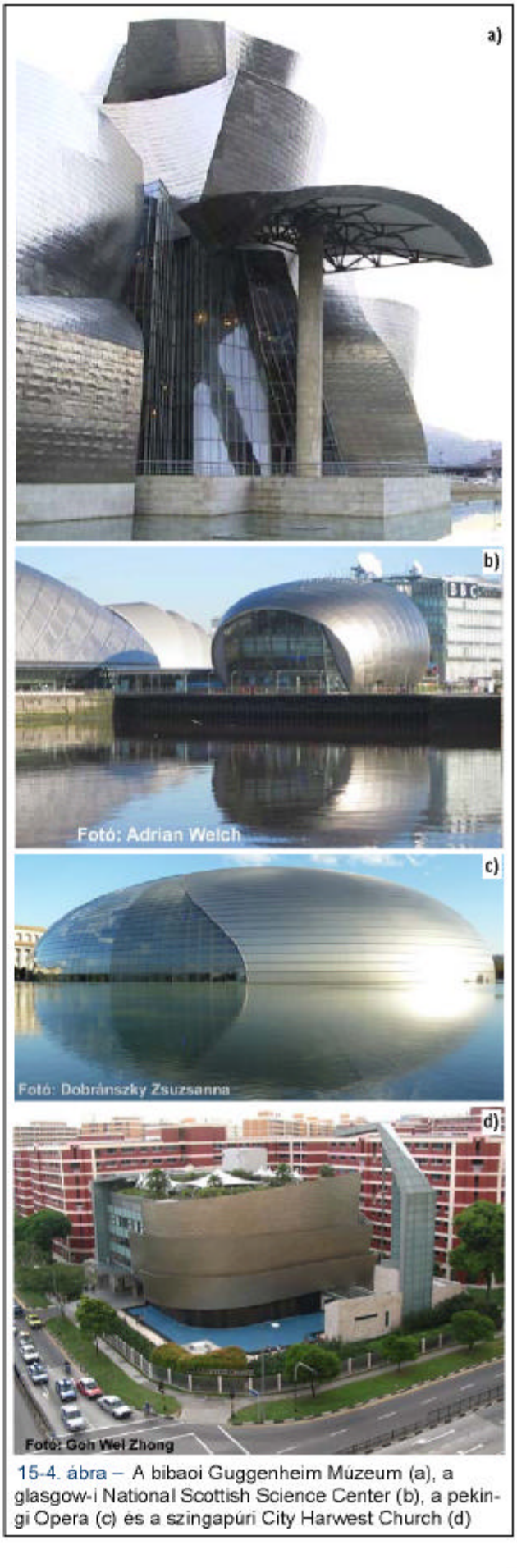
– **Építőipar**

A nagy szilárdság és a korrózióállóság mellett különlegesen kedvez a titánnak presztízsépületek burkolati anyagaként való alkalmazására az a körülmény, hogy anódos eloxálással szinte tetszés szerint színezhető a védőoxidréteg. Titánborítású, ultramodern épületnek álmodta meg *Paul Arnaux* 1999-es, díjnyertes pályázatában a 2007-ben megnyílt pekingi opera épületét, és pl. titánlemezekkel borították a rekonstrukció során Chamonix-ban a XVI. századi templom tornyát is. Titánlemezek borítják továbbá pl. Spanyolországban, Bilbaoban a Guggenheim Múzeumot, az amsterdami Van Gogh Múzeumot, a glasgow-i National Scottish Science Centert, a szingapúri City Harvest Church-öt (15-3. és 15-4. ábra).

15-3. ábra – Titánborítás a Szent Mihály templom tornyán, Chamonix Mont-Blanc-ban (Franciaország)

– **A titán felhasználásának megoszlása**

A titán felhasználásának szektoriális megoszlását mutatja a 15-5. táblázat. Más adatok szerint a felhasználás több mint 60%-a az aeronautikai iparra, tehát a repülőgép- és űrhajózási iparra koncentrálódik. A legnagyobb felhasználó az USA (10 ezer tonna) és Japán (4 ezert tonna), rajtuk kívül Németország, Kína, Franciaország és Nagy-Britannia fogyasztása haladja meg éves szinten az ezer tonnát.



15-4. ábra – A bibaoi Guggenheim Múzeum (a), a glasgow-i National Scottish Science Center (b), a pekingi Opera (c) és a szingapúri City Harwest Church (d)

Felhasználási terület	Mennyiség (ezer tonna)
Polgári repülés és űrhajózás	14–19
Katonai repülés és űrhajózás	3–4
Energetika és vegyipar	20–25
Sport és szabadidő	3,0
Építőipar	0,5
Egészségügy	0,8
Egyéb (benne: óra és szemüveg)	1,0
Összesen	**42–53**

15-5. táblázat: A titán fő felhasználási területeinek éves részesedése az ezredfordulón

A legfőbb mérföldkövek – amelyek a titánkeresletre és természetesen az árak változására is jelentős hatást gyakoroltak – a következők:

- 1971. A Concorde-program vége.
- 1975-76. Az F-14 és az F-15 repülőgépek gyártása.
- 1977-81. Intenzív keresletnövekedés a polgári repülőgyártásból.
- 1982-84. A polgári repülőgépek piacának összeomlása.
- 1984-86. A B1-B bombázó gyártása.
- 1985-89. A kereskedelmi repülőgépek piacának újraélénkülése.
- 1988-89. Az USA titánszivacsgyártási kapacitásának bővülése.
- 1990-94. Visszaesés a katonai és a polgári repülőgépiparban.
- 1992. Az ashtabula-i (Ohio, USA) nátriumredukciós üzem bezárása.
- 1993. Henderson-ban (NV, USA) beindul a magnéziumredukciós üzem.
- 1994-97. Fellendülés a fogyasztói területen és a polgári repülőiparban.
- 1997-98. Rendelés-visszamondások a polgári repülőiparban.

15.5. A titán világpiaca

A titán ipari méretű felhasználásáról az 1950-es évek elejétől lehet beszélni. 1940 előtt a fémtitán előállítása gazdaságosan lehetetlen volt. Ebben az évben dolgozta ki *W. Kroll* professzor az ilmenit karboklóros redukciós módszerét, amelynek végterméke a „titánszivacs". A Kroll-eljárás nagyipari technológiaként 1947-ben debütált. Az 1990-es évek végének adatai alapján az 15-6. táblázat mutatja a titán fő világpiaci mutatószámait, lehetővé téve az összehasonlítást a legfontosabb fémes szerkezeti anyagokkal.

Fém	Kereslet (ezer t)	Ár (USD/t)	Forgalom (Mrd $)
Acél	750 000	400	300
Alumínium	20 000	1 500	30
Rozsdamentes acél	14 000	2 000	28
Titán	50	9 000	0,45

15-6. táblázat: A titán és néhány más ötvözet világpiaci mutatói az ezredfordulón

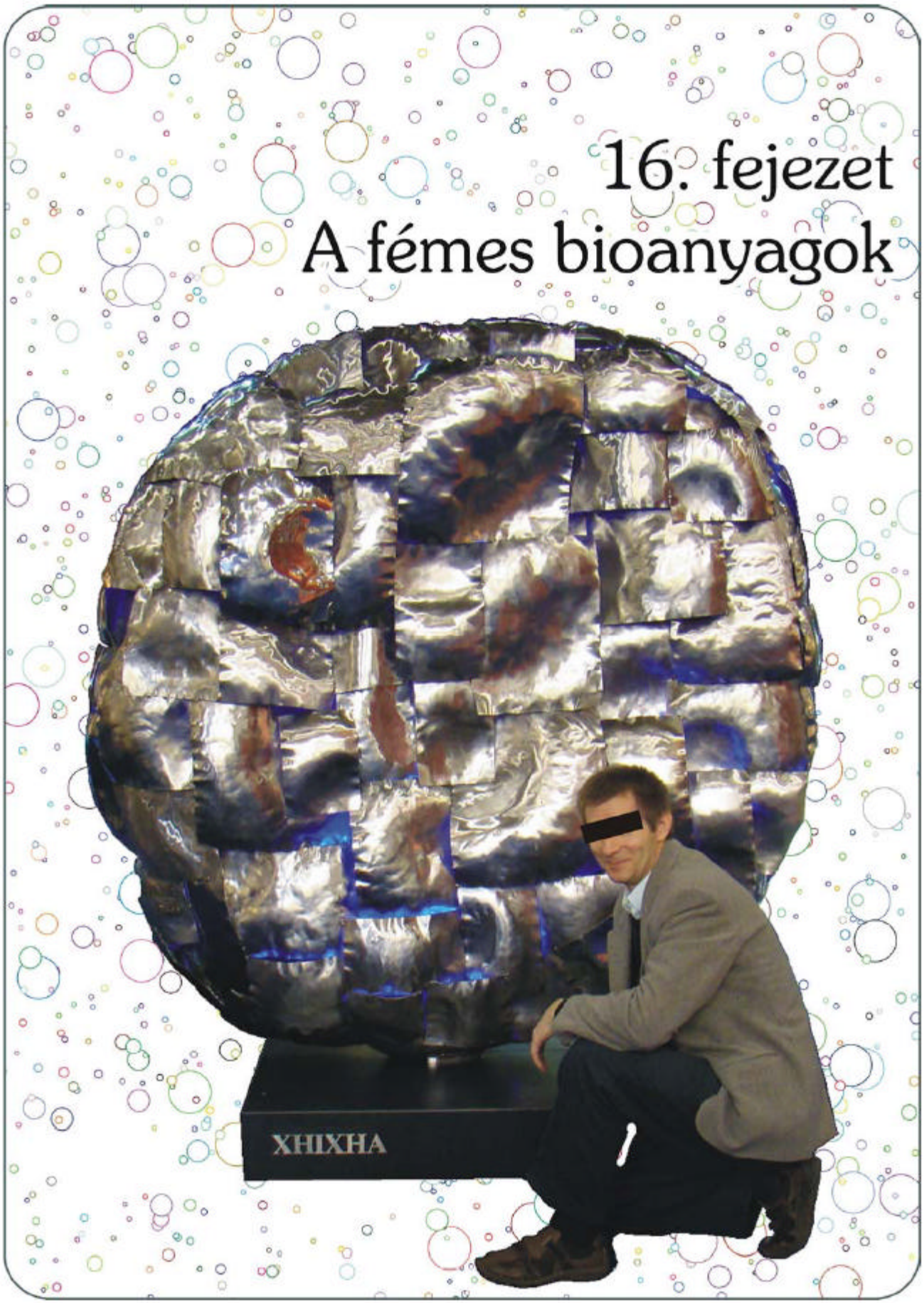
15.6. A titán hazai piaca

Magyarországon titángyártásról nem beszélhetünk, noha az 1950-es években voltak erre irányuló próbálkozások. A fémtitán feldolgozása évtizedek óta folyik olyan vállalatoknál, amelyek a gázturbinákat gyártó nagy európai cégek beszállítói, továbbá a vegyipari és gyógyszeripari berendezések gyártásában. Az utóbbi 20 évben a 2001-es visszaeséstől eltekintve a hazai felhasználás folyamatosan bővül. Az 1998. évi egymillió dolláros értékről (amellyel az export is összemérhető volt, és azt a felhasználásból le kell vonni!) 5 év alatt megnyolcszorozódott. Szemben a világtrendekkel, ahol a repülőgépgyártás a fő felvevő piac, Magyarországon a vegyipar felhasználási dominanciája miatt a csőtermékek szinte egyed uralkodónak számítanak az importon belül. 2003-ban, pl. a csőtermékek tették ki az importmennyiség 78,3 és az importérték 85,9%-át.

Az EU-ba való belépésünk előtt egészen pontos kereskedelmi adatokhoz lehetett jutni, amelyekből az derül ki, hogy a belépés előtti évtizedben a titánbeszállító országok közül 17-nek a részesedése az 1%-ot sem éri el. A legnagyobb titánszállítónk Japán volt, amely egymaga 55%-kal részesedett, továbbá Franciaország (20%) és Németország (13%).

Magyarországon az 1950-es években, az alumíniumipar felfutásával párhuzamosan fordult intenzív figyelem a titán felé. A mérnökgenerációk kinevelésével és tudományos iskolateremtő szerepével mindmáig a szakmája doyenjének tekintett *Gillemot professzor* és *Verő professzor* nemzetközileg is elismert érdemeket szereztek a titánnal kapcsolatos tudományos kutatásban. A fémtitán előállításáért (1957) *Gillemot Lászlót* Kossuth-díjjal tüntették ki). A titánnal ötvözött, nagyszilárdságú, MTA50 jelű, Mn-Ti-Al ötvözésű acélt a *Verő József* vezette Vasipari Kutatóintézet fejlesztette ki, és az új Erzsébet híd építéséhez már alkalmazták.

16. fejezet
A fémes bioanyagok



Ruota, Helidor Xhixha alkotása a maastrichti Stainless Steel World 2009 szakkiállításon

16. A fémes bioanyagok

A gyógyászatban az „implantátum” gyűjtőnéven ismert eszközök alkalmazásáról évezredek óta beszélhetünk. Az implantátumok és az alkalmazásukhoz szükséges eszközök előállítására szolgálnak a bioanyagok. A rezet és a bronzot egészen a 19. század közepéig használták ilyen célra, de a biológiai kockázataik felismerésével az arany, az ezüst és az elefántcsont lettek a mérgező réz helyett az eredményes kezelések anyagai. Később egyre jelentősebb szerepet kezdtek játszani a korrózióálló acélok és ötvözetek, majd a kerámiák.

A tapasztalatok rámutattak arra is, hogy az implantátumok anyagának gyakran nagyon is aktív kapcsolatba kell kerülnie az élő szövettel ahhoz, hogy az implantátum tartósan be tudja tölteni feladatát. E felismerés vezetett az első bioaktív anyagok – a bioüveg és a hidroxiapatit – kifejlesztéséhez. A szív- és érrendszeri betegségek sebészeti (1970), majd invázív radiológiai (1986) terápiájának térhódítása szorosan összefügg azzal, hogy a diagnosztika mellett robbanásszerű fejlődés kezdődött a polimer bioanyagok terén.

A definíció igényével: a „bioanyag” az orvosi eszközökben használt olyan élettelen anyag, amely ki van téve a biológiai rendszerrel való kölcsönhatásnak. Elméletileg minden anyagot bioanyagnak tekinthetünk, amelynek valamilyen orvosi alkalmazásban szerep jut. Az élő szervezettel való kölcsönhatások minősítésére vezettek be egy, a bioanyagok vonatkozásában alapvető fontosságú fogalmat: ez a *biokompatibilitás*.

A biokompatibilitás – bio-összeférhetőség – mint anyagtulajdonság azt fejezi ki, hogy az élő szervezettel való kölcsönhatásban az anyag orvosilag kedvezően viselkedik. Számszerűsíthető jellemzése, mérése mindmáig nincs megoldva, és általános értelemben talán nem is szükséges.

A továbbiakban áttekintjük a bioanyagok néhány jellegzetes csoportját, a bioanyag mivoltukból fakadó sajátos tulajdonságaikat és főbb alkalmazásaikat, de előbb érdemes néhány jellemző adattal rámutatni a piaci jellemzőkre. 2000-ben az USA 1400 milliárd dolláros egészségügyi piacán 77 milliárdot tett ki az orvosi eszközök és 9 milliárdot a bioanyagok (gyártási alapanyagok) forgalma. Az ortopédiai implantátumok és a kardiovaszkuláris terápia eszközei egyaránt 5–6 milliárd dolláros piacot képviseltek. Ha termékeket nézünk, 30 millió kontaktlencse, 100 ezer szívbillentyű, 400 ezer pészméker, 200 millió katéter, másfélmillió értágítóbetét (sztent), 250 ezer csípőprotézis és csaknem egymillió fogászati implantátum került felhasználásra. S végül még egy üzleti adat: 2008-ra az USA egészségügyi piaca a 2000. évinek a 171%-ára növekedett.

16.1. A bioanyagok kialakulása

Ma már teljesen természetes, hogy egy új anyag bioanyagként való alkalmazhatóságát komoly tudományos kutatás előzi meg, de az emberiség történelme során ez csak alig néhány évtizede van így. Évezredeken át a bioanyaggá válás legjellemzőbb kezdetét az jelentette, hogy a harci sérültek túlélték egy lövedéknek az el nem távolítását. A kilencezer évesre becsült „kennewicki ember” maradványaiban a csípőcsontba fúródott lándzsahegyet találtak, és a világháborúk sebesültjei között is azok lettek a tartós túlélők, akik rozsdamentes acél repeszdaraboktól sérültek meg. A maják kagylóhéjból készült fogpótlásokat használtak, és a galliai leletek is fejlett fogpótlási gyakorlatról tanúskodnak. A sebek összevarrására fémszálakat (aranyat) először a görögök alkalmaztak. Kétszáz éve ólomhuzallal, 1849-ben ezüsthuzallal végeztek sikeres operációkat, noha ekkor még a sterilizálás jelentőségét sem ismerték.

A kontaktlencse elvét *Leonardo da Vinci* éppen ötszáz éve dolgozta ki; az első üveg kontaktlencse 150 éve született meg, míg a műanyag (PMMA) lencséket 70 éve fejlesztették ki. Az első biokompatibilitási kutatásokat 1829-ben végezte *H. S. Levert*: arany, ezüst, ólom és platina próbadarabokat ültetett be kutyákba. 1886-ban nikkelezett csontrögzítő acélcsavarokat vizsgáltak. Az első csípőprotézist 1891-ben ültették be (sikertelenül), anyaga elefántcsont volt. Az 1920-as években többen publikálták a fémek szöveti reakcióira vonatkozó eredményeiket: vas, acél, Cu, Mg, Al-ötvözet, Zn, Ni, Au, Ag, Pb, Cr-Ni-Mo rozsdamentes acél és Co-ötvözetek voltak a vizsgált anyagok. Az első „igazi” bioanyagot, a „Vitallium” nevű kobaltötvözetet (65Co-30Cr-5Mo) 1929-ben fejlesztették ki fogászati célból.

A műanyagok mint bioanyagok alkalmazása a nájlon sebvarrófonalként való alkalmazásával kezdődött 1941-ben, bár a celofán érsebészeti alkalmazásáról már korábban is írtak. A nájlon (poliamid), a polietilén, a celofán, az akrilüvegek (plexi), a teflon és a többi, eredetileg általában szintén a repülőgép- és autógyártás céljára kifejlesztett anyag – mint pl. a szilikonok, a poliuretánok, a titán és a rozsdamentes acél – is gyorsan bekerültek a bioanyagok közé a világháború után.

16.2. A bioanyagok csoportosítása

A bioanyagokat a klasszikus szakmai rendszerezés szerint öt fő csoportra oszthatjuk: biopolimerek, fémes bioanyagok, biokerámiák, természetes bioanyagok, és amennyiben két vagy több anyagcsoport tagjai társulnak egy alkalmazásban, társított bioanyagok vagy biokompozitok. Az utóbbi évtizedben azonban olyan jelentősen fejlődött és specializálódott a bioanyagok felhasználása és választéka, hogy a hagyományos osztályozás mellett indokolt egy finomabb rendszerezést is alkalmazni, amelyben a következő bioanyagcsoportokat különítjük el:

- Szénláncú polimerek, pl. különféle poliamidok (PA), polimetil-metakrilát (PMMA).
- Szilikon bioanyagok, pl. polidimetil-sziloxán (PDMS) a kontaktlencsékhez, szilikongumi.
- Orvosi szálak és textíliák, pl. poliészter, felszívódó szálak (PGA, PDS), alginátok.
- Hidrogélek, pl. polivinil-alkohol, polietilénglikol (PEG), PNVP, PHEMA.
- Környezetérzékeny biopolimerek, pl. polivinil-metiléter, metilcellulóz.
- Felszívódó, lebomló anyagok, pl. poliglikolsav, politejsav, polikaprolakton.
- Természetes anyagok, pl. selyem, kollagén, zselatin, cellulóz, DNS.
- Fémes bioanyagok, pl. vasalapú ötvözetek, Co-ötvözetek, titánötvözetek.
- Kerámiák, üvegek, üvegkerámiák, pl. alumínium-oxid, kalcium-foszfát.
- Pirolitikus karbon (PyC).
- Kompozitok.
- Tapadásmentes felületek, pl. PEG.
- Textúrás és porózus anyagok (a textúra a mikroszerkezeti alkotók, pl. szemcsék különleges kristályorientációs elrendeződését jelenti).

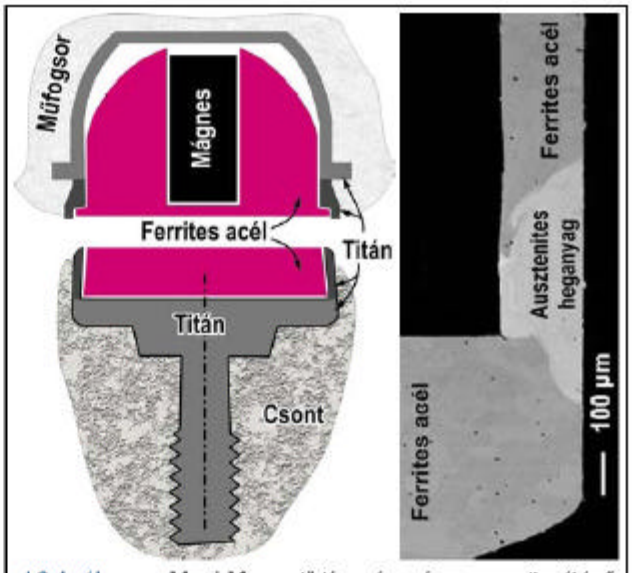
A bioanyagok között mind orvosi, mind gazdasági szempontból nagy jelentőségűek a fémes anyagok. Az implantátumok anyagaira világszerte saját szabványokat dolgoztak ki, amelyek a rendes ipari felhasználásoktól némileg szigorúbban rögzítik a kémiai összetételre, mikroszerkezetre és mechanikai tulajdonságokra vonatkozó előírásokat. Magyarországon az MSZ EN 12006 szabványsorozat foglalja össze a szívbillentyű-helyettesítők, az érprotézisek, az endovaszkuláris eszközök, az MSZ EN ISO 14602 a csontösszekötő implantátumok, az MSZ EN ISO 21535 a csípőízületet helyettesítő implantátumok, az MSZ EN ISO 25539-2 a vaszkuláris sztentek (értágító betétek) anyagaira és jellemzőire vonatkozó előírásokat; szinte mindegyik szabvány legújabb kiadása 2009-ben jelent meg.

