

DOBRÁNSZKY JÁNOS – BERNÁTH ANDREA – ORBULOV IMRE

## Magnézium: a fém, mely nagyon könnyű, de fontosnak találtatott (2. rész)

*Dolgozatuk első részében a szerzők áttekintették a magnézium történetét, az elsődleges metallurgiai eljárásokat, a magnézium világpiacán és hazai piacán az elmúlt 20 évben lezajlott átalakulásokat, valamint a magnézium és ötvözetek néhány alkalmazását. A cikk második, befejező részében bemutatják a különféle magnéziumötvözeteket, további alkalmazási példákat ismertetnek, majd adatokat közölnek a magnéziumnak a tudományos kutatásban elfoglalt szerepéről.*

### 1. A magnéziumötvözetek

A 200 éves születésnapja előtt álló magnézium [1] mint szerkezeti anyag karrierjét 1945-től számítjuk, amikor nagy lendületet vett a repülőgépgyártás és az úrkutatás, valamint a szállítási ipar. Kezdetől jelentős konkurenciával kellett megküzdenie: az alumíniumötvözetek, a titán és főleg a műanyagok alkalmazása jelentették az alternatívákat. A jó néhány kedvezőtlen tulajdonsága – csekély korrózióállóság, gyúlékonyság – ellenében, nagyban segítette a magnézium alkalmazási területének kiszélesedését a nagy tisztaságú ötvözetek (AZ91, WE43 stb.) kifejlesztése, a nyomásos öntés technológiájának specializálódása, az anódos oxidálással való felületkezelés elterjedése. A nagy tisztaságú fém előállítását az teszi lehetővé, hogy a Mg az olvadáspontja (650°C) közelében már 200 Pa nyomáson szublimál. Ugyanakkor ez a sajátosság tiltott technológiává teszi a vákuumos olvasztást. Amikor az autóipar – Ferdinand Porsche után 50 évvel –

*A szerzők életrajzát előző számunkban közöltük. A cikk 1. és 2. részének megírását az OTKA T43571 számú, „Az anizotropia szerepének kutatása a polikristallin fémek mechanikai tulajdonságaira és ultraprecíziós forgácsolhatóságára” című projekt támogatta.*

újra felfedezte a magnéziumot, új perspektíva nyílt meg előtte.

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 ötvöztetésű ötvözetek
  - Mn-ötvöztetésű ötvözetek
  - Zr-ötvöztetésű, Th-mentes ötvözetek
  - Zr-Th ötvöztetésű ötvözetek
  - Ritkaföldfém-tartalmú ötvözetek
  - Li-ötvöztetésű ötvözetek

A magnézium fő ötvözőit és azoknak a tulajdonságokra gyakorolt hatását a következők szerint lehet összegezni:

Ittrium – növeli a szilárdságot, 250-300°C-ig biztosítja a melegszilárdságot, javítja a korrózióállóságot, védőgázos technológiát igényel.

Ritkaföldfémek (RF) – Az "RF" gyűjtőjellel jelölt elemek, pl. a Ce, Nd, Gd, Pr stb. javítják az öntészeti jellemzőket, a galvánkorrózióval szembeni ellenállást, növelik a szilárdságot és a kúszáshatárt, 250°C-ig a melegszilárdságot (főleg a Nd), csökkentik a mikroporozitást. A ritkaföldfémekhez szorosan véve a 14 lantanoi-

da és a lantán tartozik, de praktikus megfontolásokból gyakran ide sorolják a La „felső” szomszédait, a Sc-ot és az Y-t is [2].

*Cirkon:* Növeli a szilárdságot, javítja az önthetőséget, a rezgésekkel szembeni ellenállást, szemcsefinomító hatású.

*Ezüst:* Ritkán (a ritkaföldfémekkel és a Th-mal együtt) alkalmazott ötvöző, szilárdságnövelő hatású.

*Tórium:* 350°C-ig biztosítja a kúszásállóságot, csökkenti a ridegséget és a mikroporozitási hajlamot (különösen a Zn-tartalmú ötvözetekben).

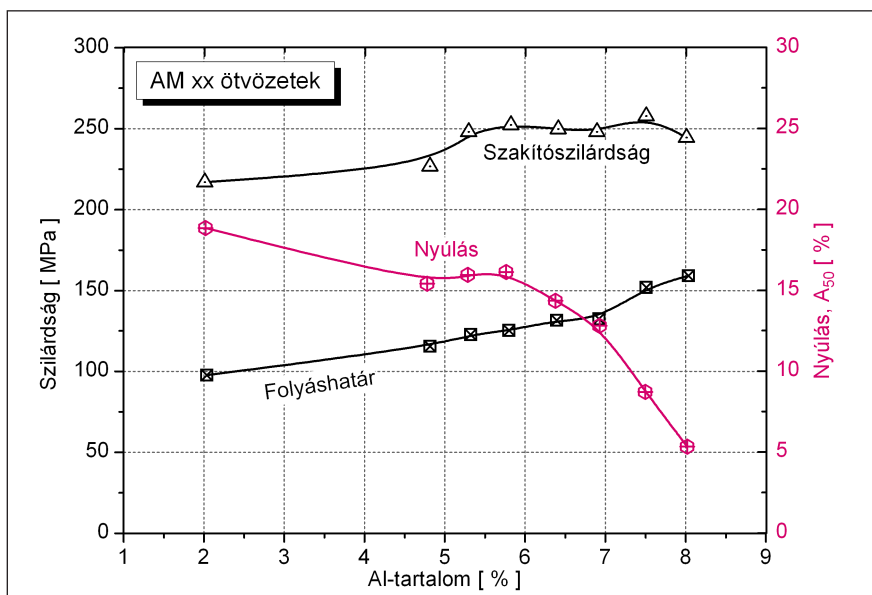
*Cink:* Növeli a szilárdságot és csökkenti a képlékenységet, szemcsefinomító hatású, javítja az önthetőséget, 5,5% feletti mennyiségben csökkenti a mikroporozitást.

### 2. Öntészeti ötvözetek

#### 2.1. Jól önthető ötvözetek\*

A jól önthető magnéziumötvözetek csoportjába tartozó típusok ötvözőelemei a ritkaföldfémek, a Th, az Ag és a Zr. Ezek a típusok kiváló öntészeti tulajdonságokkal bírnak, és jól hegeszthetők. Számos magnéziumtípusnak képezi az alapját a 0,6-0,7% körüli Zr-tartalmú ötvözet. Ha Zr-mal ötvözik a Mg-t, akkor néhány más ötvöző nem adható a rendszerbe, mivel azokkal a gyártási hőmérsékleten, ill. az olvasztás során a Zr oldhatatlan intermetallikus fázisokat képez. Ezek a „tilalmas” ötvözők az Al, Si, Fe, Mn, H, Co, Ni, Sb, Sn.

\* MSZ EN 1753:1999 „Magnézium és magnéziumötvözetek. Magnéziumötvözetből gyártott tömbök és öntvények”, „Magnézium és magnéziumötvözetek”, MSZ EN 1753:1999 „Magnéziumötvözetből gyártott anódok, tömbök és öntvények. Jelölési rendszer”, MSZ EN 12438:1999 „Magnézium és magnéziumötvözetek. Magnéziumötvözetek öntött anódokhoz”



1. ábra. Az Al-tartalom hatása Mg-Al-Mn ötvözetek mechanikai jellemzőire

1. táblázat. Mg-ötvözetek kúszása

| Típus | 100°C  |         | 150°C  |        | 200°C  |
|-------|--------|---------|--------|--------|--------|
|       | 50 MPa | 100 MPa | 30 MPa | 50 MPa | 30 MPa |
| AZ91  | 0,07   | 0,55    | 0,25   | 1,20   | -      |
| AS41  | -      | -       | -      | 0,33   | 0,55   |
| AS21  | -      | 0,35    | 0,12   | 0,16   | 0,29   |
| AE42  | 0,05   | 0,28    | 0,09   | 0,15   | 0,18   |
| AM60  | 0,07   | 0,97    | 0,45   | 1,25   | -      |
| AM20  | 0,04   | -       | 0,16   | 0,35   | -      |