A fémes bioanyagok legnagyobb csoportjai:

- a rozsdamentes acélok,
- a kobaltötvözetek,
- a titán és ötvözetei,
- a tantál, nióbium és ötvözeteik,
- az amalgámok,
- a nemesfémek és ötvözeteik.

16.3. Ferrites rozsdamentes acélok

A rozsdamentes acélok közül implantátumok anyagaként korántsem csak az ausztenites acélokat alkalmazzák, jóllehet ezek a legismertebbek és a leginkább elterjedtek. A ferrites korrózióálló acélok bioanyagként való alkalmazásának egyik legnagyobb területe a fogászati klinikai gyakorlat, ahol versenyeznek egymással a beültetett és a kivehető fogpótlások. A mágneses rögzítésű műfogsorok anyagai között fontos feladatot töltenek be a ferrites korrózióálló acélok. Az acélköpeny védi a korróziótól a keménymágnest, és emellett mágneskoszorúként szolgál, növelve a mágneses rögzítőerőt; a 16-1. ábra mutatja a szerkezet felépítését. Ez utóbbi hatást nem tudják biztosítani az ausztenites acél vagy titánötvözet burkolatok, amelyek szintén elterjedtek. A rögzítést biztosító keménymágnesek burkolatát több elemből hegesztik össze lézersugaras mikrohegesztéssel.



16-1. ábra – „Maxi Magnet" típusú, mágneses rögzítésű műfogsor rögzítési elve (balra); lézersugaras hegesztéssel lezárt burkolat mágneses műfogsoron (jobbra)

A mágneses rögzítésű műfogsorok acéljait a 16-1. táblázat mutatja. A stabilizált (Ti + Nb) AISI 444 ferrites acél lyukkorróziós ellenállása kiváló a 2% Mo miatt. Az XM27 és a 447J1 acél Japánban gyártott, nikkelmentes szuperferrites acélok. Az AUM20 márkanevű acél (Aichi Steel) érdekessége, hogy a Mn-tartalma is csak 0,02%.

Jelölés	EN jel	C	N	Cr	Ni	Mo	Egyéb
AISI 444	~1.4521	0,025	0,035	19	1	2	0,6 (Nb+Ti)
XM27	–	0,002	0,01	26	< 0,15	2	0,02 Cu
447J1	~1.4592	0,01	0,015	30	–	2	
AUM20	–	0,01	–	19	–	2	0,2 Ti
AISI 416	1.4005	0,12	–	13	–	–	S > 0,15
AISI 630	1.4542	0,07	–	17	4	–	4 Cu, 0,4 (Nb+Ta)

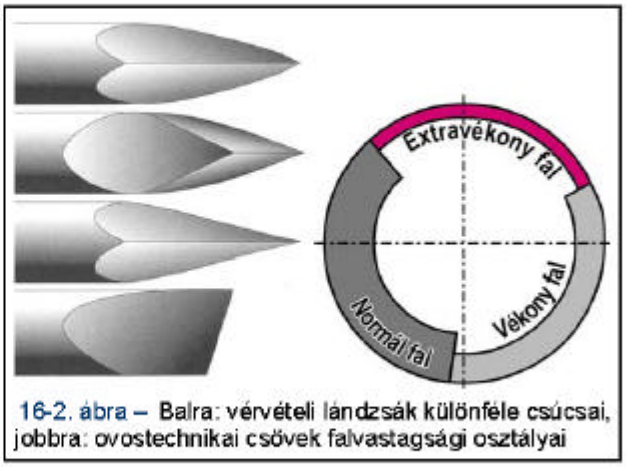
16-1. táblázat: Fogászati célú ferrites rozsdamentes acél bioanyagok kémiai összetétele

Az AISI 416 (1.4005) acél igazából martenzites acél; a legjobban forgácsolható rozsdamentes acélként emlegetik, amely technológia sajátosságot a növelt S-tartalom is javítja. Az AISI 630 (1.4542) acél szintén nem a ferrites acélok csoportjába tartozik, hanem a kiválásosan keményedő rozsdamentes acélok legelterjedtebb típusa.

A mágneses fogsorrögzítők lyukkorróziós hajlamát – amely itt a biokompatibilitás fokmérője – 0,9%-os NaCl-oldatban vagy Hanks-féle fiziológiás oldatban ellenőrizve, a 16-1. táblázat összes ferrites acélja jobbnak bizonyult, mint a 316LVM (1.4441) típusú, Cr-Ni-Mo ötvözésű ausztenites acél, amely a legelterjedtebb fémes bioanyag. Ugyanerre az eredményre vezettek azok a kutatások, amelyeket nióbiummal stabilizált 1.4575 (28Cr-4Ni-2,5Mo) típusú szuperferrites acélon, 21Cr-2,5Mo-5,5Al-0,4Y-0,4Ti ötvözésű Incoloy MA956 ötvözeten végeztek.

16.4. Ausztenites rozsdamentes acélok

A rozsdamentes acélok körében bioanyagként is a legismertebbek az ausztenites acélok. Alaptípusuk a 0,1% C-, 18,5% C-r, 8,5% Ni-tartalmú 1.4319-es (AISI 302) bioanyagként való alkalmazása széleskörű. Orvosi tűk, injekciós tűk, vérvételi lándzsák (16-2. ábra), katéterek, vezetődrótok, rugók anyagaként elterjedten használják az olcsósága mellett azért is, mert a szilárdsága – a nagyobb széntartalomnak köszönhetően – meghaladja az 1.4301 (AISI 304) és az 1.4306 (304L) típusokét. A korróziós vizsgálatok szerint 0,9%-os NaCl-oldatban mindössze néhány nap alatt bekövetkezik a 304-es acél lyukkorróziója, ezért ma már csak egyszer használatos eszközöket és nem beültetésre szánt rögzítőket gyártanak belőle. A 18Cr-8Ni ötvözésű acélt azonban évtizedeken át ortopédsebészeti implantátumok anyagaként is alkalmazták az 1926-os kipróbálása után. A hagyományos, alakítható, szabványos típusaikat az ISO 5832-1:2007 szabvány sorolja fel.



16-2. ábra – Balra: vérvételi lándzsák különféle csúcsai, jobbra: ovostechnikai csövek falvastagsági osztályai

Az 1.4542-es – nagy C- és nagy Cr-tartalmú, Ni-lel is ötvözött – típust ma már szintén kizárólag orvosi eszközökhöz, pl. injekciós tűk, kanülök, katéterek, vezetődrótok anyagaként használják, az esetek többségében cső vagy huzal formában. A csövek méretválasztéka 0,30 mm külső átmérőnél és 0,08 mm-es falvastagságnál kezdődik.

A gyártók közötti verseny fontos területe a méretpontosság és a belső felület minősége. Ezek az extra vékony falú csöveknél (16-2. ábra) jelentenek nagy kihívást a gyártók számára. A volfrámkarbid anyagú úszó tüskével végzett hideghúzás biztosítja a legjobb belsőfelületi minőséget.

A kristályközi korrózió elkerülésére a legjobb megoldásnak a széntartalom csökkentése bizonyult. Mintegy 25–30 éve a kohászati technológiák fejlődésével világszerte elterjedt az 1954-ben kidolgozott AOD-eljárás, s így az extra kis széntartalom biztosítása általánossá vált.

Az ausztenites acélok bio-összeférhetősége sokat javult a kis C-tartalmú és a vákuumos átolvasztás révén kis szennyezőtartalmú acéloknak köszönhetően. A C-tartalom 0,02%, a foszfortartalom 0,02%, a kéntartalom 0,01% alá csökkentése általánosan megfigyelhető. Az elterjedtebb amerikai szabványos jelölésükkel 304L, 304LV típusú acélokat az olcsóbb fogászati alkalmazásokban már kivehető protézisek anyagaként is alkalmazzák, nem csak orvosi eszközök gyártására.

Az orvosi gyakorlatban az ausztenites acélok az implantátumok anyagaiként a Mo-ötvözésű 1.4571-es típussal kezdődnek, amelynek elterjedt amerikai szabványos jele: AISI 316Ti. A bioanyagként felhasznált típusokat vákuumos átolvasztással kezelik, és ez az acél jelölésében is megjelenik: 316LVM (1.4441) Az L betű az extra kis C-tartalomra utal, a VM rövidítés azt jelenti, hogy az acélt vákuumos átolvasztással tisztították; emiatt nagyon kicsi a kedvezőtlen hatású szennyezők (As, Bi, P, S, Sb, Se, Sn) mennyisége.

Ez az acél 2,5% Mo-t is tartalmaz, és ennek köszönhetően jelentősen nagyobb a lyukkorrózióval szembeni ellenállása a Mo-mentes típusokhoz képest. A homogén ausztenites szerkezetet a nikkel mennyiségének 13–14%-ra növelése biztosítja. A fokozott korrózióállóságból adódó jobb biokompatibilitás teszi a 316LVM acélt a hagyományos implantátumanyagok vezetőjévé.

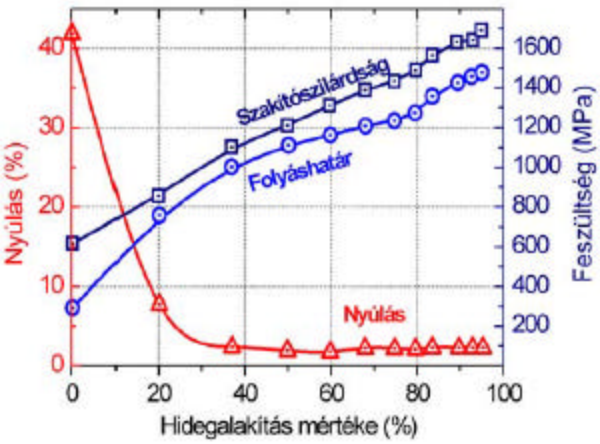
Sebvarróhuzalként (0,07 mm vastagságtól), horgok, tágítók, kampók, lapocok, tűk, csontlemezek, csontrögzítő csavarok, csípőprotézisek (16-3. ábra) stb. anyagaként széles körben használják. A csípőprotézisek legelterjedtebb anyaga: szilárdsága ugyan mérsékelt, de szívós, jól önthető, alakítható, forgácsolható, elektropolírozható.

Az ausztenites acél implantátumoknál fontos szerepet játszik a szemcseméret, amelynek csökkenése növeli a szilárdságot is és a kifáradással szembeni ellenállást. A szemcseméretre lényeges hatást gyakorol a gyártási folyamat: a kristályosodás, a hidegalakítás, a lágyítás, az újrakristályosodás. A hidegalakítás nagyon erősen kihat a szilárdságnövekedésre (16-4. ábra). A csontcsavaroknál, csontrögzítő lemezeknél a hidegen húzott vagy hengerelt előgyártmányok szemcséi erősen textúrás szerkezetet alkotnak, ami előnyös a fő terhelés, a húzó igénybevétel elviselésére.

A hidegalakításnak lehet egy másik hatása is, nevezetesen az *alakítási martenzit* kialakulása a homogén ausztenites szerkezetben. A legnyilvánvalóbban úgy észlelhető a martenzit kialakulása, hogy a lágyított állapotban paramágneses anyag mágnesezhetővé válik. A martenzitképződéssel az M_{d30} határhőmérséklet (melyen 30%-os alakítás 50% martenzitet hoz létre) alatt kell számolni: az M_{d30} jól becsülhető a Nohara-formulával:

$M_{d30} = 551 - 462C - 9{,}2Si - 8{,}1Mn - 13{,}7 - 29Ni - 18{,}5Mo - 29Cu - 68Nb - 462\,N - 1{,}42\cdot(G - 8)$, ahol G a szemcseméret értéke az ASTM E112 - 10 szabvány szerint.

16-3. ábra – Csípőprotézis és Olasz-féle csontcsavar



16-4. ábra – Az 1.4571 (AISI 316Ti) ausztenites acél mechanikai tulajdonságai a hidegalakítás mértékének függvényében

Az implantátumok gyártásának hagyományos technológiái az öntés, a képlékenyalakítás és a forgácsolás. A nagyméretű darabok gyártásánál a porkohászati technológiák fejlődtek jelentős mértékben, amelyek a kobaltötvözetek és a Ti-Ni ötvözetek gyártása terén kaptak nagy gyakorlati jelentőséget. Az ausztenites acélok esetében viszont a porozitás miatt a korrózióállóság csökkenése tapasztalható. Ez alól kivételek a csövek, ahol a csőhúzás okozta nagyon jelentős alakváltozás megszünteti a porozitást.

A porkohászati módszerekkel gyártott, porózus csípőprotézisfejek kopása lényegesen csökken a hagyományos felületűekhez képest a pórusokba bevitt biokompatibilis kenőanyag (CMC, karboximetil-cellulóz) jóvoltából. Ám a porozitás okozta korrózióállóság-csökkenés miatt még mindig kerülik az implantátumok porkohászati gyártását ebből az anyagból.

Egy másik precíziós gyártási eljárás, a lézersugaras vágás nagy jelentőséget kapott az értágítóbetétek – közismert idegen nevükön: sztentek – gyártásában. Az alig 0,1 mm falvastagságú csövek vághatóságát és a belőlük készült értágítóbetétek mechanikai viselkedését egyaránt erősen befolyásolja a szemcseméret. A sztentek anyagául szolgáló, jellemzően 1,200 mm átmérőjű és 0,090–0,120 mm falvastagságú csövekre a gyártók 3,5–5,0% átmérő- és vastagságtűrést, illetve 7–10% központossági tűrést garantálnak.

Érdekes fejlesztési cél a gyógyszertároló és gyógyszerkibocsátó képesség biztosítása porózus fémfelületekkel. Az utóbbi években több szabadalom is született a nagysebességű nyomásos öntéssel vagy a félszilárd fázisú öntéssel előállítandó, a gyógyszerkibocsátó sztentek alapanyagául szolgáló porózus csövek gyártására vonatkozóan.

A hagyományos ausztenites acélok – pl. a 18Cr-14Ni-2,5Mo és a 18Cr-12,5Ni-2,5Mo ötvözésűek – egyik hátránya a kis folyáshatár és a jelentős nikkelkibocsátás, ami szövődményeket okoz az emberek csaknem 10%-ánál. A szilárdságnövelés és a Ni-tartalom csökkentése szándékával fejlesztették ki a csökkentett Ni-tartalmú, Mn- és N-ötvözésű típusokat, pl. a 22Cr-12,5Ni-5Mn-2,5Mo és a 21Cr-10Ni-3Mn-2,5Mo acélokat, amelyek N-tartalma 0,10-0,16%. A nitrogén szerepét hat tényezőre lehet bontani:

- A lyukadási folyamat kezdetén NH_4-iont képezve a H-nel, gátolja az oxidációt.
- Stabilizálja a felületi védőréteget az anionok (pl. Cl^-) hatása ellen.
- Nitrátionokat képezve gátolja a lyukkorróziós folyamat kezdeti szakaszát.
- Stabilizálja az ausztenit fázist.
- Növeli a kritikus lyukképződési áramot az elektrokémiai korróziós folyamatban.
- Gátolja az ε-fázis képződését, javítva a hidrogén károsító hatásával szembeni ellenállást.

Az 1990-es évek közepének acélfejlesztési alapelve az volt, hogy a nitrogén erős ausztenitképző lévén alkalmas arra, hogy a nikkelt akár teljesen is kivonják. A nitrogéntartalmat esetenként 1,0% fölé is növelve igazán különleges acélokat fejlesztettek ki. E nagy szilárdságú, szívós, jól keményedő, kitűnő korrózió- és kopásálló, ún. TWIP-acélok csoportjai a következők:

- 18Cr–18Mn–2Mo–0,9N
- 15Cr–12Mn–4Mo–0,9N
- 16Cr–11Mn–5Mo–0,9N
- 17Cr–10Mn–3Mo–0,5N–0,2C
- 23Mn–22Cr–1Mo–1,1N (ASTM F2229).

A Ni-mentes, N-ötvözésű ausztenites acélok alakítás hatására sem mágnesesződnek, vagyis nem képződik bennük alakítási martenzit jelentős mértékű hidegalakítás hatására sem.

Összegezve az ausztenites acélok fejlődését, elmondható, hogy egy emberöltő alatt jelentős fejlődés ment végbe ebben az anyagcsoportban. 35–40 éve váltották fel az extra kis C-tartalmú, Cr-Ni-Mo acélok az első generációs típusokat. Már ekkor megkezdődött a N-ötvözésű változatok fejlesztése. A REX 734 (X4CrNiMnMoNbN 21-9-5-2) típus az 1980-as években lett az ortopédsebészeti implantátumok első számú anyagává. Ma is széles körben használják, pl. a hazai implantátumgyártók is ezt az ISO 5832-9 szabványban „High-N” néven elfogadott anyagot. Később megszülettek a Ni-mentes ausztenites acélok, amelyek azonban még nem terjedtek el.

A manapság alapanyagként használt típusok ötvözési rendszerét, valamint kereskedelmi és szabványos megnevezéseiket a 16-2. táblázat tartalmazza.

Anyag meghatározása	Kereskedelmi név	ISO	ASTM
Fe-18Cr-14Ni-2.5Mo	316 LVM	5832-1	F 138
Fe-18Cr-12.5Ni-2.5Mo (öntött)	316 LVM	–	F 745
Fe-21Cr-10Ni-3.5Mn-2.5Mo	REX 734	5832-9	F 1586
Fe-22Cr-12.5Ni-5Mn-2.5Mo	XM-19	–	F 1314
Fe-23Mn-21Cr-1Mo-1N	Biodur 108	–	F 2229

16-2. táblázat: Az implantátumok anyagaként használt ausztenites rozsdamentes acélok jele, kereskedelmi megnevezése, továbbá az európai ISO-szabványuk jele, illetve az USA-ban használt ASTM-szabványos jelük

16.5. Az orvostechnikai kobaltötvözetek

A kobaltötvözetek bioanyagos alkalmazásaiban a 16-3. táblázatban szereplő ötvözettípusok fordulnak elő a leggyakrabban:

Anyag meghatározása	Kereskedelmi név	ISO	ASTM
Co-28Cr-6Mo önthető	CoCrMo	5832-4	F 75
Co-28Cr-6Mo alakítható	CoCrMo, Alloy 1	5832-12	F 1537
Co-28Cr-6Mo alakítható	CoCrMo, Alloy 2	5832-12	F 1537
Co-28Cr-6Mo alakítható	CoCrMo, GADS	–	F 1537
Co-20Cr-15W-10Ni-1.5Mn	L-605	5832-5	F 90
Co-20Ni-20Cr-5Fe-3.5Mo-3.5W-2Ti	Syncoben	5832-8	F 563
Co-19Cr-17Ni-14Fe-7Mo-1.5Mn	Phynox	5832-7	F 1058
Co-20Cr-15Ni-15Fe-7Mo-2Mn	Elgiloy	5832-7	F 1058
Co-35Ni-20Cr-10Mo	MP35N	5832-6	F 562

16-3. táblázat: Bioanyag Co-ötvözetek, kereskedelmi megnevezése, az ISO-szabványuk jele, illetve az USA-ban használt ASTM-szabványos jelük

A táblázatból látható, hogy a viszonylag sok típus milyen elvek szerint rendeződik: az ötvözöttség nyilvánvalóan az egyik ilyen szempont, de fontos rendezőelv az is, hogy az ötvözet milyen alakadási eljárásra alkalmas: önthető vagy képlékenyen alakítható. Kissé részletezve néhányat:

- Co-Cr-Ni-Mo ötvözet: ASTM F1058 vagy Elgiloy, Phynox, Conichrome (1950-ben szabadalmaztatták).
- Co-Ni-Cr-Mo-Ti ötvözet: ASTM F562 vagy MP 35 N, Biophase, Protasul-1.
- Co-Cr-Mo ötvözet: ASTM F75 vagy Vitallium, Haynes Stellit 21, Zimaloy.
- Módosított Co-Cr-Mo ötvözet: ASTM F799.
- Co-Cr-W-Ni ötvözet: F90 vagy Stellit 25, L-605 (európai szabványuk az ISO 5832-5).

Az F75 ötvözet jellegzetes felhasználása csípőprotézisek területére esik, és főként a precíziós öntés a gyártástechnológia. Az öntött termékekben (ISO 5832-4) 3 tipikus probléma fordul elő.

- A Co-dús alfa-fázisban Cr-karbidok jönnek létre, és emiatt fellép a lyukkorrózió.
- Szemcsedurvulás a lassú hűlés miatt, aminek szilárdságcsökkenés a következménye. Akár több milliméteresek is lehetnek a szemcsék.
- Öntési hibák. A zárványok, a repedésképződési helyek, a porozitás mind rontják a szilárdságot és a kifáradással szembeni ellenállást.

A fémporok nagy hőmérsékletű izosztatikus sajtolásával (HIP) a szemcseméret 10 mikron alá csökken. Ennek köszönhetően a folyáshatár 440–500 MPa-ról 840 MPa-ra, hidegalakítás után pedig akár 1660 MPa-ra nő, és kiválásos keményítéssel még tovább növelhető is.

Az F799 egy módosított F75, amelyet az öntés után melegkovácsolással alakítanak, ezért nevezik termomechanikus Co-Cr-Mo ötvözetnek is. Az átkovácsolás során az LKK kristályrács nyírás okozta fázisátalakulással hexagonálissá (HCP) alakul. A kifáradási határ, a szilárdság kétszer akkora, mint az öntött szerkezetű F75 ötvözeté.

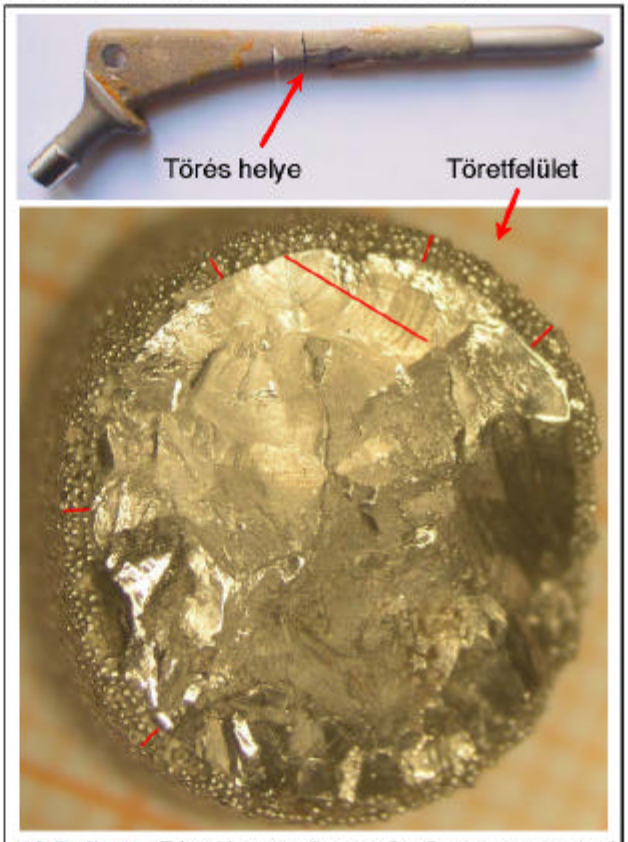
Az F90 (HS25) ötvözetben a W és a Ni a térdprotézisek (16-5. ábra) forgácsolhatóságát javítja. Hidegalakítással erősen növekedik a szilárdság.

Az MP35N ötvözet (MP = multiple phase) többfázisú, termomechanikus kezeléssel szabályozott mikroszerkezetű. A homogén LKK fázis martenzites átalakulással HCP-vé alakul (419°C-on). A termomechanikus kezelés mintegy 50%-os képlékeny alakváltozással jár, aminek következtében a HCP-fázis finom lemezkék formájában az LKK szemcséken belül rendeződik. A 10–100 nmes lemezkék képződése erősen megnöveli a diszlokációsűrűséget. Ehhez adódik még a klasszikus kiválásos keményedés hatása: Co_3Mo kiválások képződnek a HCP-lemezkéken. Valóban többfázisú anyagról van tehát szó.

Az MP35N és főleg az L605 típusú Co-Cr ötvözetek 2000 után nagyon elterjedtek a sztentek anyagaként, ugyanis a nagy szilárdságnak köszönhetően jobban csökkenthető a sztent bordáinak vastagsága (kb. 60 mikrométerre) és a fémmel fedett felület, mint a 316LVM acélnál.

16-5. ábra – Co-Cr térdprotézis és annak röntgenképe (fotó: S. Agraval)

A fáradásos törés azonban ennek ellenére bekövetkezhet, mint a 16-6. ábrán látható csípőprotézisnél, amely 8 év használat után tört el egy hölgy testében, és onnan kioperálva derült fény a károsodásra. A fáradásos törés anyagszerkezeti oka alapvetően az volt, hogy az öntés miatt durvaszemcsés anyagnak kicsi a szívóssága.



16-6. ábra – Fáradásos törés egy Co-Cr ötvözet anyagú csípőprotézis szárán (9 év után) és a töretfelület képe

Magyarországon jelentősnek mondható az implantátumgyártó iparág: az egri Sanatmetal és Medimetal, a hódmezővásárhelyi Protetim és a diósdi Biotech elismert szereplői Európa és a világ implantátumpiacának is.

16.6. Az értágítóbetétek vagy sztentek

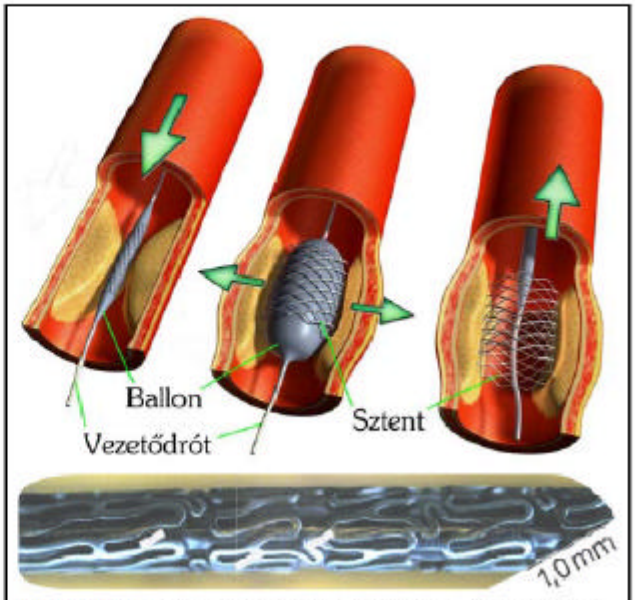
A szív koszorúereinek szűkülete Magyarországon a leggyakoribb népbetegség. Az érszűkület azt jelenti, hogy az érfal belső részén lerakódások, ún. plakkok jönnek létre; ez az ateroszklerózis. A lerakódások idővel elhalnak, elmeszesednek, csökkentve ezzel az erek átmérőjét és rugalmasságát. Mindezek a folyamatok idővel a helyi keringés elégtelenségét okozzák. Az érszűkületek a szívi, az agyi, ill. a perifériás ereken egyaránt jelentkezhetnek. Ha az érszűkület a szív oxigénellátását biztosító koszorúerek valamelyikében jelentkezik, az a szívizmok elhalását, vagyis szívinfarktust okoz. A koszorúerek szűkületei EKG-val is kimutathatók, mivel változik a szív egyes területeinek villamos aktvitása, de az érelzáródások rendesen katéteres érfestéssel vagy kardiocétével diagnosztizálhatók.

Az elzáródott koszorúerek gyógyításának klasszikus módszere a gyógyszeres kezelés, valamint az elzáródott érnek az áthidalása szívműtéttel. Az 1980-as években számos alternatív módszer terjedt el, amelyek célja a keringés helyreállítása olyan rekanalizációs módszerekkel, amelyek csak egészen apró beavatkozásoknak minősülnek a műtétekhez képest. E módszerek különleges szerkezeti megoldásoknak és anyagoknak köszönhetően terjedhettek el, ezért létrehozatalukban fontos szerepet játszottak az anyagkutatások.

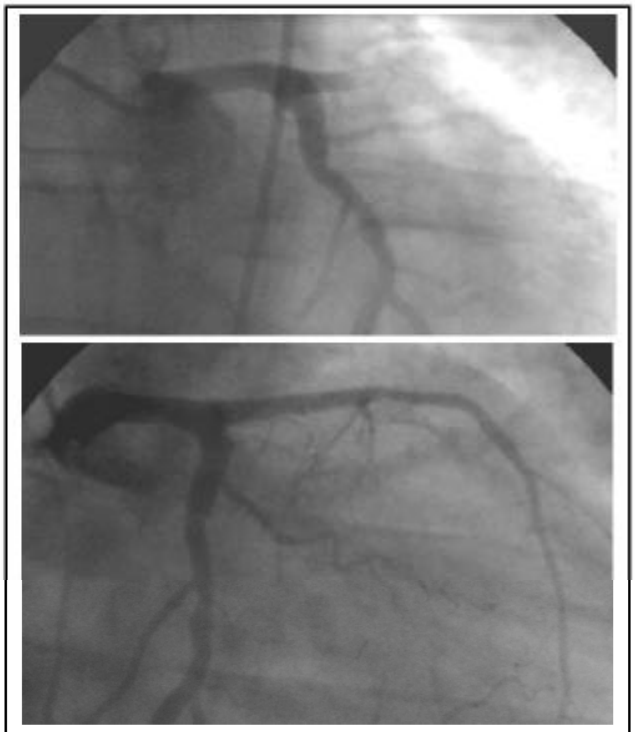
Az erek belső falán kialakult plakk részben vagy teljes egészében eltávolítható a van Andel-féle (kúpos) katéter vagy a Zeitler-féle (lépcsőzetes) katéter áthúzásával. A lerakódások felaprithatók egy forgófejű katéter (rotablátor) segítségével, de ezek alkalmazása ritka.

A ballonkatéteres értágítás (angioplasztika) alkalmával egy ballont vezetnek az érszűkülethez, majd felfújva a ballont, kitágítják az eret. Az eljárás hátránya, hogy kisebb-nagyobb sérüléseket okozhat az érfalon, továbbá az érvisszaszűkülés (restenosis) idővel gyakran újra bekövetkezik.

Jelenleg a legfontosabb értágítási módszer a sztent beültetése. Katéterekkel a csőszerű fémhálót betolják az érszűkületbe, amelyet a hordozó ballonkatéter felpumpálásával kitágítanak (16-7. ábra). A sztent bennmarad az érben, nem engedi visszarugózni az érfalat. A sztent beültetésének eredményeképpen megnyílik az út a vér áramlása számára (16-8. ábra). Az érprotézis tartósan megtámasztja az érfalat. Az értágítóbetétek éppen egy emberöltővel ezelőtt jelentek meg az érszűkületek, különösen a szívkoszorúerek és a nyaki főverőér, a carotis gyógyításában.



16-7. ábra – A sztentes értágítás jellegzetes szakaszai és egy használatra kész, 23 mm hosszúságú, korszerű sztent egy szakasza



16-8. ábra – 42 éves férfi koszorúér-szűkületének röntgenképe az értágítás előtt (fent) és az után (lent)

16.6.1. A sztentek anyagai

Az első értágítóbetétek az 1980-as évek végén kerültek forgalomba. A Schneider cég Wallstentje nagyszilárdságú, így nagyon merev rugózású Co-Cr-Ni-Mo huzalból készült egyszerű szövéssel. Az 1990-as évek végére a Co-Cr ötvözetek és a Ni-Ti ötvözetek (Angiomed: Memotherm) mellett sok más anyagot is kipróbáltak, ugyanis a ballonos tágítású sztentek, az előzőeknél jóval lágyabb alapanyagot igényelnek.

Az elsődleges alapanyaggá az AISI 316LVM ausztenites acél vált, de jó néhány más anyag is előkerült: arany (K&M: Tentaur), Ta (Medtronic: Wiktor), Pt-Ir ötvözet (Angidynamics: AngiStent), Nb (Inflow Dynamics: Starflex).

Az 1990-es években jelentősen felgyorsult a sztentek beültetése, és a klinikai tapasztalatok alapján egyre újabb elvárások fogalmazódtak meg az orvosok részéről. A véredényekbe implantált eszközök esetében kialakult a *haemokompatibilitás* fogalomköre, és a korszerű sztentekkel kapcsolatos elvárások együttese (16-9. ábra). E követelményeket egyszerre még elméletileg sem képes kielégíteni semmilyen anyag, sőt, a klinikai tapasztalatok folyamatosan újrafogalmazzák magukat a követelményeket is.

16-9. ábra – Az korszerű sztentekkel kapcsolatos elvárások

A rohamosan bővülő ismeretanyag, valamint a sztent mint termék világpiaci jelentőségű tényezővé válása érzékelhető hatást gyakorolt a sztentgyártók anyagválasztási megfontolásaira.

- Eltűnt az arany, még bevonatként is.
- Meghatározó lett a 316LVM acél, továbbá két Co-ötvözet: az L605 (51Co-20Cr-15W-10% Ni) és az MP35-N (Co-35Ni-20Cr-10Mo) nagypontosságú cső előgyártmány formában.
- Intenzív kutatások alternatív anyagokért: a nikkel trombogén és allergén hatását elkerülendő, valamint a szemcsefinomítás és a röntgenes láthatóság növelése érdekében.
- A Ni-mentes acélok jelöltje, a Biodur 108 rozsdamentes acél (Fe-21Cr-23Mn-1N-0,7Mo-0,3Ni) nem vált be, mivel nem sikerült megoldani a nagypontosságú cső gyártását belőle.
- A 6% platinát tartalmazó PERSS®, más néven IVT 78 ötvözet (az egykori: IVT Stent anyaga) a sztenttel együtt ugyancsak eltűnt a palettáról.
- 2009-ben megjelent – és sikeresen terjed – a 9% Ni mellett, 33% (!) Pt-t és 18% Cr-ot tartalmazó Fe-ötvözet, a Boston Scientific által gyártott Promus Element sztent anyaga.
- Az öntáguló sztentek között a szuperrugalmas tulajdonságú, ezért öntáguló sztentnek nagyon alkalmas Nitinol (50–50% Ni és Ti) egyre nagyobb teret kapott.

Különösen nagy figyelem irányult a bevonatokra az 1990-es évek végétől kezdve. Ezt az a felismerés motiválta, hogy a sztent fémes anyaga az alapfunkció – az érfal megtámasztása, a keringés helyreállása és az érfal regenerálódása – után rövid idő múlva feleslegessé válik, sőt, olykor ártalmassá: a sztenten belül érvisszaszűkülés (instent restenosis) alakulhat ki. Az ezt gátló gyógyszer bejuttatására és adagolására azonban nagyon alkalmas a sztent bevonata.

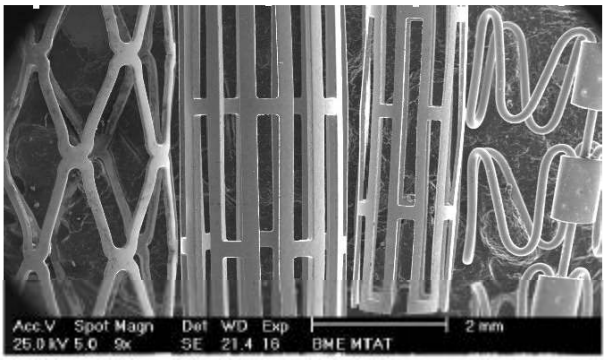
A bevonatokat illetően az arany, SiC, gyémántszerű szén, foszforilkolin stb. mellett megjelentek a polimerek: PVP (polivinil-pirolidin), PVA (polivinil-alkohol), PET (polietilén-tereftalát).

Teljesen új fejezetet nyitott a sztentek alkalmazása terén az idővel felszívódó „biodegradábilis" alapanyagból készített sztentek, pl. PLLA (poli-L-tejsav). Ugyanez a koncepció jellemezte a Mg-ötvözetek alkalmazását is (Biotronic: AMS Stent). A magnézium nagymértékben feloldódott 6 hónap alatt a klinikai kísérletek eredményei szerint, de ez a 2003-ban indult kutatás végül teljesen eredménytelen maradt.

Egészen más koncepciót képviselnek a gyógyszerkibocsátó sztentek. Alkalmazásuk a sztenten belüli érvisszaszűkülés csökkentése érdekében került előtérbe. Jól érzékelteti a kutatási erőfeszítések nagyságát az, hogy a ma legkorszerűbbnek tekintett gyógyszerkibocsátó sztentek ára a megjelenésük idején (2005) darabonként 3000 USD volt, szemben az egyszerű, bevonat nélküli fémsztentek 800–1200 dolláros árával. A citosztatikus hatóanyagot polimer rétegekkel együtt viszik fel, amelyek tapadása a fémhez kellően erős, ugyanakkor képes a hatóanyag tartós megkötésére és fokozatos adagolására.

16.6.2. A sztentek főbb tulajdonságai

A sztentek gyártási módszerei is nagy fejlődésen mentek keresztül. A gyártástechnológia fejlődését – csakúgy, mint az alapanyagokét és a bevonatokét – igen erősen meghatározták a klinikai tapasztalatok. 30 évvel ezelőtt eléggé kezdetleges sztentek készültek (16-10. ábra): sok fém került az érbe, ami gyakran szövődményeket okozott, ezért elkezdték csökkenteni a sztentek anyagmennyiségét, a felület nagyságát és a vastagságot egyaránt.

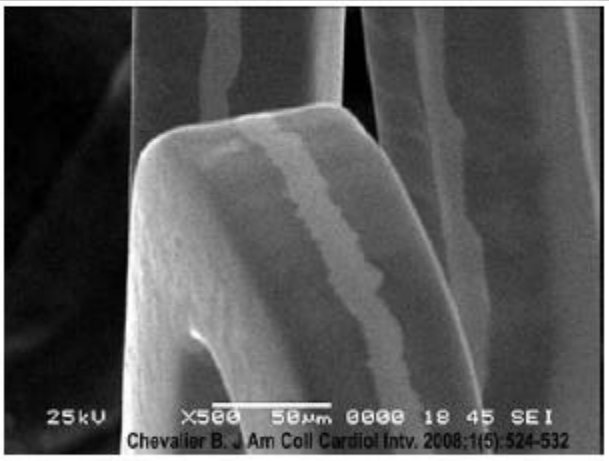


16-10. ábra – Az 1990-es évek elejének ballonos tágítású sztentjei. A jobb oldalon egy kapcsos huzalsztent, középen kezdetleges, lézersugaras vágású sztentek

– **A röntgensugár alatti láthatóság**

A beültetéskor a sztent helyzetét az orvos annak röntgenképe alapján tudja kontrollálni, ezért nagy jelentőséget játszik a sztent röntgensugár-elnyelő képessége. Minél nagyobb a sztent anyagának átlagos rendszáma, sűrűsége és vastagsága annál nagyobb mértékben nyeli el a röntgensugarakat, tehát jobban látható. Kezdetben úgy tűnt, hogy az aranybevonat diadalutat jár be a sztentek felületkezelésében: 5–10 mikron vastagságban galvanizálással hordták fel, viszont az ezredfordulóra gyakorlatilag megbukott, mivel az érvisszaszűkülések aránya megugrott.

Az implantátum vastagságának – ma ez átlagosan 70 mikrométer – folyamatos igényelt csökkenése lerontotta a láthatóságot. Ezt a vastagságcsökkenés okozta kedvezőtlen mellékhatást eleinte azzal védték ki, hogy Au-, Ta- és Pt-markereket hegesztettek a sztent végeire (Wilson-Cook: Zilver és Medtronic: Aurora). Ennél nagyobb horderejű megoldás egyfelől a már említett, platinával való ötvözést – a Pt rendszáma 78, így nagyon jó az elnyelő képessége –, másfelől pedig a réteges hibrid anyagok alkalmazása, az Abbott 16-11. ábrán látható Zomaxx sztentjénél (2006).



16-11. ábra – A Zomaxx sztent (2006) bordája oldalról; a középső réteg nagy röntgensugár-elnyelésű tantál

– **A sztent bordavastagsága**

A ballonos tágítású sztentek előgyártmánya az esetek döntő többségében cső, ritkán pedig huzal. A cső falvastagsága, a huzal átmérője szabja meg az ún. bordavastagságot, amely jelentősen kihat a szerkezeti szilárdságra, a hajlékonyságra, a visszarugózásra és a már tárgyalt láthatóságra.

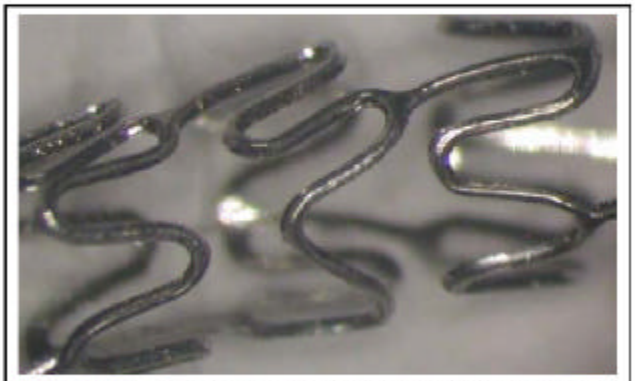
A bordavastagság csökkentése a legjelentősebb mértékben az ún. fémmel fedett felületet csökkenti. Klinikai tanulmányok igazolták, hogy a bordavastagság csökkentése kedvezően járul hozzá a sztenten belüli érvisszaszűkülés (in-stent restenosis) megelőzéséhez. A 16-12. ábrán a Medtronic cég Driver sztentjeinek példáján mutatja be a bordakeresztmetszet csökkenését.