Mg-Zr-Zn-RF ötvözetek

Kiváló öntészeti tulajdonságú ötvözetek lévén nagyon bonyolult alkatrészek gyártására is alkalmasak. A ritkaföldfémek miatt kicsi az eutektikus hőmérséklet, s ez a porozitás ellen is kedvezően hat. A legismertebb magnéziumtípus ebben a kate-

góriában az RZ5 típus, amelynek melegszilárdsága az öntés utáni hőkezeléssel 150°C-ig biztosítható. Az RZ5 ötvözet névleges kémiai összetétele: Mg, 3,5-5,0% Zn, 0,4-1,0% Zr, 0,8-1,7% RF. Az európai szabványok (és az azokat angolul átvevő hazaiak) a ritkaföldfémekre nézve ezt a csoportot „Ce-ban dús” jelzővel illetik. Egyre kevésbé használják a RF-mentes típusokat (pl. ZK51), mivel azoknak rossz az önthetőségük és a hegeszthetőségük.

Mg-Zr-Ag-RF ötvözetek

Ezen ötvözetek mechanikai tulajdonságait az ismételt, több órás hőterhelések sem rontják 200°C-ig. A legerjedtebb típus a MSR-B, amely 2,5% ezüstöt tartal-

maz. Az MSR-B ötvözet névleges kémiai összetétele: Mg, 2,0-3,0% Ag, 0,4-1,0% Zr, 2,0-3,0% RF. 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 főleg a Nd jellemző ötvöző.

Th-tartalmú ötvözetek

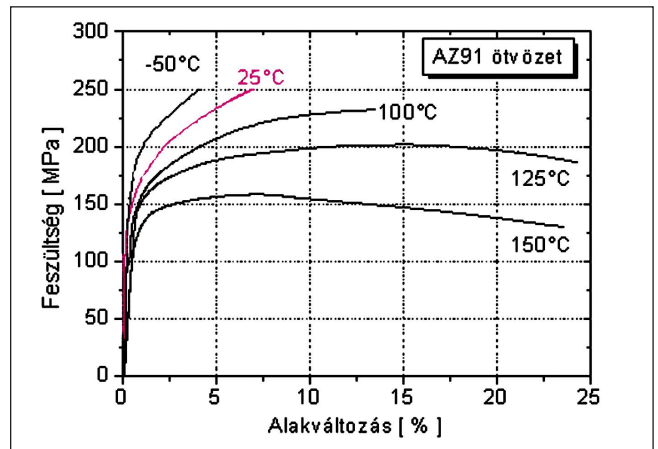
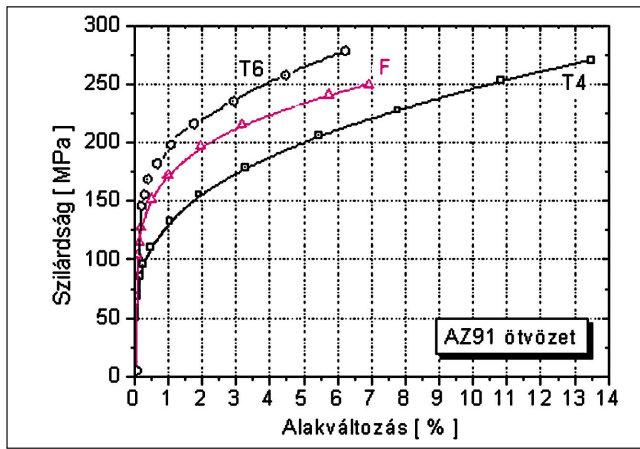
A kb. 2%-ig menő Th-ötvözés mellett a Zn-tartalom 6%-ig növelhető a mikroporozitás veszélye nélkül, de a Th radioaktivitását nem lehet figyelmen kívül hagyni. A HZ32 ötvözet 2,5-4,0% tóriumot tartalmaz, a ZH62 ötvözet pedig 1,5-2,2%-ot. A termikus fáradásnak és a kúszásnak jól ellenálló termékek alapanyagaként használják fel, homokformába is jól önthető. Fő alkalmazási területük a repülőgép-hajtóművek egyes alkatrészei, ahol az Al- és a Ti-ötvözeteket képesek kiváltani. Tekintve, hogy a radioaktivitás miatt különleges megmunkálást igényel és ezért is nagyon költséges, az ittriumos típusokkal váltják fel őket. A tóriumos típusok nem is szerepelnek az EU öntészeti ötvözeteket tartalmazó szabványjaiban.