16-12. ábra – A Driver sztent bordakeresztmetszetének változása, balról jobbra: 200-tól 90 µm-ig

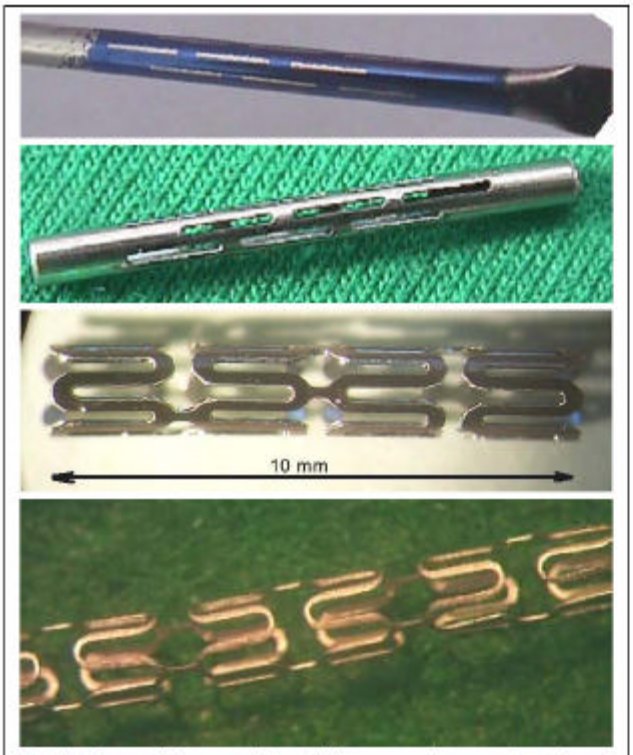
16.6.3. A sztentek gyártási módszerei

A sztentek megjelenésekor majd minden gyártó huzalból szőtt, sodrott vagy egyszerűen csak tekercselt típusokat készített. A ballonos tágítású, sztenteknél a huzal előgyártmányt gyakorlatilag már teljesen felváltotta a cső előgyártmány, amelyet lézersugaras vágással dolgoznak fel.

Az 1990-es évek végén az említett módszerek mellett unikálisnak számított az IVT sztent, amely fotolitográfiás és kémiai maratásos technológiával hozta létre a mintázatot csőből; a 16-13. ábrán látható, közvetlenül a ballonos tágítás utáni állapotában. A gyártást lézersugaras litográfiára alapozó fejlesztés fontos szakasza volt az e téren végzett hazai fejlesztőmunkának, és a 16-14. ábrán látható prototípusokig jutott 2002-ben.



16-13. ábra – A fotolitográfiás kémiai maratással 2004-ig gyártott IVT-sztent; a vágóballont is feltaláló magyar orvos, Baráth Péter találmánya

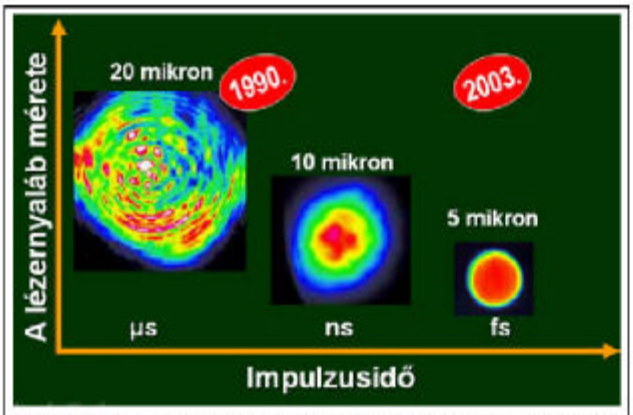


16-14. ábra – Lézeres-litográfiás, maratásos sztentek prototípusai; egy BME-s diplomázó magyar diák, Nyitrai Zsolt alkotása (2002)

– **A lézertechnológia jellemzői**

A lézersugaras vágás hosszú ideig nem tudott megfelelő felületi minőséget adni: a vágott felület erősen sorjás volt, és a túlhevülés is károsan befolyásolta a szövetszerkezetet. A felületminőségi problémákon felületkezeléssel részben lehetett segíteni, pl. elektropolírozással, de az igazi megoldást a lézertechnológia fejlődése hozta magával.

A lézertechnológia fejlődését szemlélteti a 16-15. ábra: a lézernyaláb fókuszálhatósága, a nyalábon belüli energiaeloszlás és az impulzusidő jelentős rövidülése ma már kiváló vágási felületeket biztosít, igaz, a felületkezelés itt sem hagyható el, és a korszerű berendezések költségei is jóval nagyobbak.

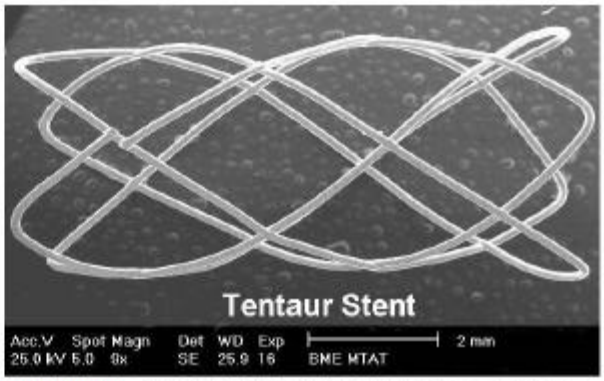


16-15. ábra – A lézersugárnyaláb jellemzőinek fejlődése

16.6.4. Sztentek fejlesztése Magyarországon

A világon ma is csak néhány nagy és néhány tucat közepes gyártó állít elő sztenteket. A világ fejlett országaiban a felhasználás beállt a ≈ 3000 db sztent / 1 millió lakos értékre. Egy sztent ára fajtától függően kb. 500–1500 USD.

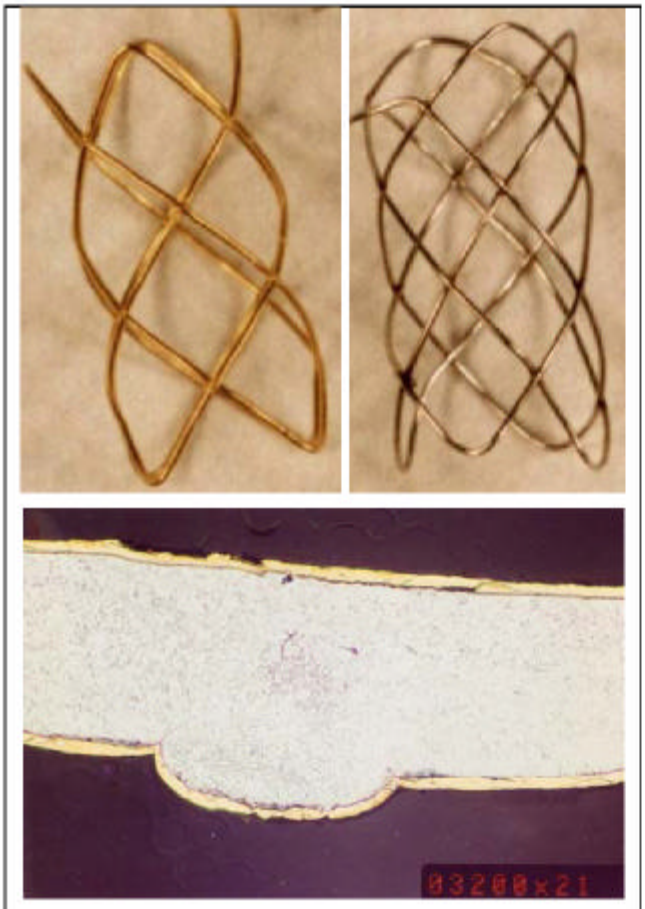
Magyarországon az 1995-től 2006-ig forgalmazott Tentaur sztent (16-16. ábra) éveken át az akkori világszínvonalú minőséget képviselte; egy magyar radiológus, *Major László* találmánya.



16-16. ábra – Az ellenállás-dudorhegesztéssel gyártott Tentaur sztent elektronmikroszkópos képe

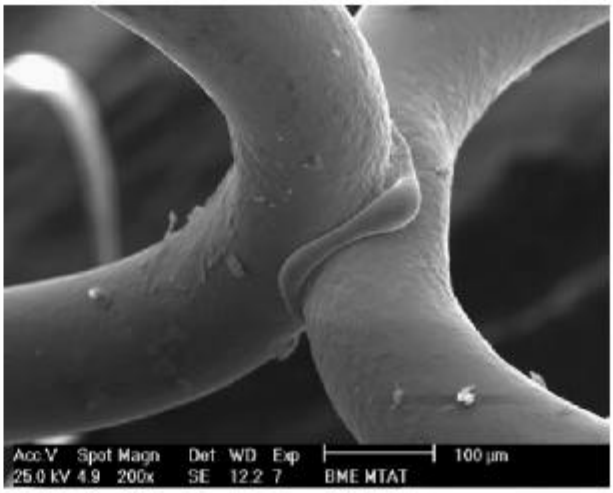
Az első Tentaur sztentek 1995-ben aranyhuzalból készültek, egyetlen huzaldarabból való hajlítással. Négy „koronája" volt a hengeres szerkezetnek, és a huzalkereszteződésekben lévő 17 db csomópont gázhegesztéssel volt rögzítve, amely műveletet a Pénzverdében végezték el. Az aranyat 1997-ben felváltotta az AISI 316LVM típusú ausztenites korrózióálló acél, 145 mikrométer átmérőjű huzal, amelyre aranybevonat került: (16-17. ábra). Az aranynak a visszaszűkülésben játszott szerepére vonatkozó nemzetközi viták fellángolásával a Tentaur sztentről is lemaradt az aranybevonat, noha egyáltalán nem mutatott kedvezőtlen hatást. 1998-tól 2006-ig a Tentaur sztent bevonat nélkül készült, de sok bevonatolási kutatás alanya volt.

A kör keresztmetszet kedvező, de a hegesztett szerkezet nem kellően flexibilis a hegesztett csomópontok merevítő hatása következtében. A flexibilitás hiánya különösen a hosszú sztenteknél okoz problémát, ugyanis könnyen „elakadhatnak" az erek görbületeiben. Erre ugyan megoldás a rövid sztentek egymás után való elhelyezése, de a felhasználó orvosok számára ez kényelmetlen, és meghosszabbítja a röntgensugár alatt töltött időt. A Tentaur sztent másik nagy hátránya az lett, hogy nem alakult ki a gyárilag ballonra szerelt változata. A folyamatos fejlesztések végére kialakult és több ezer betegbe beültetett utolsó termékcsalád tagjait mutatja a 16-18. ábra.



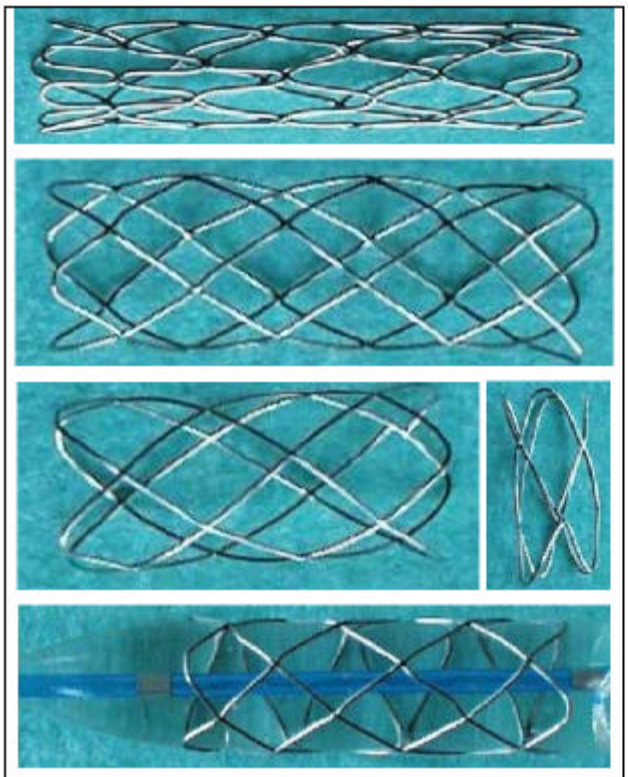
16-17. ábra – Aranybevonatos és a nélküli Tentaur sztent, valamint a hegesztési varrat metszete (1998).

Az arany mint alapanyag rozsdamentes acélra történő cserélésével a gázhegesztést az ellenállás-mikrodudorhegesztés váltotta fel (16-19. ábra).

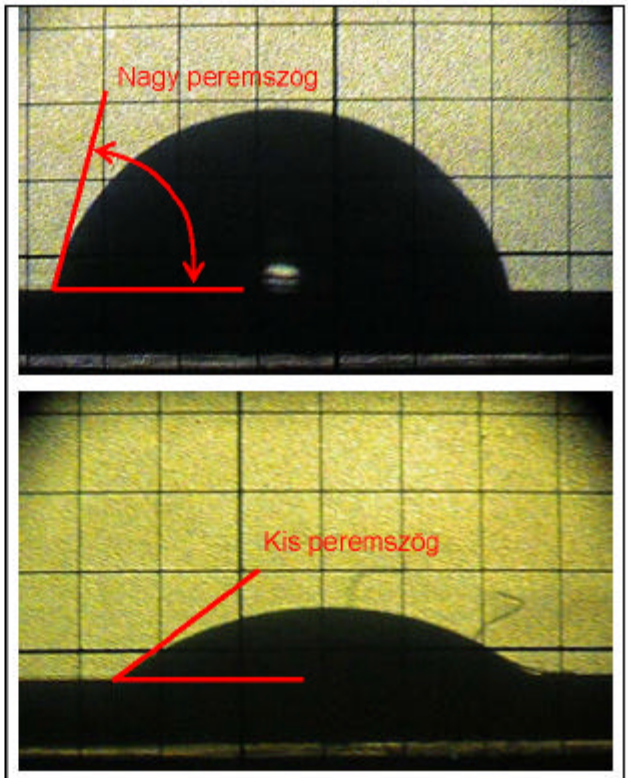


16-19. ábra – A Tentaur sztent egy dudorhegesztett csomópontja

A sztentek fémfelületének minősége az 1990-es évek közepén került a kutatások fókuszába. A klinikai tapasztalatok rámutattak, hogy a fémionok és a felületi kémiai potenciál erősen befolyásolja az érvisszaszűkülést, ám nem voltak egyértelműek abban a tekintetben, hogy a hidrofil, avagy a hidrofób felület kívánatos-e. A nedvesítési viszonyokra jelentősen kihat a felületkezelés, amint azt a 16-20. ábra érzékelteti.

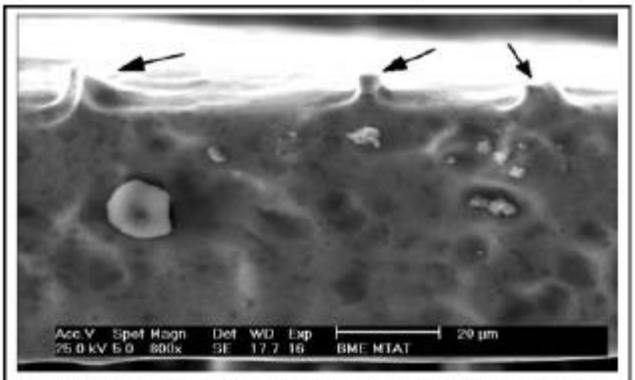


16-18. ábra – A Tentaur sztentcsalád tagjai, és egy ballonnal tágított TCS-14 sztent (2005)



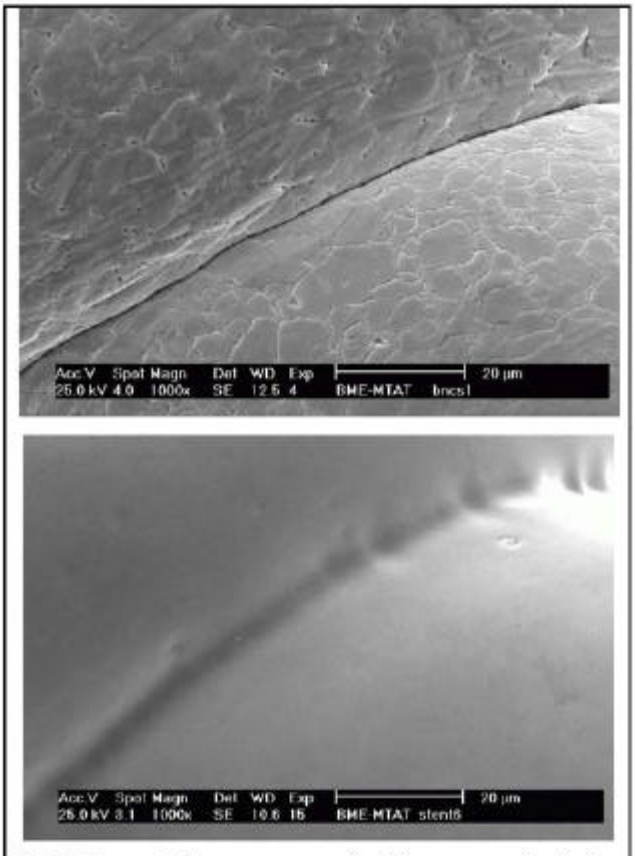
16-20. ábra – Vécsepp oldalnézeti képe szilikonnal bevont (fent) és bevonat nélküli (lent) felületen

Az érvisszaszűkülési arány terén a Tentaur sztentek sokáig lényegesen jobb eredményeket mutattak, mint az első generációs, lézersugaras vágású sztentek. Ennek a magyarázata a kör keresztmetszetben és a sima felületben volt kereshető, mert a lézersugaras vágású sztentek durva vágási hibáit nem tudták eltüntetni (16-21. ábra).



16-21. ábra – Visszamaradt felületi hibák első generációs lézervágott sztenten (1998)

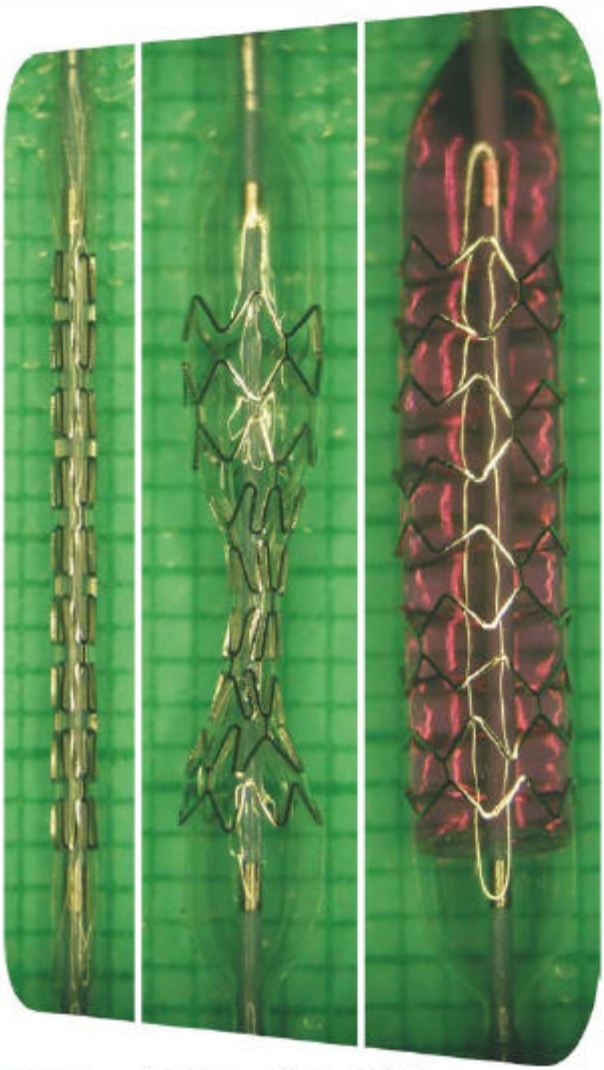
Tovább javította a klinikai eredményeket a Tentaur sztent gyártásában, a 2000-ben bevezetett elektropolírozás, amely a hegesztési varratok környezetében javította leginkább a felületi minőséget. A 16-22. ábra mutatja a sztent ugyanazon hegesztési varratát az elektropolírozás előtt és az után.



16-22. ábra – A Tentaur sztent dudorhegesztett kötésének összeolvadási határa polírozás előtt és az után

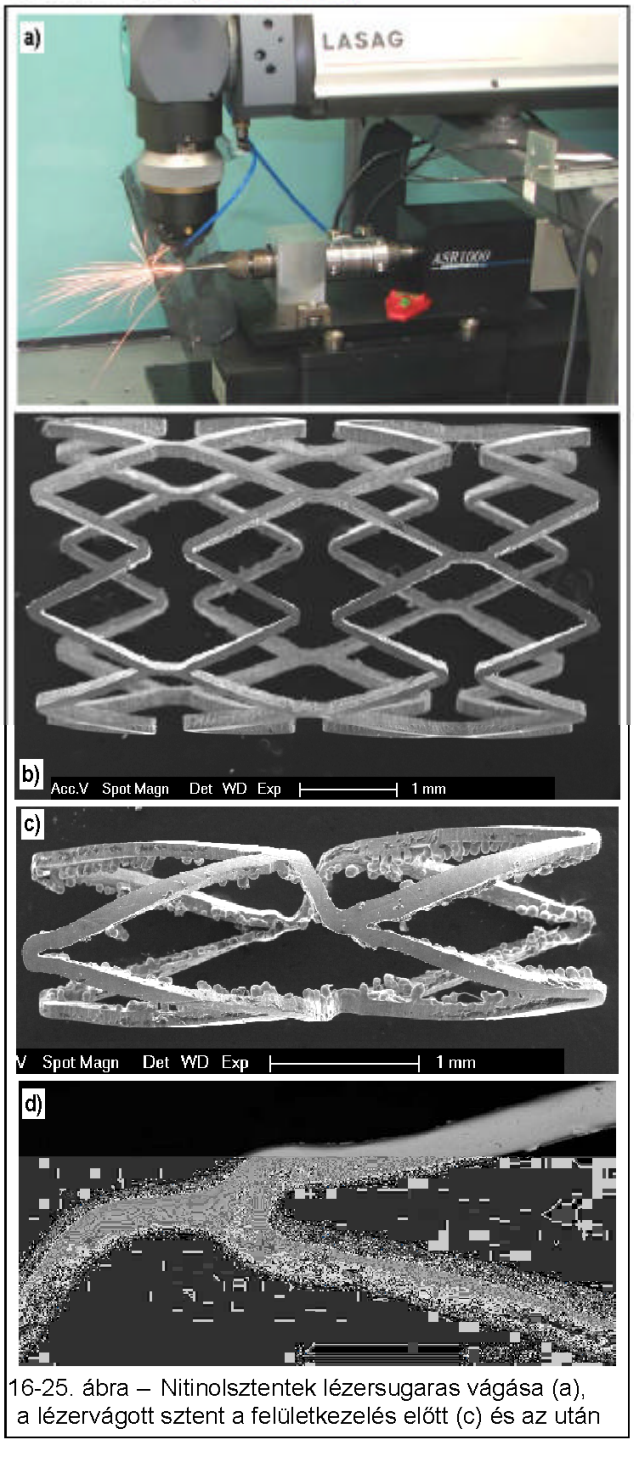
A kutató-fejlesztő munkának ebben a szakaszában másféltucatnyi bevonattípust dolgoztak ki, amelyeket ténylegesen létre is hoztak a sztenteken, és állatkísérletekkel tesztelték azokat. A bevonatok mindegyike passzív bevonat volt, és a galvanikusan felvitt fémrétegektől a PVD-, a CVD-eljárásokkal felvitt kerámiabevonatokon át a teflon-, az amorf szén és a gyémántszerű szén (DLC-) bevonatokig terjedt ((16-23. ábra).

16-23. ábra – A Tentaur sztent titán-nitrid bevonattal készült változata (2002).



16-24. ábra – A 2006-ban kifejlesztett, lézersugaras vágású Sanocor sztent feltágításának három fázisa

A dinamikusan bővülő sztentfelhasználás megkövetelte fejlesztésekből a lézersugaras vágási technológiára való váltást sikerült megvalósítani. Ennek eredménye lett a BME ATT-n felépített sztentfejlesztő laboratórium és a 2006-ban kifejlesztett Sanocor sztent (16-24. ábra). Mivel azonban a ballonra szerelt változat létrehozása nem járt eredménnyel, 2006-ban leállt a hazai gyártású sztentek humán célú felhasználása. A hazai sztentfejlesztés azonban továbbra is folyik, amelyben számos diák is jelentős és eredményes munkát végez (16-25. ábra).



16-25. ábra – Nitinolsztentek lézersugaras vágása (a), a lézervágott sztent a felületkezelés előtt (c) és az után

16.7. Az orvostechnikai titánötvözetek

Bioanyagként eleinte kétféle titánötvözetet alkalmaztak: a kereskedelmi tisztaságú titánt (ASTM F67), amely a fogászati implantátumok elterjedt anyaga, és az intersztíciós ötvözőkből (C, N, O) extra kis mennyiséget tartalmazó, kétfázisú, 6% Al + 4% V-mal ötvözött Ti-ötvözetet (ASTM F136). Az akár 0,10% C-et, 0,05% N-t és 0,40% O-t is tartalmazó titán mechanikai tulajdonságaira erősen kihat az említett intersztíciós szennyezők mennyisége. A szilárdságnövekedés mellett különösen hasznosnak mondható a kifáradással szembeni ellenállás akár 2–3-szorosára való növekedése a nagyobb oldottoxigén-tartalom miatt.

Az F67 szabványba sorolt négyféle titántípus (Grade 1, 2, 3 és 4) homogén alfa-fázist alkot, kristályrácsa legsűrűbben rakott hexagonális rács (HCP). Folyáshatára 30%-os hidegalakítás után sem éri el az 500 MPa-t, a kifáradási határa pedig a 300 MPa-t. Érdemes megjegyezni, hogy a 0,18%-ban maximált O-tartalmú Grade 1 minőségű titánnak alig 170 MPa a folyáshatára, míg pl. a Grade 4 minőségű titánnak a kifáradási határa eléri a 430 MPa-t. A tiszta és az ötvözött titán felületi oxidrétege névlegesen TiO_2, ám az állkapocs-implantátumok terén nyert tapasztalatok alapján régóta kutatják, hogy molekuláris és szöveti szinten miként hatnak a különféle Ti-oxidok az implantátum biológiai összeférhetőségére.

Ami az alkalmazásokat illeti, az ötvözetlen titánok a fogászati implantátumok (16-26. ábra) mellett a pészmékerek fémtokjának fő anyagai.

Az F136 szabvány Ti-6Al-4V ELI jelű ötvözete $\alpha+\beta$ kétfázisú rendszert alkot. Ha a hűtés gyors, az átalakulás martenzites vagy bénites, a kialakult szövet „kosárfonat” jellegű (16-27. ábra). Az ötvözeteket szinte soha nem hevítik a homogén β-fázis tartományába, csak lágyítják; ezért a jellemző mikroszerkezet finomszemcsés α-fázisból és szemcsehatármenti β-ból áll. A szilárdságot tekintve mindegyik mikroszerkezet közel azonos (900 MPa folyáshatár), a kifáradási határa azonban a tűs, lemezes morfológiájú fázisokat *nem* tartalmazó, lágyított ötvözetnek a legjobb.

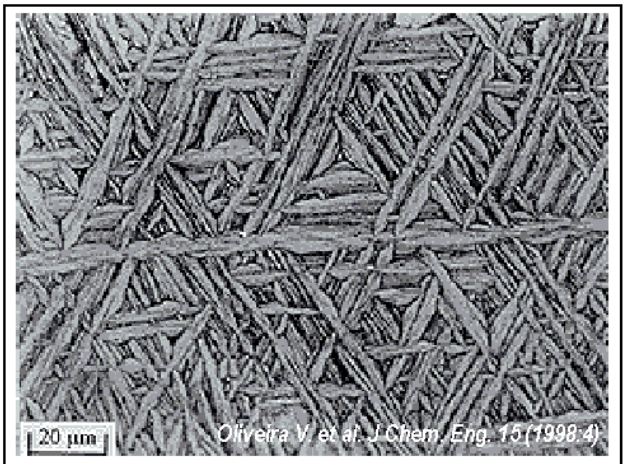
A Ti-6Al-4V ELI ötvözetnek létezik olyan változata, amelyben nem korlátozzák ennyire szigorúan az intersztíciós ötvözők – főleg az oxigén – mennyiségét; ezt a típust az ASTM F1472 szabvány definiálja. A kétfázisú ötvözetek körében számos további ötvözetet alkalmaznak implantátumok anyagaként, elsősorban ortopédsebészeti célra: az egyik legelterjedtebb a Ti–3Al–2,5V (F2146), a másik pedig a Ti–6Al–Nb (F1295).

16-26. ábra – Fogászati titánimplantátumok

A bioanyagokon belül a titánötvözetek körében is jelentősen bővült a választék: a két hagyományos típus mellett hasonló tulajdonságú változatok is megjelentek. Jelentősebbnek mondható az a lépés, hogy az α- és az α+βötvözetek mellett kidolgozták a homogén β-ötvözeteket is. Ennek mozgatórugója a még nagyobb szilárdság elérése volt: egyes típusok folyáshatára meghaladja az 1000 MPa-t. Az ortopédiai rendeltetésű, β-fázisú titánötvözetek a következők:

- Ti–13Nb–13Zr (F1713),
- Ti–12Mo–6Zr–2Fe (F1813),
- Ti–15Mo (F2066),
- Ti–15Mo–5Zr–3Al
- Ti–15Mo–2,8Nb–0,2Si–0,26O
- Ti–16Nb–10Hf
- Ti–35Nb–7,3Zr–5,7Ta

Természetesen a titánötvözetek egyik legismertebb csoportja, a bioanyagként is jelentős szerepet játszó Ti-Ni (vagy Ni-Ti) ötvözetek csoportja, amelyeket leginkább „Nitinol" néven ismernek és emlegetnek.



16-27. ábra – Kosárfonat jellegű martenzites szerkezet

A titán és a Ti-ötvözetek bioanyagos alkalmazásaiban a 16-4. táblázatban szereplő ötvözettípusok fordulnak elő a leggyakrabban.

Anyag meghatározása	Kereskedelmi név	ISO	ASTM
Ti CP-1 (alfa)	CP-1	5832-2	F 67
Ti CP-2 (alfa)	CP-2	5832-2	F 67
Ti CP-3 (alfa)	CP-3	5832-2	F 67
Ti CP-4 (alfa)	CP-4	5832-2	F 67
Ti-3Al-2.5V (alfa + béta)	Ti-3Al-2.5V	–	F 2146
Ti-5Al-2.5Fe (alfa + béta)	Tikrutan	5832-10	–
Ti-6Al-4V (alfa + béta)	Ti-6Al-4V	5832-3	F 1472
Ti-6Al-4V önthető (alfa + béta)	Ti-6Al-4V	–	F 1108
Ti-6Al-4V ELI (alfa + béta)	Ti-6Al-4V ELI	5832-3	F 136
Ti-6Al-7Nb (alfa + béta)	Ti-6Al-7Nb	5832-11	F 1295
Ti-15Mo (metastabil béta)	Ti-15Mo	–	F 2066
Ti-12Mo-6Zr-2Fe (metastabil béta)	TMZF	–	F 1813
Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn (metastabil béta)	Beta 3	–	AMS-T-9046
Ti-15Mo-5Zr-3Al (metastabil béta)	Ti-15Mo-5Zr-3Al	5832-14	–
Ti-13Nb-13Zr (metastabil béta)	Ti-13Nb-13Zr	–	F 1713
Ti-45Nb (metastabil béta)	Ti-45Nb	–	B 348
Ti-35Nb-7Zr-5Ta (metastabil béta)	TiOsteum	–	F-04.12.23

16-4. táblázat: Az implantátumok anyagaként használt ötvözetlen titánok és titánötvözetek anyagának meghatározása (első oszlop), kereskedelmi megnevezésük (második oszlop).
A harmadik oszlopban, az egyes sorokban megnevezett ötvözetekre vonatkozó európai ISO-szabvány száma, a negyedik oszlopban pedig az USA-ban használt ASTM-szabványos jele szerepel
(a CP rövidítés jelentése: commercially pure)

16.8. Az alakemlékező ötvözetek

Az előző szakasz végén említett Nitinol ötvözetek a legismertebb képviselői az alakemlékező ötvözetek igen különleges, de legalábbis nem szokványos tulajdonságú anyagcsoportjának. Mivel még a fémes anyagok terén laikusnak nem mondható szakmai körökben is meglepő félreértésekkel lehet találkozni (akár doktori értekezések védésén is), érdemesnek látszik röviden bemutatni az alakemlékező-anyagos témakör alapjait.

Előtte azonban, mintegy az előző szakasz szerves folytatásaként, áttekintjük az alakemlékező ötvözetek, különösen a Ni-Ti ötvözetek orvostechnikai, bioanyagos alkalmazásait.

16.8.1. A Nitiniol orvostechnikai alkalmazásai

Az orvostechnikai alkalmazásokban a Nitinol ötvözetek alábbi tulajdonságainak valamelyikét aknázzák ki:

- biokompatibilitás,
- hemokompatibilitás,
- biomechanikai kompatibilitás,
- MRI-kompatibilitás (a mágneses rezonancia vizsgálat mágneses tere nem hat rá),
- rendkívüli hajlékonyság,
- szuperrugalmasság,
- megtöréssel szembeni ellenállás,
- rugalmas visszalökés,
- állandó terhelés leadására való képesség (a fogszabályozó ívek legfontosabb jellemzője),
- rugalmas feltágulás,
- dinamikus interferencia, vagyis feszültségi hiszterézis a terhelés felvétele és a terhelés megszűnése ciklusban,
- termikus hatásra való alakváltozás, feltágulás,
- termikus alakemlékezés.

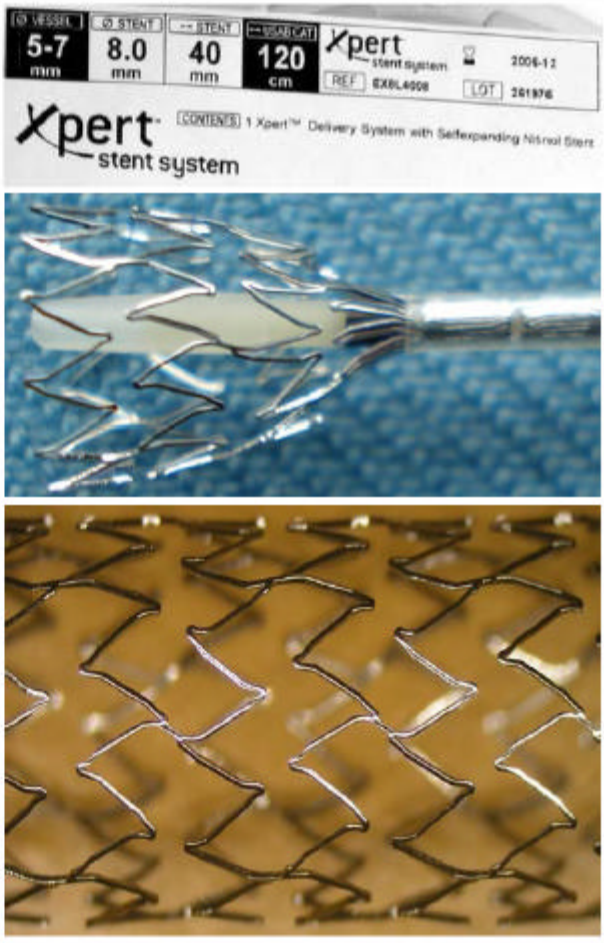
A Nitinol szuperrugalmas tulajdonsága és biokompatibilitása széleskörű orvostechnikai alkalmazást tesz lehetővé. A fogászati gyökérkezelő tűknél nagyon hasznos a szilárdság és a hajlékonyság. A Nitinol fogszabályozó ívek voltak szinte az első gyakorlati alkalmazásai ennek az anyagnak. Nagy előnye a Nitinolnak, hogy a száj hőmérsékletén már ausztenites fázisúvá átalakuló huzalív az egész kezelés során egyenletes terheléssel nyomja (helyére) a fogakat, mivel széles a rugalmas alakváltozási tartománya.

16.8.2. Nitinol anyagú sztentek

A sztentek – amelyekről már több, korábbi szakaszban is esett szó – az emberi test különféle „csőszerű vezetékeinek", pl. verőerek, vénák stb., a megerősítésére szolgálnak. E különleges endoprotéziseknek az egyik fontos alapanyaga a Nitinol. Komplex mintázatukat általában lézersugaras vágással alakítják ki, cső előgyártmányból. A felületet elektropolírozzák, így akár 0,1–0,3 μm-es felületi érdesség is elérhető.

A kivágott és polírozott Nitinolsztenteket a homogén ausztenites fázis alsó határát jelentő A_F hőmérséklet fölé hevítve formázzák a működés alakjukra. Ezt követően többnyire jeges vízben lehűtve kilágyul, mivel az ausztenites fázis átalakul martenzitté. Ekkor könnyen összenyomható, szinte teljesen rugalmatlan. Ebben az állapotában egy szoros, vékony, műanyag vezetőcsőbe helyezik a sztentet, csomagolják és sterilizálják. Szobahőmérsékleten már ismét ausztenites állapotba kerül, de a vezetőcső nem engedi kitágulni.

A műtét során az érintett érszakaszba tolják a vezetőcső végét, és egy szerkezettel kitolják a sztentet, miközben az feltágul az eredeti formázott alakjára (16-28. ábra). Az átmérője jelentősen megnő, ezzel megtámasztja, kitágítja az eret, de a hosszúsága erősen lecsökken. Az így kitáguló értágítóbetétet azért nevezzük öntáguló sztentnek, mert a saját rugalmassága miatt nyílik ki.



16-28. ábra – Abbott Xpert öntáguló nitinolsztent egy szakasza a vezetőcső lehúzása közben, és az után

Az elektropolírozás kitűnő minőségű felületet biztosít – amint ez a 16-29. ábrán látható –, de nem egyszerűen csak eltünteti az éleket, csúcsokat, gödröket, amelyek a 16-25. ábrán jól látszanak, hanem lényegében teljesen új felületet hoz létre. Az elektrokémiai folyamat közben a felületen kialakul egy védő oxidréteg, amely kb. 2–5 nm vastagságú, és ez biztosítja a kiváló korróziós ellenállást és biokompatibilitást. A legkülső oxidfilm kémiai összetétele szinte azonos a tiszta titán felületén keletkező TiO_2 rétegével, így a felületen a Ni-tartalom gyakorlatilag nulla.

16.8.3. Vezetődrótok

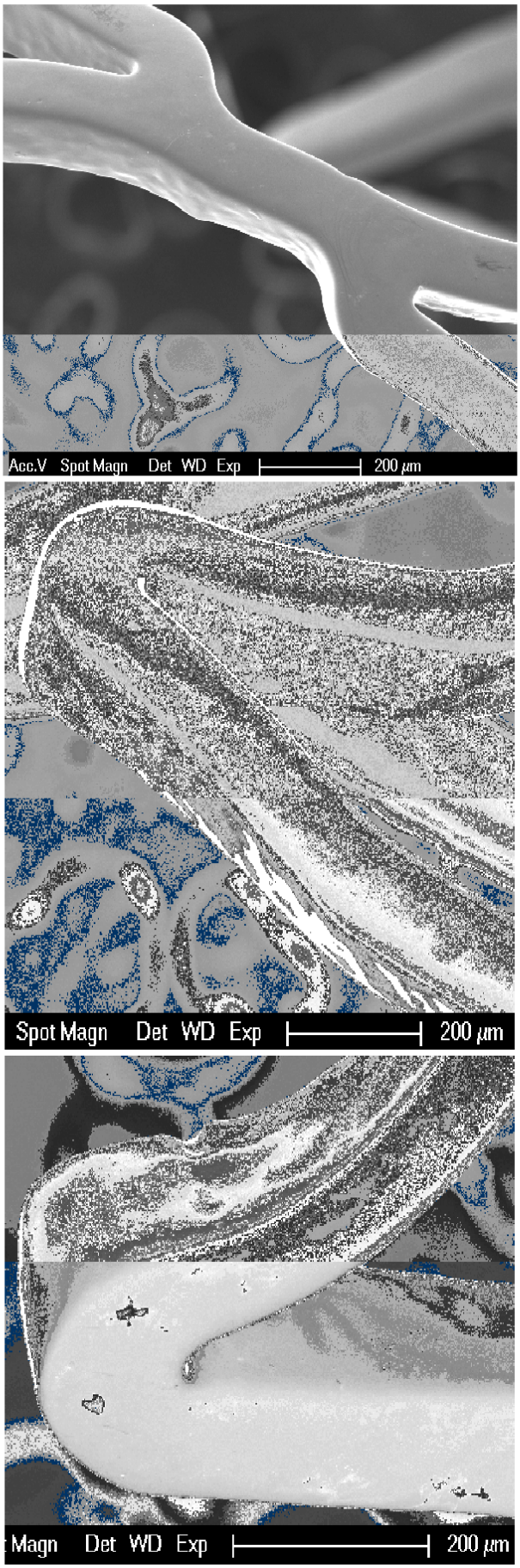
A vezetődrótok a katéteres vizsgálatok fontos kellékei. Az érszűkületek, érelzáródások kimutatására szolgáló érfestés (angiográfia) és az értágítás (angioplasztika) kezdetén a megszúrt érben egy kanülön keresztül vezetődrótot tolnak fel. Ez a vezetődrót vezeti fel a többi vizsgálati vagy terápiás eszközt, pl. a ballonos tágítású sztentet hordozó ballonkatétert is. A szuperrugalmas Nitinol lényegesen alkalmasabb erre a célra, mint a rozsdamentes acél vagy a titán, ugyanis alakját könyökképződés, megtörés nélkül megőrzi az intenzív forgatással, tekeréssel, ki-be húzogatással járó kezelés közben is.

A vezetődrótok általában 190 vagy 300 cm hosszúságúak, és 350 mikron átmérőjű huzalból készülnek. A vezetődrótok felületén a huzalgyártási folyamatban, a gyémánt húzóköveken való áthúzáskor ellenőrzött vastagságú (50–400 nm), nagy ellenállású, sárgásbarna vagy fényes fekete oxidréteget hoznak létre.

Gyakori, hogy az elülső véghez rozsdamentes acélból készült szárat hegesztenek, így takarékoskodva a meglehetősen drága Nitinollal. Ilyenkor Nitinolból csak a vezetődrót elülső szakaszát, egy kb. 400 mm-es szakaszt készítik, amelyen különleges végződést alakítanak ki: csúcs nélküli köszörűn végzett megmunkálással lépcsősen kihegyezik a vezetődrót végét, és erre kívülről huzalspirált helyeznek fel, ezzel is fokozva a hajlékonyságot.

A Nitinol lézersugaras hegesztését más esetben is alkalmazzák, pl. az artroszkópos sebészeti műtétekben használt mikrocsipeszek szárának toldására. Maguk a mikrocsipeszek úgy készülnek, hogy a Nitinol huzalt a hossza mentén, cikcakk vonal mentén, huzalos szikraforgácsolással felhasítják egy szakaszon.

A vezetődrótokat, ezeket az egyébként egyszer használatos eszközöket, a világon évente tízmilliós nagyságrendben használják.



16-29. ábra – Abbott Xpert sztent bordázatának részletei

Az orvostechnikában a Nitinolok többféle típusa használatos. Az 55 és 56% közötti Ni-tartalom egészen csekély változása is jelentősen befolyásolja az AF (ausztenit finis) hőmérsékletet, amelyen a szerkezet tisztán ausztenites fázisú lesz; ezt világosan ki lehet olvasni a 16-5. táblázatból, amelynek harmadik oszlopában az 50% ausztenit kialakulásához tartozó AP hőmérséklet szerepel. Az AP az a hőmérséklet, amelyen hevítéskor 50% ausztenit jön létre.

Az S, N és C jelű ötvözeteket szuperrugalmas állapotban alkalmazzák. Az M és H jelű ötvözetekből készítik a tipikus alakemlékező alkatrészeket, a B jelű mindkét feladatra egyaránt megfelel.

Jel	AF (°C)	AP (°C)	Összetétel tömeg%	Alkalmazás
S	10–20	(–5)–15	~55,8 Ni	OR, SB, FG
N	0–20	–20–(–5)	~56,0 Ni	VD, TG
C	0–10	–20–(–5)	~55,8 Ni, 0,25 Cr	ST, FH
B	20–40	15–35	~55.6 Ni	ST, SZ
M	45–95	45–95	~55,1 Ni	AK
H	95–115	< 95	< 55.0 Ni	AK

AK = működtetők, FG = fogszabályozó huzalívek, FH = finom huzalok, OR = ortopédiai eszközök, SB = sebészeti eszközök, ST = sztentek, SZ = szűrők, TG = tágítók, VD = vezetődrótok

16-5. táblázat: Az egyszerű (kétalkotós vagy ötvözetlen) Nitinol ötvözetek fő típusai és alkalmazási területei

16.8.4. A kereskedelmi Nitinol ötvözetek

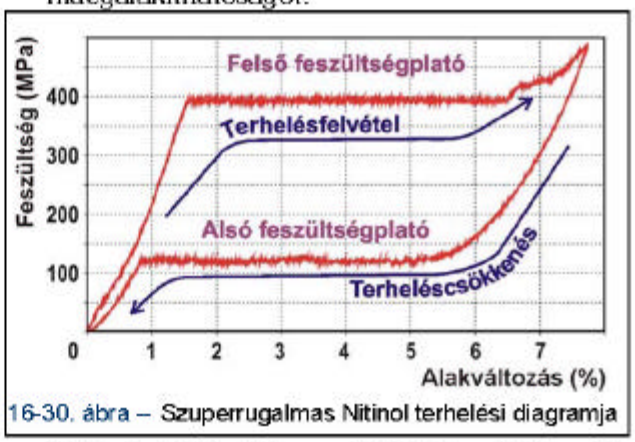
A kereskedelmi forgalomban a rendeltetés szerinti felosztást kedvelik, amely szerint három főbb csoportra osztják a Nitinolokat.

- *1. Testhőmérsékleti ötvözetek*
  Ezeket az ötvözeteket úgy hozták létre, hogy 37°C-on teljesen ausztenites fázisúak és így szuperrugalmasak legyenek.
- *2. Szuperrugalmas ötvözetek*
  Olyan ötvözetek, amelyek ausztenitesek és szuperrugalmasak már szobahőmérsékleten, a huzalhúzás hőmérsékleten. Alakváltozás-feszültség diagramjuk a 16-30. ábrán látható.
- *3. Nagyszilárdságú ötvözetek*
  Nagyobb a Ni / Ti arány, szobahőmérsékleten is ausztenitesek és szuperrugalmasak, mégpedig nagyobb feszültségen alakul ki a szuperrugalmasság jellegzetes feszültségplatója.

A Nitinolt általában kétkomponensű ötvözetnek tekintik. A szennyezői a C, O és Fe, mindháromra 0,05% a megengedett érték. Emellett ötvözőket is tartalmaznak egyes típusaik, nyilvánvalóan valamilyen kívánatos cél elérése érdekében.

Az ötvözöttség alapján a klasszikus, kétkomponensű típusok mellett gyártanak három és négykomponensű Nitinolokat is. A leggyakrabban használtak a következők:

- Ni-Ti + Cr: a legfeljebb 1% króm növeli a szuperrugalmas ötvözet feszültségplatóját.
- Ni-Ti + 6,0% Cu: a réz csökkenti az átalakulási hőmérsékletet és mechanikai hiszterézist az alakemlékező ötvözetben. A mechanikai hiszterézis a 16-31. ábrán a felső és az alsó feszültségplató különbségét jelenti.
- Ni-Ti + 1,6% Fe: szuperrugalmas ötvözet, amelyben a vas javítja a hidegalakíthatóságot, és stabilizálja az ún. R-fázis képződésével járó martenzites átalakulást.
- Ni-Ti + 3,4% Fe: szuperrugalmas ötvözet. A vas lecsökkenti az átalakulási hőmérsékletet a kriogén hőmérsékleti tartományba, és javítja a hidegalakíthatóságot.



16-30. ábra – Szuperrugalmas Nitinol terhelési diagramja

A Flexinol-70 márkanevű Ni-Ti huzal jellemzőit a 16-6. és a 16-7. táblázat mutatja. A vezetődrótoknál már említett felületi minőséget tekintve a gyártók többféle felülettel szállíthatják a legfőképpen huzal, szalag és cső termékeket.

- Kemény fekete oxid. Az oxidréteg a huzalgyártás közbenső lágyításai során alakul ki. Általában vastagabb, mint 80 nm, sima és erősen tapad, nem letörölhető.
- Letörölhető fekete oxid. Vastagabb oxidréteg jön létre a huzalgyártási folyamat közbenső hőkezelései során. E réteget könnyebb eltávolítani a későbbi feldolgozás érdekében.
- Fényes oxid (más néven borostyánsárga). Ez a réteg vékonyabb, mint 10 nm, gyakran választják az orvosi eszközök anyagaihoz, mert nagyon tiszta, és könnyen eltávolítható, maratással vagy elektropolírozással.
- Pácolt (savas pácolással tisztított). A pácolás oxidmentes felületet biztosít.
- Polírozott. Mechanikai (pasztás) polírozás vagy elektropolírozás után alakul ki a fényes, fényvisszaverő, polírozott felület.

Névleges átalakulási hőmérséklet	70°C
A_s (aktiválási) hőmérséklet	68°C
A_f hőmérséklet	78°C
M_s (relaxációs) hőmérséklet	52°C
M_f hőmérséklet	42°C
Lágyítási hőmérséklet	540°C
Olvadáspont	1300°C
Sűrűség	645 g/cm^3
Maximális alakváltozás	8%
Ajánlott alakváltozás	3–5%
Young-modulus	28 GPa

16-6. táblázat: A Flexinol-70 Ni-Ti huzal fő tulajdonságai

Huzalátmérő		50 μm	250 μm
Minimális hajlítási sugár	mm	2,5	12,5
Ellenállás	Ω/m	510	20
Ajánlott fűtőáram	mA	50	1000
Ajánlott teljesítmény	W/m	1,28	20,0
Max. visszaállási erő	N	1,147	28,763
Ajánlott visszaállási erő	N	0,343	9,12
Javasolt alakítási erő	N	0,078	1,687
Minimális reakcióidő	s	0,1	0,1
Relaxációs idő	s	0,3	5,5
Tipikus ciklussebesség	1/min	46	9

16-7. táblázat: A Flexinol-70 típusú huzal tulajdonságainak változása a huzalátmérő függvényében

16.8.5. Az alakemlékező ötvözetekről általában

Az alakemlékező ötvözet megnevezés azon fémes anyagok megjelölésére szolgál, amelyek a hőmérséklet-változás hatására képesek valamely előzetesen meghatározott alakot vagy méretet felvenni, ha előtte megfelelő hőkezelésnek vetik alá őket. Kis hőmérsékleten képlékenyen jól alakíthatók, majd egy relatíve nagyobb hőmérsékleten visszanyerik az alakváltozás előtti alakjukat, és közben jelentősen keményednek.

Az alakmemória jelenségének első megfigyelése *Arne Ölander* nevéhez fűződik. Miként ő 1932-ben, *L.C. Chang* és *T.O. Read* is Au-Cd ötvözetet vizsgáltak 1950-ben, akik az In-Ti ötvözetek alakemlékező tulajdonságát is felfedezték. 1938-ban sárgarézen is megfigyelték az alakmemória jelenséget, ám széleskörű tanulmányozása csak 1962-től kezdődött, amikor teljesen véletlenül fedezték fel W.J. *Buehler és társai* a Ni-Ti övözetek alakemlékező tulajdonságát az USA haditengerészeti tűzérségi kutatóintézetében (US Naval Ordnance Laboratory). Itt keresztelték el ezt az ötvözetet „Nitinol" névre az alábbiak szerint:

Ni = Nickel, Ti = Titanium, N = Naval, O = Ordnance, L = Laboratory

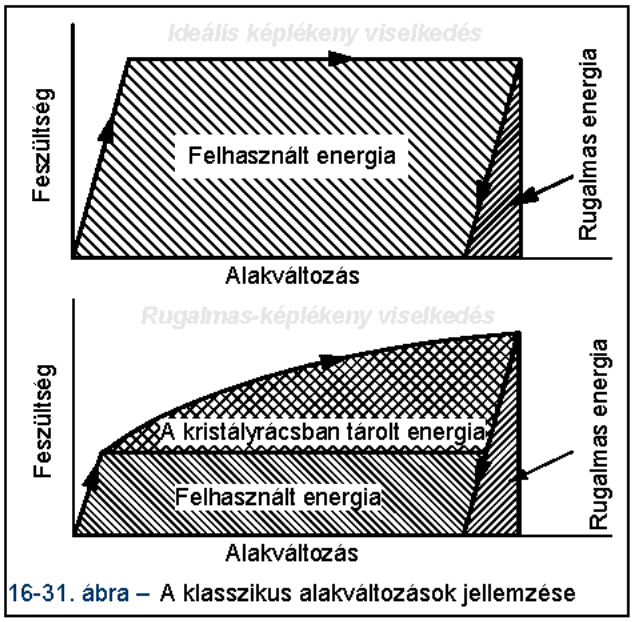
Az *alakmemória*, ez a különleges mechanikai, pontosabban termomechanikai tulajdonság, a martenzites átalakulással áll szoros kapcsolatban, amely az alakemlékező ötvözetekben oda-vissza képes lejátszódni, mind hevítéskor és hűtéskor, mind pedig mechanikai feszültség és annak megszűnése hatására. A martenzites átalakulás – *M. Cohen* meghatározásában – rácstorzulással végbemenő, diffúzió nélküli fázisátalakulás, amelyhez oly módon társul egy alakváltozás, hogy a folyamat sebességét és a termék morfológiáját az alakváltozási energia határozza meg. Ha az alakváltozás a rugalmas tartományban marad, az átalakulást „termoelasztikusnak" nevezzük, és az anyagnak figyelemre méltó tulajdonságai lesznek: az alakmemória és a szuperrugalmasság.

– Az alakemlékező ötvözetek termomechanikai tulajdonságai

Az alakváltozásra képes klasszikus szilárd anyagok egyszerű alakváltozásai a következők:

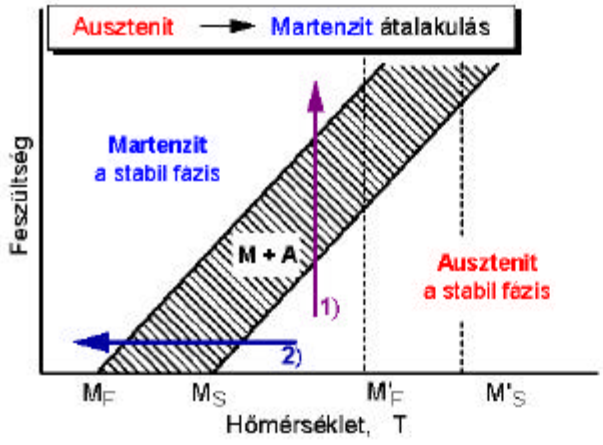
- rugalmas alakváltozás,
- képlékeny alakváltozás,
- anelasztikus (viszkózus) alakváltozás.

Amely szilárd anyagok képesek akár egyidejűleg is a fenti alakváltozásokra, azok a viszkoelaszto-plasztikus, elasztoplasztikus stb. anyagok. Ezekhez az alakváltozásokhoz kapcsolódik még a hőtágulás (lineáris termoelaszticitás). Az ideális képlékeny alakváltozásnál a külső erők munkája teljesen az alakváltozásra használódik fel (hővé alakul), míg az alakítási keményedéssel járó rugalmas-képlékeny alakváltozásnál a munka egy része a kristályrács szabadenergiáját növeli, pl. a diszlokációsűrűség növelésével (16-31. ábra).



16-31. ábra – A klasszikus alakváltozások jellemzése

Az alakemlékező ötvözeteknek jelentősen eltérők az alakváltozási jellemzőik az előbb bemutatottaktól. Termomechanikai tulajdonságaikat a fázisátalakulási állapotdiagram jellemzi. Attól függően, hogy milyen σ–T vonal mentén megy végbe hűtéskor az ausztenit → martenzit átalakulás – vagyis hogyan lépjük át a 16-32. ábrán) az $M_SM'_S$ és az $M_fM'_f$ vonalakat, egészen eltérő ε(σ), valamint ε(T) alakváltozások jöhetnek létre.



16-32. ábra – Az alakemlékező ötvözetekre jellemző ausztenit-martenzit fázisátalakulási állapotdiagram

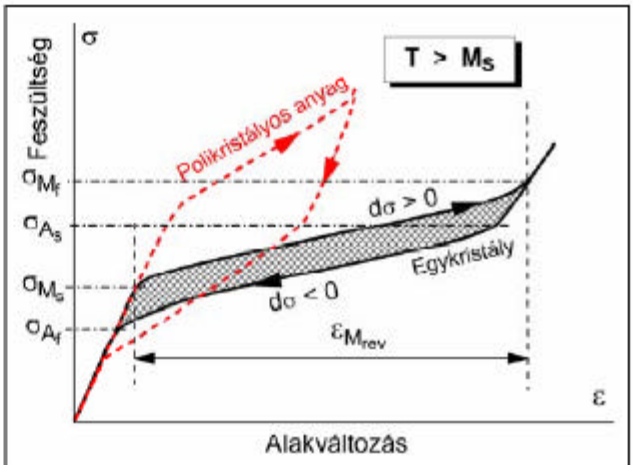
Ezek az alakváltozások 5 fő csoportba sorolhatók, melyek a következők:

- szupertermoelaszticitás (másként: szuperrugalmasság vagy pszeudoelaszticitás),
- egyutas alakmemória,
- kétutas alakmemória,
- a gumiszerű viselkedés,
- csillapítóhatás.

– A szuperrugalmasság

Az első alakmemória jelenség a szuperrugalmasság (másként: szupertermoelaszticitás vagy pszeudoelaszticitás), amely az a tulajdonsága az anyagnak, hogy nagy, több % mértékű, reverzibilis alakváltozásra képes. Két altípusa lehetséges. Az első altípus az izotermikus folyamat (a 16-32. ábrán, az állapotdiagramon az 1. nyíl jelöli), és általában ezt nevezik szuperrugalmasságnak. A másik altípus az állandó (de nem nulla!) feszültségen végbemenő szupertermikus viselkedés (2. nyíl), amelyet gyakran neveznek – kissé pontatlanul – alakemlékezésnek.

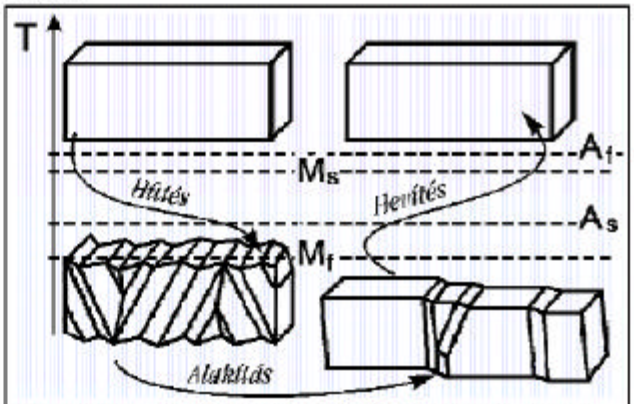
Az első altípust megvizsgálva, az alakváltozás a 16-33. ábrán a σ_{M_s} értékig rugalmas. A σ_{M_s} és a σ_{M_f} közti deformációt a jellemzően ikerképződéssel járó martenzites átalakulás okozza. A σ_{M_f} -nél nagyobb terhelés a martenzites fázis képlékeny alakváltozását idézi elő. A terheléslevételi görbe ugyanolyan alakú, mint a terhelésfelvételi, de hiszterézissel játszódik le az ausztenites fázis visszaalakulása. A feszültség indexelésében az **M**, ill. az **A** az éppen keletkező fázisra utal, az **s** a kezdet (start), az **f** a befejeződés (finis) jele. Az $\varepsilon_{M_{rev}}$ érték a maximális reverzibilis alakváltozás mértéke: egykristályoknál ez akár 10% is lehet, polikristályoknál 3–8%, és utóbbiaknál a görbe „töréspontjai" sem igazán határozottak. A növekvő hőmérséklettel az egész alakváltozási hurok értelemszerűen felfelé tolódik.



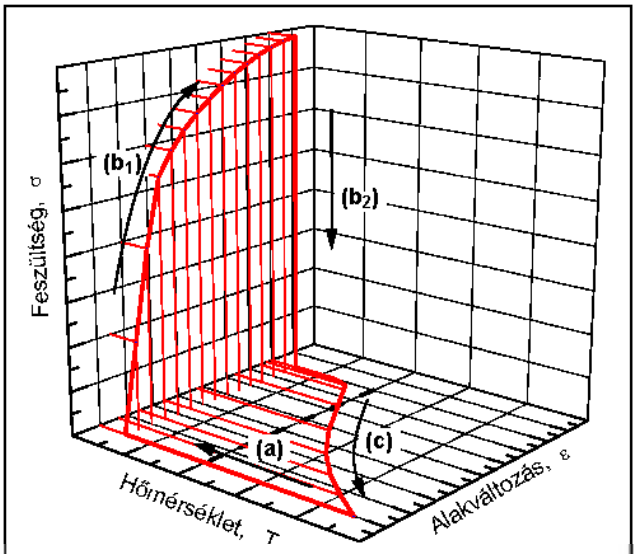
16-33. ábra – Egykristályos memóriaötvözet alakváltozási diagramja (szaggatott vonal: polikristályos anyag)

– Az egyutas alakmemória jelensége

A második alakemlékezési jelenség az egyutas alakmemória, amely az olyan alakemlékező ötvözetek jellemzője, amelyek csak hevítéskor mutatnak alakemlékező tulajdonságot. E viselkedés lényege, hogy a kis ($T < M_f$) hőmérsékleten alakított alkatrész az átalakulási hőmérsékletet átlépve visszanyeri eredeti alakját, adott esetben rövidülhet is a hevítéskor (16-34. ábra). Az egyutas alakmemória termomechanikus ciklusát a 16-35. ábrán, a három fő hatótényező változását (T, ε és σ) egyszerre tartalmazó diagramon szemléltetjük.



16-34. ábra – Az alakmemória jelenség vázlata. Az A_f hőmérséklet felett az anyag ausztenites fázisú, az M_f alatt pedig martenzites. Az alakítatlan martenzit számos, eltérő fajtájú ikret tartalmaz, az alakítás ezek valamelyikét „kitüntetett" helyzetbe hozza a többi rovására

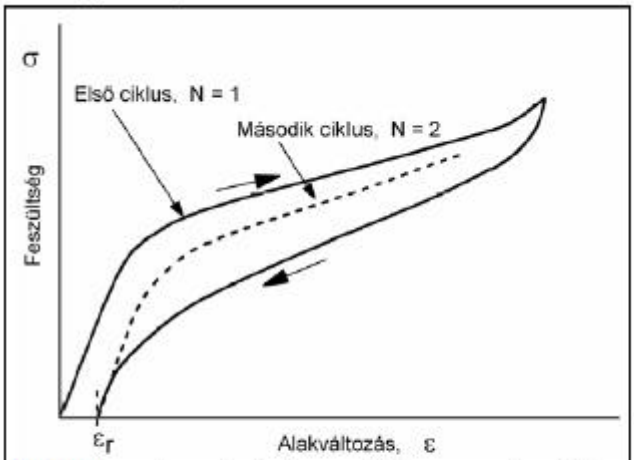


16-35. ábra – Az egyutas alakemlékezés háromparaméteres ábrázolású termomechanikai ciklusa.
(a) – Hűtés az ausztenit → martenzit átalakulási hőmérséklet alá; terhelés = 0.
(b1) – Állandó hőmérsékleten ($T < M_f$) növekedik a terhelés; a martenzit kristályrácsa átrendeződik.
(b2) – Változatlan hőmérsékleten 0-ra csökken a terhelés
(c) – Terhelés = 0; hevítés a martenzit → ausztenit átalakulási hőmérséklet (A_f) fölé

Ez a martenzites átalakulás nagyban különbözik a „hétköznapi" ötvözeteknél megismerttől. A mindkét irányba martenzites típusú fázisátalakulás reverzibilis alakváltozással jár együtt. Az ausztenit többféleképpen is át tud alakulni martenzitté, mivel ez utóbbi fázis szerkezete kisebb szimmetriát mutat, ugyanakkor a martenzit csak egyféleképpen alakulhat át ausztenitté. Voltaképpen ez a körülmény az alakemlékezési tulajdonság alapvető lényege. Az ausztenites fázisból való hűtéskor az ikresedett martenzitnek – a saját *jellegzetes síkjának* orientációja szempontjából – különféle változatai jönnek létre. Az alakítás az ikerhatárok elmozdulását kényszeríti ki, valamely kitüntetett változat (egy bizonyos orientációjú jellegzetes sík) javára. Végső soron tehát, az ikerhatárok elmozdulásából származó alakmódosulás eredete a martenzites rács kisebb szimmetriájában leledzik. Amikor helyreáll a nagyobb szimmetriájú ausztenites rács, a korábbi alakváltozásnak el kell tűnnie.

– A kétutas alakmemória jelensége

A harmadik alakemlékezési jelenség a kétutas alakmemória. A szupertermoelaszticitás előbb vázolt jelensége csak első közelítésben tekinthető alakemlékezési viselkedésnek egy termikus plusz mechanikai ciklusban. A gyakorlati tapasztalat szerint, az első ciklus után nem áll vissza az eredeti alak, egy ε_R maradó alakváltozás mérhető a darabon (16-36. ábra). Kiváltó okai az anyag belső szerkezetváltozásaival függnek össze: pl. maradék martenzit képződése, diszlokációsűrűség növekedése. Többször megismételve a termomechanikai ciklust, az összegzett ε_{RK} maradó alakváltozás növekedik ugyan, viszont egy adott ciklusszám körül ez a növekedés leáll, telítődik a folyamat. Ilyenkor mondják azt, hogy az anyagot betanították. A betanítás egy sajátos belső feszültségeloszlást hoz létre, amely mindig ugyanazt a martenzites átalakulási változatot biztosítja. Ebből adódóan egy egyszerű, külső feszültség nélküli hűtés is kiváltja az átalakulás okozta alakváltozást. Ez a kétutas alakmemória hatás megfelel a szupertermikus viselkedésnek, ám az ottani állandó külső feszültséget jelen esetben a betanítás létrehozta belső feszültségek helyettesítik.



16-36. ábra – A csak részleges alakvisszanyerés miatt kialakuló kezdeti maradó alakváltozás szemléltetése

– A gumiszerű viselkedés

A negyedik alakemlékezési jelenség a gumiszerű viselkedés. A belső fázishatárok és ikerhatárok mozgása a feszültségtől függően lehet reverzibilis és irreverzibilis. Amennyiben a mozgás reverzibilis, a makroszkopikus alakváltozás egy rugalmas alakváltozásból és egy reverzibilis határfelület-mozgásból tevődik össze, amely adott esetben nagyobb, mint a közönséges rugalmas tag. Ilyenkor beszélünk az anyag gumiszerű viselkedéséről.

– A csillapítóhatás

Az ötödik alakemlékezési jelenség a csillapítóhatás. A mechanikai csillapítást vagy belső súrlódást, az okozza, hogy a mechanikai energia irreverzibilis módon alakul át hővé. Az alakemlékező anyagokkal mechanizmusukat tekintve háromféle csillapítóhatás érhető el:

- Ausztenites állapotban a belső súrlódás a reverzibilis diszlokációmozgás eredménye, a csillapítási tényező: $1/Q \approx 10^{-4}$.

- Martenzites állapotban a csillapítást a martenzit-martenzit határfelületek reverzibilis mozgása okozza, $1/Q \approx 10^{-3}$.
- Végül a fázisátalakulás közben a legnagyobb a belső súrlódás: ekkor az ausztenit-martenzit fázishatárok mozgása a meghatározó: $1/Q \approx 10^{-2}$.

16.8.6. További humán alkalmazások

– **Jóléti és divatkellékek**

A szemüvegkeretekhez az alakemlékező ötvözetek szuperrugalmas tulajdonságát használják ki. A nagy szilárdsággal a műanyagokét meghaladó hajlékonyság párosul. A szemüveg szárát és a nyergét szinte az ujja köré csavarhatja a gazdája (16-37. ábra).

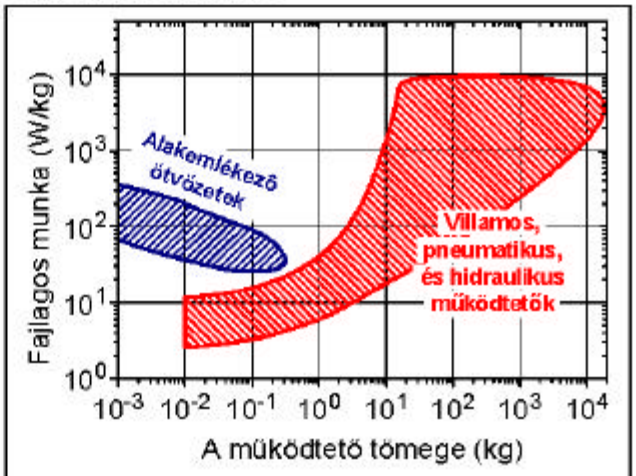
A rendkívüli hajlékonyságot eredményező szuperrugalmasság miatt közkedvelt alapanyagnak számítanak az alakemlékező ötvözetek a női öltözködés területén: a különleges hajformázó eszközök, fejhallgatópántok, valamint cipőtalpak merevítőbetétei készülnek szuperrugalmas ötvözetből. A női fehérneműk egyes változataiban merevítő-formastabilizáló huzalbetétek találhatók. Annak érdekében, hogy ezek ne okozzanak kényelmetlenséget és ne deformálódjanak véletlen és váratlan nyomóhatások következtében, e huzaloknak nagyon hajlékonynak kell lenniük; erre nyújt megoldást a szuperrugalmas Nitinol huzal, amely műanyag bevonatot is kap.

16-37. ábra – Nitinol szemüvegkeretek

– **Működtetők (aktuátorok)**

A mechatronikai eszközökben fontos szerepet kapnak az alakemlékező ötvözetek. Belőlük készülnek különféle megfogószerkezetek, robotkarok, azok bicepsz és tricepsz jellegű feszítőpászmái. A huzalokat magukat is gyakran nevezik izomhuzaloknak. Ezek voltaképpen Ni-Ti huzalok. Két fő fajtájuk közül az egyiknek 70°C, a másiknak 90°C az átalakulási hőmérséklete (hevítésnél a leglényegesebb az A_S hőmérséklet). Az összehúzódást eredményező hevítést az elektronikusan be-ki kapcsolt átfolyó villamos áram Joule-hőjével végzik, a hűtést a környezet biztosítja. A Flexinol-70 típusú (márkanevű) huzalok általános jellemzőit 16-6. táblázat tartalmazza.

A működtetők (aktuátorok) céljára való felhasználás jelentőségét szemléletesen világítja meg a 16-38. ábra, amelyen összevethető a hagyományos (villamos, pneumatikus és hidraulikus) működtetőszerkezetek és az alakemlékező ötvözetből készített működtetők fajlagos teljesítménye, vagyis az egységnyi tömeggel elvégezhető munka. Egyértelmű jelentősége van annak, hogy pl. egy 10 gramm tömegű memóriafémmel akár 2 watt munkát is el lehet végeztetni, míg egy ugyanekkora villamos hajtású motor jó esetben is csak a tizedére képes.



16-38. ábra – Az alakemlékező ötvözet és a hagyományos működtetők fajlagos „ereje" a tömeg függvényében

Az orvostechnikai alkalmazások mellett fontos szerepet kapnak a Nitinol huzalok a robottechnikában is; nagy szerepet játszottak pl. a Sojourner robotjármű hajtásában, amelyet a Pathfinder űrhajó vitt a Marsra. Az 1990-ben fellőtt Hubble űrteleszkóp napelemeinek rögzítését is memóriafémes szerkezet végezte.

A hagyományos háztartási kenyérpirítók károsodásának alapvető oka a feledékenység. Az időben ki nem vett pirítós okozta károsodás ellen a

Rowenta vezette be a piacra az automatikus katapulttal felszerelt kenyérpirítót. A kritikus hőmérsékletet elérve egy alakemlékező ötvözetből készült rugó működtette kilökő szerkezet gondoskodott a pirítós kivételéről. Ugyancsak alakemlékező rugó kapcsolja ki – a forrni kezdő víz gőzétől melegítve – a vízforralókat.

– **Fogszabályozó huzalívek**

A fogszabályozó huzalívek szerepe a fogsorból kiálló fogaknak a helyükre nyomása. A 16-30. ábrán látható szilárdsági platót kihasználó huzalívek egészen nagy elmozdulástartományon képesek változatlan terheléssel nyomni a fogakat, tehát nem kell sűrűn utánállítani az eszközt. A Nitinol miatt azonban nagyon drágák.

16.8.7. További alakemlékező anyagok

Mint az eddigiekből kitűnik, az alakemlékező ötvözetek ipari felhasználása kész ténynek tekintendő. Ebben a tekintetben a legfontosabb ötvözetek a Ni-Ti ötvözetek és a Cu-alapú ötvözetek (Cu-Al-Ni, Cu-Zn-Al). Különösen Japánban foglalkoznak intenzíven az alakemlékező acélok (Cr=5–13%, Ni<10%, Mn<15%, Si<7%) kutatásával. Előtérbe került a nagy hőmérsékleten alkalmazható anyagok kutatása is. Ezen a téren a cirkónium-oxid alapú kerámiák (kb. 880°C), az 1 100°C-ig használható Nb-Ru és az 1400°C-ig működő Ta-Ru ötvözetek tekinthetők a legérdekesebb eredményeknek.

16.9. A tantál orvostechnikai alkalmazásai

A tantál is és a nióbium is elsősorban hőálló és korrózióálló anyagként ismertek ugyan, de egyes különleges alkalmazásokban fontos bioanyagként is szerepelnek.

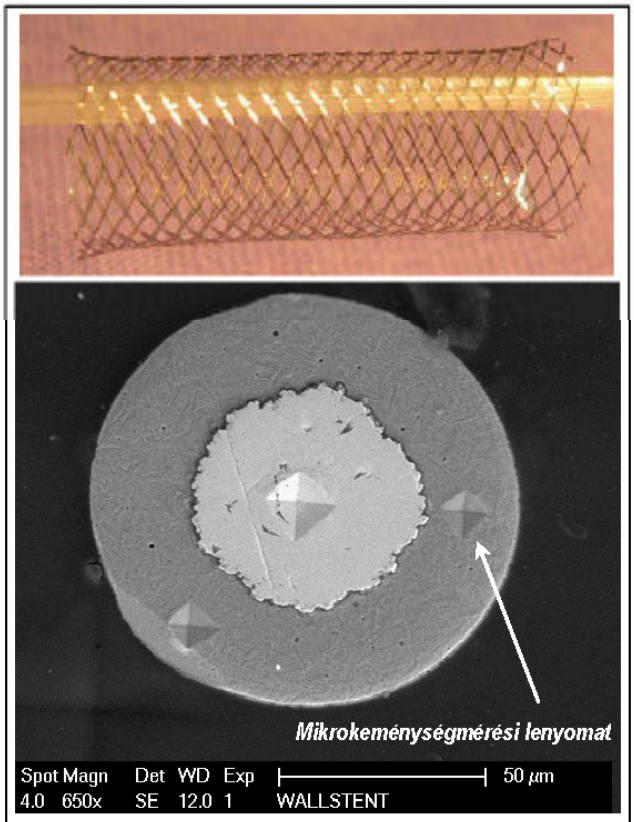
A tantál biokompatibilitása rendkívül jó, emiatt hosszú évtizedek óta használják humán implantátumok anyagaként a fogászati, ortopédiai, sebészeti, idegsebészeti és szájsebészeti eszközök anyagaként, továbbá szívritmus-szabályozók kondenzátoraiban. A tantál más fémekkel ellentétben (mint pl. a nikkel, kobalt és króm) nem vált ki allergiás reakciókat. A porózus felületű tantál aktív bioanyagként viselkedik a csontnövekedés, a csontszövet regenerációja elősegítésével. A biokompatibilitás mellett szintén nagyon kedvező tulajdonsága a nagy röntgensugár-elnyelő képesség, amit a nagy sűrűségének (16,6 g/cm^3) és a nagy rendszámának (73) köszönhet. A tantált bioanyagként csak ötvözetlenül használják, szakítószilárdsága kb. 400 MPa, és jól alakítható.

A tiszta tantálnak kétféle változata van forgalomban: az egyik hagyományos kohászati gyártási módszerekkel készül és vákuumos vagy elektronsugaras átolvasztással tisztítják, a másik pedig porkohászati termék. Ez utóbbi fémhabként („Trabecular Metal") is előállítható, és csípőprotézisek titánvápájának felületére köthető. A sebészeti tantálok tulajdonságait meghatározó legfontosabb szabványok a következők:

- Az ASTM F560-as szabvány és az
- ISO 13782:1996 szabvány.

Titánhoz ötvözve 10–70% tantált, nagyszilárdságú, de a titánnál jóval kisebb Young-modulusú és kitűnő biokompatibilitású ötvözetek hozhatók létre, de a gyakorlatban továbbra is csak az ötvözetlen tantál használatos, leginkább a következő alkalmazásokban:

- bentmaradó csontrögzítők, csavarok,
- ércsipeszek, szemműtéti ércsíptetők,
- koponyacsont implantátumok,
- öntáguló sztentek, pl. a 16-11. ábra, valamint a 16-39. ábrán látható Wallstent központi magjának anyaga Ta, a köpeny pedig Co-Cr-Fe-Ni-Mo ötövzet (a mikrokeménységmérés lenyomatai jól látszanak a két fázisban),
- fogászati implantátumok,
- radiográfia markerek sztentekre, katéterekre.



16-39. ábra – Boston Scientific Carotid Wallstent öntáguló sztentj kinyitott állapotban (fent), és egyik huzaljának keresztcsiszolata; a mag Ta, a köpeny Co-Cr ötvözet

Felhasznált és ajánlott szakkönyvek

Ashby M, Bréchet Y, Salvo L: *Sélection des matériaux et des procédés de mise en œuvre*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2001

Ashby MF, Jones DRH: *Matériaux, 2. Microstruture et mise en oeuvre*. Dunod, Paris, 1997

Ashby MF, Jones DRH: *Matériaux, 1. Propriétés et applications*. Dunod, Paris, 1997

Ashby M, Shercliff H, Cebon D: *Materials – Engineering, Science, Processing and Design*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2007

Askeland DS, Fulay PP: *Essentials of Matarials Science and Engineering*. Cengage Learning, 2010

Barralis J, Maeder G: *Précis de métallurgie; élaboration, structures-propriétés, normalisation*. Editions Nathan, Paris, 1997

Barrett TB, Massalski CS: *Structure of Metals*. Pergamon Press 1980

Chu YY, Zhao LC (szerk.): *Shape Memory Materials and Its Applications*. Trans Tech Publications, Uetikon-Zuerich, 2002

Colombié M, et coll.: *Matériaux industriels, matériaux métalliques*. Dunod, Paris, 2000

Czvikovszky T, Gaál J, Nagy P: *A polimertechnika alapjai*. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000

Dietrich R, Facy G, Hugonnaud E, Pompidou M, Trotignon JP: *Précis de construction mécanique, 2. méthodes, fabrication et normalisation*. Nathan–AFNOR, 1979

Dobrzański LA: *Metalowe materiały inżynierskie*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warsawa, 2004

Dowling NE: *Mechanical behavior of materials*. Pearson Educatrion Inc. Upper Saddle River NJ, 2007

Étienne S, Laurent D, Gaudry É, Lagrange Ph, Ledieu J, Steinmetz J: *Les matériaux de A à Z*. Dunod, Paris, 2008

Gillemot L: *Anyagszerkezettan és anyagvizsgálat*. Tankönyvkiadó, 1979

Janot Ch, Ilschner B: *Matériaux émergents*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2001

Kausch H-H, Heymans N, Plummer ChJ, Decroly P: *Matériaux polymères: propriétés mécaniques et physiques*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2001

Lacombe P, Baroux B, Béranger G: *Stainless steels*. Les Éditions de Physiques Les Ulis, 1993

Komócsin M: *Gépipari anyagismeret*. COKOM Mérnökiroda Kft. 2010.

Kurz W, Mercier JP, Zambelli G: *Introduction à la Science des matériaux*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1991

Martin J: *Materials for engineering*. Woodhead Publishing, Cambridge, 2006

Meyers MA, Chawla KK: *Mechanical beahvior of materials*. Prentice Hall Inc. Upper Saddle River NJ, 1999

Newnham RE: *Properties of materials*. Oxford University Press, 2005

Otsuka K, Wayman CM (szerk.): *Shape Memory Materials*. Cambridge University Press. Cambridge, 1998

Papon P, Leblond J, Meijer PHE: *Physique des transitions de phase, Concepts et applications*. Dunod, Paris, 2002

Patoor É, Berveiller M: *Technologie des alliages à mémoire de forme*. Hermes, Paris, 1994

PhilibertJ, Vigne A, Bréchet Y, Combrade P: *Métallurgie : Du minerai au matériau. Masson, Paris*, 1998

Prohászka János: *A fémek és ötvözetek mechanikai tulajdonságai*. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2001

Tisza M: *Metallográfia*, Miskolci Egyetemi Kiadó, 1998

Verő B, Dénes É, Csepeli Zs: *Bevezetés a műszaki anyagtudományba*. Főiskolai Kiadó, Dunaújváros, 2010

Von Fraunhofer JA: *Dental Materials at a Glance*. Wiley-Blackwell, Oxford, 2010

Wessel JK: *The Handbook of Advanced Materials*. Wiley Interscience, 2004

Tárgymutató

A, Á

acél (meghatározása) · 71
acélöntvény · 53, 76
aerogél · 12
Airbus · 148, 188, 189
akkumulátor · 127
aktuátorok · 215
akusztikus emissziós vizsgálat · 49
alakemlékezés · 31, 166, 212–214
alakemlékező ötvözet · 31, 166, 171, 209, 212–216
alakítási keményedés · 47, 111, 212
alakítási martenzit · 198, 199
állapothatározók · 33
állapottényező · 18, 38
allotrop átalakulás · 34, 47, 73-74, 81
Almeco ötvözet · 148
Almelec ötvözet · 145, 147, 148
alpakka · 166
Alpax ötvözet · 145, 146
alumíniumegyenérték · 187
alumínium-nitrid · 28
amorf · 6, 17–18, 23–25, 34, 53, 72
amorf szén · 206
anelasztikus alakváltozás · 212
angioplasztika · 201, 210
anizotrop, anizotrópia · 10, 38
anyagszerkezet · 8, 17–18
anyagvizsgálati szabványok · 41, 49, 79, 83, 85–86, 94, 96, 107, 110, 177, 216
AOD-eljárás · 197
Ashby M.F. · 11, 40
ateroszklerózis · 201
átmeneti hőmérséklet · 44, 81, 95, 115, 212
ausztenit · 19, 31, 34, 72–74, 80, 94, 107, 110–111, 121, 166, 199, 211, 213–215
ausztenites acél · 47, 109–112, 115, 116, 120, 126, 142, 196–199, 202
ausztenites lágyítás · 111
ausztenitképző · 107, 109–110, 199
automataacél · 86

B

Bain E.C. · 74
Balogh János · 3
behatolótest (keménységmérés) · 43
bénit · 74
betétben edzhető acél · 93
betonacél · 86, 120
bevonatos elektróda · 65–66
bevontelektródás hegesztés · 65
bioanyag · 195–197
biokompatibilitás · 113, 195, 197, 198, 209, 216
biopolimer · 196
bioüveg · 195
bordás tengely · 61
bór-nitrid · 103–104
Bravais-féle térrácsok · 20–21
Brinell-keménység · 43, 87
bronz · 40, 161, 165

C

C60 (fullerén) · 32, 34
cementálás · 93
cementit · 72–73, 76, 97, 101
cermet kompozitok · 103
Chamonix · 190
Charpy-féle ütővizsgálat · 44
cipzár · 171
Columbium · 109
Concorde (repülőgép) · 189
Co-ötvözet · 55
Cronstedt A.F. · 127

Cs

csapágyacél · 94
csavarás · 37, 42
csavardiszlokáció · 27
csigafúró · 61
csillapítóhatás · 213, 214
csomósodásgátlók · 32
csőtávvezeték · 82, 84
csúszósík · 27, 46

D

Davy, Henry · 133
dekarbonizálódás · 48, 76, 98
dendrit · 33, 177
diffúzió · 26, 28, 30, 34, 56, 63, 72, 212
dinamikus terhelések · 37–38
diszlokáció · 27–29, 46–47, 151
diszlokációcsúszás · 28
diszlokációsűrűség · 29, 47, 212, 214
dörzsár · 60–61
dörzshegesztés · 64
dörzsölés · 60–61
dróthúzás · 58
duplex acél · 4, 19, 29, 110, 120–121
dúralumínium · 146, 148
duzzadás · 48

E, É

edény (konyhai) · 3, 59, 85
edzés · 80–81, 94–95, 103, 110, 117, 135–136, 139, 141, 163, 166
éghetőség · 8
egyezményes folyáshatár · 42, 162, 164
elasztomerek · 7, 18
éldiszlokáció · 27, 28
elektropolírozás · 121, 206, 210
élelmiszer-adalékok · 32
elemi cella · 20, 22, 31
Elgiloy ötvözet · 199, 200
élhajlítás · 57, 59
ellenállás-hegesztés · 66
előrefolyatás · 57
elridegedés · 44, 98
epoxigyanta · 24
erősítőanyag · 25
erősítőrészecskék · 25
erősítőszálak · 25, 40, 196
értágítóbetét (sztent) · 198, 201
érvisszaszűkülés · 201–203, 205
Espy-formula · 107
esztergályozás · 60
etilén · 23, 40
eutektikum · 73, 145, 161, 169
eutektikus ötvözet · 72–75, 139, 151, 161, 177
eutektoid, eutektoidos · 72–74, 151, 166, 187
extrafélsík · 27
extruzió (kisajtolás) · 55

F

fajlagos keresztmetszet-csökkenés (kontrakció) · 44
fáradásos törés · 48, 200
fárasztóvizsgálat · 49
fázis · 8, 19, 26, 33–34, 55, 72–73, 91, 109, 111, 115, 121, 139–145, 151, 161, 164–166, 177, 180, 199–200, 207, 209, 213–214
fázisátalakulás · 33–34
fázishatár · 19, 30, 141
fedett ívű hegesztés · 65–66, 84
fedőpor · 65
félmeleg alakítás · 56
felrakóhegesztéssel · 64
felületkezelés · 53
felületszerű rácshibák · 26
fémes kötés · 10–11
fémfröccsöntés · 55
fémhab · 12–13, 25, 157, 216
fémnanorészecskék · 32
fémnyomás · 57, 59
fémöntészet · 53
ferrit · 19, 72–73, 80–81, 97–98, 109
ferritképző ötvözők · 107
feszítőhuzal · 86
feszültségállapot · 38
feszültség-nyúlás diagram · 42
finomkivágás · 57
finomszemcsés anyag · 38
fogászati implantátum · 208
fogazás · 59–60, 62
fogszabályozó · 209, 211, 216

fogyóelektródás, védőgázos ívhegesztés · 65–66, 85
folyamatos öntés · 53–54, 82, 187
folyáshatár · 37, 41–42, 46–47, 76, 82–84, 86–87, 94, 96, 120, 125, 129, 139, 148, 170, 178, 180, 188, 199, 200, 207
folyatás · 57, 101, 142, 152
fononok · 26
forgácsolás · 53, 60, 62, 103–104, 143, 169, 198
forgattyús tengely · 92
formakitöltés · 53
forraszanyag · 63
forrasztás · 53, 63, 142–143
Frank–Read-források · 29
Frenkel-féle hiba · 26
fröccsfúvás · 55
fröccsöntés · 53, 55
Fuller R.B. · 32
fullerén (C60) · 13, 32, 34
fúrás · 60–61
fűrészelés · 60, 62

G

galvanizálás · 53, 171, 203
gázturbinalapát · 117, 126
Gibbs-féle fázisszabály · 8, 33
Gillemot László · 76, 185, 191
gömbgrafitos · 9, 74, 76
gömbtartály · 95
gördülőcsapágy · 94
gőzturbina · 117, 119
grafit · 10, 20, 22–23, 34, 38, 40, 72, 74–75, 133, 152
grafitosodás · 48, 97, 98
Gramme. Z. · 133
gravitációs öntés · 54
Greiner–Klingenstein-diagram · 75
Guinier–Preston-zónák · 20, 141
Guy G. · 12

Gy

gyalulás · 60–61
gyémánt · 12, 13, 21–23, 34, 40, 103–104, 210
gyémántszerű szén · 202, 206
gyertyaöntés · 53
gyorsacél · 80, 103–104

H

haemokompatibilitás · 202
hajlítószilárdság · 42
hajlítóvizsgálat · 49
Hall–Petch-egyenlet · 47
halmazállapot · 3, 8, 11, 33
halmazállapot-változás · 33
harangbronz · 165
hasadásos törés · 48
Hastelloy ötvözetek · 125–126
határ-alakváltozást · 45
hátrafolyatás · 57–58
Haynes 25 ötvözet · 126
hegesztés · 30, 53, 64–66, 84–85, 97, 114, 121, 142
hegesztőhuzal · 65
hibrid anyag · 7, 25, 103, 145, 203
hidegalakítás · 47, 56, 86, 111, 125, 135–137, 139, 142, 162–164, 198–200, 207
hidegszívós acél · 95–96
hidrogénbetegség · 161
hidrogénnyomás-álló acél · 98
hidrosztatikus feszültség · 37
hidroxiapatit · 7, 195
hiperduplex acél · 120
hipereutektikus · 72, 75, 147, 170
hipereutektoidos · 72, 102, 108, 117, 170
hiperszilíciumos ötvözet · 147
hipoeutektikus · 72, 75, 147, 170
hipoeutektoidos · 72, 102
homogenizáló hőkezelés · 139
homokformaöntés · 147
Hooke-törvény · 42
Horgany (cink) · 5, 12, 19, 40, 145, 164, 169, 177, 185
horganyozhatóság · 82, 87
horganyzott acél · 12–13, 87, 172
hőálló acél · 107–110, 115, 126–127
hőállóság · 23, 75, 107, 109–110, 113
hőkezelés · 47, 53
hőre keményedő műanyag · 24
hőre lágyuló műanyag · 24
hőtágulás · 48, 136, 147, 176, 212
Hubble űrteleszkóp · 215
huzalhúzás · 47, 56–57, 211
húzószilárdság · 42
húzóterhelés · 37, 39, 42, 45, 172, 178, 180, 198
hyomóvizsgálat · 49

I, Í

időjárásálló acél · 84
igénybevételi sebesség · 37–38
ikerhatár · 30
ikerképződés · 30–31, 213
ilmenit · 185–186, 191
implantátum · 55, 113, 189, 195–200, 203, 207–208, 216
Incoloy ötvözetek · 125–126, 197
Inconel ötvözetek · 125–126
inkoherens · 19–20, 46, 139, 145
inkubációs idő · 34
interkrisztallin · 48
intersztíciós atompár · 26
intersztíciós ötvöző · 46
Invar ötvözet · 129, 176
invazív radiológia · 195
ionos kötés · 10
ionrács · 26
italos doboz · 58
izotrop · 10, 103

J

járműhajtáslánc-elemek · 76
javítóhegesztés · 66
Jedlik Ányos · 133
Johnson–Mehl–Avrami-egyenlet · 34

K

kalanderezés · 53
kapilláris erő · 63
Kaplan-turbina · 117
karbonitridálás · 104
károsodás · 45, 48, 86, 98
katalízis · 30
Kayem-ötvözet · 170
keményfém · 43, 103
keményforrasztás · 63
keménykróm bevonat · 43
keménység · 37, 39, 43, 80–81, 87, 93–94, 103–104, 147
keménységmérés · 49
kémiai kötés · 10
képlékeny alakváltozás · 56, 64, 137
képlékenyalakítás · 29, 34, 47, 53, 56, 79, 142, 151, 198
képlékenység · 38–39, 44, 47, 137
kerámiafröccsöntés · 55
kerámiák · 5–6, 12–13, 18, 22–23, 29, 37, 40, 42, 53, 56, 79, 101, 103–104, 195–196, 216
kerámiananoporok · 32
keréktárcsa · 59, 146
keresztkötés · 24
kérgesség · 38
késélkorrózió · 111–112
kifáradás · 45, 48, 94, 165
kifáradási élettartam · 45
kifáradási határ · 45, 91, 94, 117, 121, 142, 147, 162–163, 170, 200, 207
kifáradással szembeni ellenállás · 39, 45, 141–142, 163, 198, 200, 207
kifejezett folyáshatár · 42
Kína · 13, 33, 82, 84, 127–129, 133, 175, 190
kipufogó · 116
kivágás · 57
kiválások · 19–20, 34, 46, 80, 137, 139, 141, 145, 151, 178, 200
kiválásos keményedés · 46, 110, 129, 139, 144–145, 163, 200
kiválásosan keményített acél · 80, 83
klaszterek · 26
Knoop-keménység · 43
kockarács · 20–21
koherencia · 19
koherens · 19–20, 46, 139, 141, 145, 151
koherens kiválások · 46
kompakt szakító próbatest · 45
kompozit · 4, 7, 10, 25, 40, 42, 53, 101, 103–104, 148, 151, 156, 157, 175–176, 179, 189, 196
kompozitok · 7, 25, 42, 53, 101, 103, 148, 151, 176, 179, 196

konstantán · 129, 166
kontrakció · 44, 151
kopás · 6, 48, 108, 116
kopásállóság · 104, 117
korrózió · 30, 37, 48, 86, 98, 107, 111–112, 125, 142, 169, 197, 199
korrózióálló acél · 79, 107–111, 115–117, 120, 128, 165, 195–196
korrózióállóság · 37, 75–76, 107–113, 117, 120, 136, 141–145, 152, 162, 164, 169, 188–190, 198
kovácsolás · 56–57, 76, 152, 186
kovalens kötés · 10, 24
Kovar ötvözet · 129
körfűrész · 62
környezetbarát anyag · 9
környezeti tulajdonságok · 7, 9
kötéstípus · 40
kötőanyag · 55
kristályhibák · 26, 47
kristályorientáció · 30
kristályosodás · 33, 198
kristályrács · 18, 20, 23, 27
kristályrácshibák · 26, 29–30, 38
krisztallit, szemcse · 22, 46, 137, 145
Kroll-eljárás · 186
krómegyenérték · 107
Kroto · 32
kúszás · 45, 48, 97, 111, 144, 169
kúszásálló acél · 79, 107, 126
kúszásállóság · 39, 45, 96, 107–108, 113, 117, 125–127, 136, 141, 162
kúszáshatár · 45, 96, 106, 108, 136, 163, 169, 176–178, 188
kúszási élettartam · 45, 177
kúszási szilárdság · 45, 96
kúszásvizsgálat · 49
kvázikristály · 18, 22

L

lágyforrasztás · 63
lágyítás · 80, 136, 139, 162, 198
lágyított anyag · 29
láncmolekula · 23
láthatóság · 202–203
Le Chatelier, L · 133
Ledebur, Adolf · 73
lédeburit · 73, 76
lefejtőmarás · 62
légkörikorrózió-állóság · 84
legsűrűbb síkok · 22, 31
lemezgrafitos öntöttvas · 74–76
Lewis-modell · 10
Liberty-hajók · 49
lineáris termoelaszticitás · 212
liofilizálás · 33
litográfia · 203
Londoni Fémtőzsde · 110

Ly

lyukasztás · 56–57, 59
lyukkorrózió · 111, 120, 200
lyukkorróziós ellenállás · 196

M

magképződés · 34
mágneses hibakereső vizsgálat · 49
makroskála · 17
mángorlás · 57
maradó alakváltozás · 40, 42, 45, 56, 94, 96, 162, 164, 214
Márai-szobor · 54
marás · 60–61
Martens, Adolf · 74
martenzit · 20, 34, 72, 74, 80, 91, 101, 166, 198, 213–215
martenzit start hőmérséklet · 34
martenzites átalakulás · 34, 166, 200, 211–214
martenzites korrózióálló acél · 94, 107–108, 110, 117
martenzites kúszásálló acél · 107, 108, 117
mechanikai tulajdonságok · 7, 17, 19, 29, 32, 37–39, 45–46, 49, 75–76, 81–82, 91, 95–96, 113, 135, 137, 138, 142, 144, 152, 161–162, 164–166, 169–170, 175–180, 196, 198, 207
Meggiato G. · 15
melegalakítás · 56
meleghengerlés · 47, 82–83, 86
melegszilárd acél · 96–98, 108, 126
mélyhúzás · 57–59, 87, 101, 111, 142
mélyhúzhatóság · 144
membránfeszültség · 37
merevség · 39, 42
mérnöki anyag · 5–6
mérőhosszúság · 44
mesterséges anyag · 4, 9
mezoskála · 17
mikroötvöző · 79, 134
mikrorepedés · 17, 29
mikroskála · 17–18
mikroszerkezet · 18
mikroszerkezetvizsgálat · 49
mikroszkópos vizsgálat · 49, 72
mikroüreg · 22
molekulalánc · 23
molibdénegyenérték · 187
Monel ötvözet · 125, 126, 185
monomer · 24
MRI-kompatibilitás · 209
műanyag · 4–6, 9, 13, 24, 42–44, 55, 56, 79, 147, 150, 170, 186, 195
műanyagfröccsöntés · 55
műfogsor · 196
működtetők · 215

N

nájlon · 24, 40
nanoanyag · 32
nanocső · 32
nanokeménység · 43
nanokompozit · 32
nanokristályok · 32
nanolemezek · 32
nanopigmentek · 32
nanorétegek · 32
nanoskála · 17
nanoszálak · 32
nanoszerkezet · 17, 32, 49
nanoszerkezetű anyag · 32
nanotechnológia · 32–33, 104
nátronüveg · 23
nemesítés · 80, 117, 135–136, 139, 144
nemesíthető acél · 91, 92, 94
neutronsugárzás · 48
Newton, Isaac · 3
nikkelegyenérték · 107
Ni-ötvözet · 19, 45, 55, 125–127, 129
Nitinol · 13, 34, 202, 207–212, 215, 216
nitridálás · 102, 104
nitrocementálás · 104
Nohara-formula · 198
normalizálás · 80

Ny

nyíróterhelés · 34, 37, 39, 133
nyomószilárdság · 42, 170
nyomóterhelés · 37, 39, 45, 178, 180
nyúlás · 41, 44, 47, 80, 94, 117, 125, 137–138, 188

O, Ó

oldalirányú kiszélesedés · 44
ólommentes forrasz · 63
Orowán Egon · 28
Orowán-mechanizmus · 46
ortotrop · 10

Ő, Ő

ömlesztőhegesztés · 64
öngyulladás · 8
öntágúló sztent · 209
öntés · 53, 56, 75, 102, 135, 145, 152, 169–171, 175, 177, 198, 200
öntőpépes öntés · 56
öntöttvas, vas (meghatározása) · 71
öregítés · 110, 135–136, 151, 179
örvényáramos vizsgálat · 49
ötvözetek · 5, 7, 19–21, 23, 26, 29, 34, 46, 47, 71–72, 95, 107, 125–127, 129, 133–135, 139, 141–148, 150–152, 161–166, 169, 170, 176–181, 185, 187–188, 195–196, 198–202, 207–209, 211, 216
ötvözők · 19, 38, 46, 72, 79–81, 94, 96, 98, 102–104, 107, 133–134, 136–137, 139, 141, 161, 164, 170, 175, 177, 187, 207

P

Pb-Sn ötvözetek · 63
pébégázpalack · 59
Peierls-feszültség · 46, 47
pekingi opera · 190
Pelton-turbina · 117
pelyhesedés · 98
pénzérme · 127–128
perlit · 73, 74, 76, 98
Permalloy ötvözet · 129
Phynox ötvözet · 199, 200
plexi (PMMA) · 4, 24, 195–196
Poisson-tényező · 39, 133, 137, 162
poliamid · 24, 40, 195–196
polietilén · 6, 23–24, 40, 195–196, 202
polikarbonát · 24
polikristály · 18
polimer lánc · 24
polimerek · 5–6, 18, 23–24, 37, 39, 40, 196, 202
polimerizáció · 23
polimorfizmus · 34
polírozás · 53, 206
pontszerű rácshibák · 26, 28
porformázás · 53, 55–56
porfröccsöntés · 55
precíziós öntés · 53–55, 135, 170, 171, 200
Prohászka János · 34
Properzi-eljárás · 53
pudingkészítés · 53
Pyrex üveg · 23

R

rácsrezgések · 26
reaktortartály · 97
rekristallizáció · 137
repedésterjedéssel szembeni ellenállás · 39, 45, 48
réskorrózió · 111
rétegesség · 38
rétegződési hiba · 30–32
rezgéscsillapító képesség · 75, 180
R-fázis · 211
rideg anyag, ridegedés · 38, 48
ridegtörés · 44, 83
ritkaföldfémek · 176–177, 180
robbantásos alakítás · 57
Roberts-Austen W.C. · 71
Rockwell-keménység · 43
RoHS-direktíva · 9
roncsolásmentes anyagvizsgálat · 49
rotációs öntés · 55
rozsdamentes acél · 79, 107–110, 112, 120–121, 127–128, 187, 196–197, 199
röntgendiffrakciós vizsgálat · 29, 49
rugalmasság · 40, 42
rugalmassági modulus · 37, 39–40, 75, 133, 137, 151, 189
rugóacél · 94
rutil · 6, 186

S

Saint-Claire Deville, H. · 133
sajtolóhegesztés · 64
sajtolt profil · 58, 147, 155
Sanocor sztent · 206, 207
sárgaréz · 19, 40, 54, 128, 161, 164–166, 170, 172
Schaeffler-diagram · 107
Schottky-féle hiba · 26
Shore-keménység · 43
Siemens, W. · 133
Simonyi Károly · 3
sovány duplex · 110, 120–121, 128
stabilizált acél · 112
statikus terhelések · 37
süllyesztékes kovácsolás · 57, 102, 180
sűrűség · 5–6, 26, 40, 133, 138, 175, 176, 181, 203, 216
Syncoben ötvözet · 199

Sz

szabad felület · 22, 30
szakítódiagram · 41–42
szakítószilárdság · 41–42, 87, 91, 125, 163, 188
szakítóvizsgálat · 41–42, 44, 49
szalagfűrész · 62
szálasság · 38
szárazelem · 172
szelepacél · 95
szemcse · 18, 24
szemcsedurvulás · 48, 97, 137–138, 180, 200
szemcsefinomítás · 47, 81, 136, 139, 202
szemcsehatár · 18, 30
szemcsehatármenti korrózió · 111, 112, 142–143
szemikoherens · 19, 139
szénegyenérték · 83, 97
szénlánc · 23
szénnanocső · 13, 34
szennyezők · 30, 38, 80–81, 136–138, 161, 170, 197, 207
szerszám · 53, 55–56
szerszámacél · 79, 80, 101–102, 104, 117
szikrázásmentes érintkező · 163
szilárdoldatos keményedés · 46, 144, 169
szilárdság · 19, 23, 38–39, 41–43, 46, 55, 75–76, 79–80, 83, 92, 101, 103–104, 108–110, 117, 121, 136–138, 142–145, 151, 152, 162–166, 170–171, 188, 190, 200, 208–209
szilárdsági jellemzők · 38, 87, 137, 141
szilárdságnövelés · 46–47, 81, 110, 139, 151, 199
szilícium-dioxid · 4, 23
szilícium-nitrid · 22
szilikonok · 23
Szilva, Ted · 128
szinterelés · 22, 56
szintetikus anyag · 4
szívbillentyűkeret · 55
szívinfarktus · 201
szívós · 38, 42, 44, 48, 76, 93, 95, 101–102, 115, 198–199
szívósság · 39, 44–45, 55, 76, 79, 80, 83–84, 87, 92, 101– 103, 108, 129, 145, 151–152
szövetszerkezet · 18, 38
sztent · 195–196, 198, 200–207, 209–211, 216
szublimáció · 33
szubszemcse · 30
szubszemcsehatár · 30
szubsztitúciós atom · 26
szuperausztenites acél · 109
szuperduplex acél · 110
szuperképlékeny · 151, 188
szupermartenzites acél · 107–108, 117
szuperrugalmas · 202, 209– 211, 215
szuperrugalmasság · 31, 213

T

társított (hibrid) anyag · 7, 25, 40, 103–104, 145, 203
társított anyag · 7, 25
távvezetéki oszlop · 84
társított anyag · 7, 25
Taylor G.I. · 28
telítettségi fok · 75
temperöntvény · 76
temperszén · 76
tengely · 45, 57, 60, 76, 92–93, 142
Tentaur sztent · 202, 204–206
térhálós szerkezet · 24
terhelési diagram · 211
természéz · 161
természetes anyag · 4, 196
termikusan aktivált folyamatok · 26
termokémiai felületkezelés · 104
termomechanikai tulajdonság · 212, 213
termomechanikus · 83, 85, 145, 200, 212–213
Thewton · 3
Ti-ötvözet · 55, 152, 177, 188, 208
Titanic · 49
titánszivacs · 186–187, 191
többfajtájúság · 34
tömörség · 11
törés · 29, 44–45, 48–49, 161, 164, 165, 200
törési szívósság · 37, 45, 103–104, 129, 151
törésmechanikai vizsgálatok · 45, 49
transzkristallin · 48
triplex acél · 108
túlöregítés · 135–136, 179
turbinakerék · 55, 64
turbinalapát · 26, 117, 166
TWIP-acél · 199

U, Ú

ujjmarók · 61
újrahasznosíthatóság · 9
újrakristályosító hőkezelés · 47
újrakristályosodási hőmérséklet · 56
ultrafinomszemcsés anyag · 38
ultrahangos vizsgálat · 49

Ü, Ű

üregelés · 60, 62
üregelőtüske · 61–62
üres rácshely · 26
ütőmunka · 44, 82–84
ütővizsgálat · 44, 49
üvegek · 5–6, 18, 23, 37, 42, 53, 56, 171, 196

V

vakancia · 26
vakanciahurok · 31
valódi törési feszültség · 41
Van der Waals-kötés · 10, 11
vas, öntöttvas (meghatározása) · 71
vasbetonháló · 86
vas-karbid · 72, 73, 75, 76, 80, 91, 97
vasöntészet · 53, 71
vasúti sín · 87
védőgáz · 65
Vegard-szabály · 25
vékonyréteg · 30, 32
vésés · 61
Verő József · 191
vezetődrót · 197, 210, 211
vezetőképesség · 125, 136, 161, 163, 164
Vickers-keménység · 43
Vinci, Leonardo da · 195
Vitallium · 195, 200
volfrámelektródás, védőgázos ívhegesztés · 65, 66
vonalszerű rácshibák · 26, 27
vonófűrész · 62
vörösréz · 29, 31, 161

W

Wallstent · 201
Waspaloy · 126
WEEE-ditektíva · 9
Weldalit · 151
Wöhler, F. · 133
Wöhler-görbe · 142

Y

Young-modulus · 39–40, 76, 133, 143, 151, 162, 169, 175, 185, 212, 216
Ytong · 150

Z

Zamak-ötvözet · 170
zománcozhatóság · 87

Zs

zsugorítás · 55

Az első borító közepén látható műalkotás Hans Burkmayr *Pénzverő műhely* című rézmetszete.
Közli Zolnay László *Ünnep és hétköznap a középkori Budán* című művében (Gondolat, Budapest, 1975, 154. kép)

Dobránszky János

Anyag- és technológiaismeret
műszaki menedzsereknek

ISBN 978-963-89209-1-1

DyTh