Mg-Zr-Y-RF ötvözetek

Ez az ötvözetcsoport 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 köszönhetőek. A WE54 és a WE43 típusok a leginkább elter-

2. táblázat. Öntészeti Mg-ötvözetek

| Csoport                 | Európai Unió     |            | ISO         | USA   | Németország |          | Anglia |          | Franciaország |
|-------------------------|------------------|------------|-------------|-------|-------------|----------|--------|----------|---------------|
|                         | Hosszú jel       | Rövid jel  |             |       | DIN         | Régi jel | BS     | Régi jel |               |
| MgAlZn                  | EN-MBMgAl8Zn1    | EN-MB21110 | Mg-Al8Zn1   | AZ 81 | MgAl8Zn1    | AZ 81    | MAG 1  | A8       | G-A8Z         |
|                         | EN-MBMgAl9Zn1(A) | EN-MB21120 | Mg-Al9Zn    | AZ 91 | MgAl9Zn1    | AZ 91    | MAG 7  | C,AZ91   | G-A9Z1        |
|                         | EN-MBMgAl9Zn1(B) | EN-MB21121 | -           | -     | -           | AZ 91    | -      | AZ91     | -             |
| MgAlMn                  | EN-MBMgAl2Mn     | EN-MB21210 | -           | -     | -           | AM 20    | -      | -        | -             |
|                         | EN-MBMgAl5Mn     | EN-MB21220 | -           | -     | -           | AM 50    | -      | -        | -             |
|                         | EN-MBMgAl6Mn     | EN-MB21230 | -           | AM 60 | -           | AM 60    | -      | -        | G-A6M         |
| MgAlSi                  | EN-MBMgAl2Si     | EN-MB21310 | -           | -     | -           | AS 21    | -      | -        | -             |
|                         | EN-MBMgAl4Si     | EN-MB21320 | -           | AS 41 | MgAl4Si1    | AS 41    | -      | -        | G-A4S1        |
| MgZnCu                  | EN-MBMgZn6Cu3Mn  | EN-MB32110 | -           | ZC 63 | -           | -        | -      | ZC63     | -             |
| MgZnREZr<br>(Ce-dús)    | EN-MBMgZn4RE1Zr  | EN-MB35110 | Mg-Zn4REZr  | ZE 41 | MgZn4SE1Zr1 | RZ5      | MAG 5  | RZ5      | G-Z4TR        |
|                         | EN-MBMgRE3Zn2Zr  | EN-MB65120 | Mg-RE3Zn2Zr | EZ 33 | MgSE3Zn2Zr1 | ZRE 1    | MAG 6  | ZRE 1    | G-TR3Z2       |
| MgREAgZr<br>(Nd-dús)    | EN-MBMgRE2Ag2Zr  | EN-MB65210 | Mg-Ag3RE2Zr | QE 22 | MgAg3SE2Zr1 | MSR      | MAG 12 | MSE      | G-Ag2,5       |
|                         | EN-MBMgRE2Ag1Zr  | EN-MB65220 | -           | EQ 21 | -           | -        | MAG 13 | EQ21     | -             |
| MgREYZr<br>(Nd, Sm, Gd) | EN-MBMgY5RE4Zr   | EN-MB95310 | -           | WE 54 | -           | -        | MAG 14 | WE 54    | -             |
|                         | EN-MBMgY4RE3Zr   | EN-MB95320 | -           | WE 43 | -           | -        | -      | -        | -             |



■ 2. ábra. A hőkezelések hatása AZ91 típusú ötvözet mechanikai tulajdonságaira, ill. a melegszilárdságot jellemző szakítógörbék

jedtek, amelyek hőkezelése T6 (a többi cirkonos típus jellemző hőkezeltégi állapota T5). A Nd és a „nehéz” ritkaföldfémek a jellemző ötvözők. Az ittrium (amelynek oldhatósága a magnéziumban 11,5 tömeg-%

és nagyon megrágtja a termékeket) 250-300°C-ig biztosítja az alkalmazhatóságot.

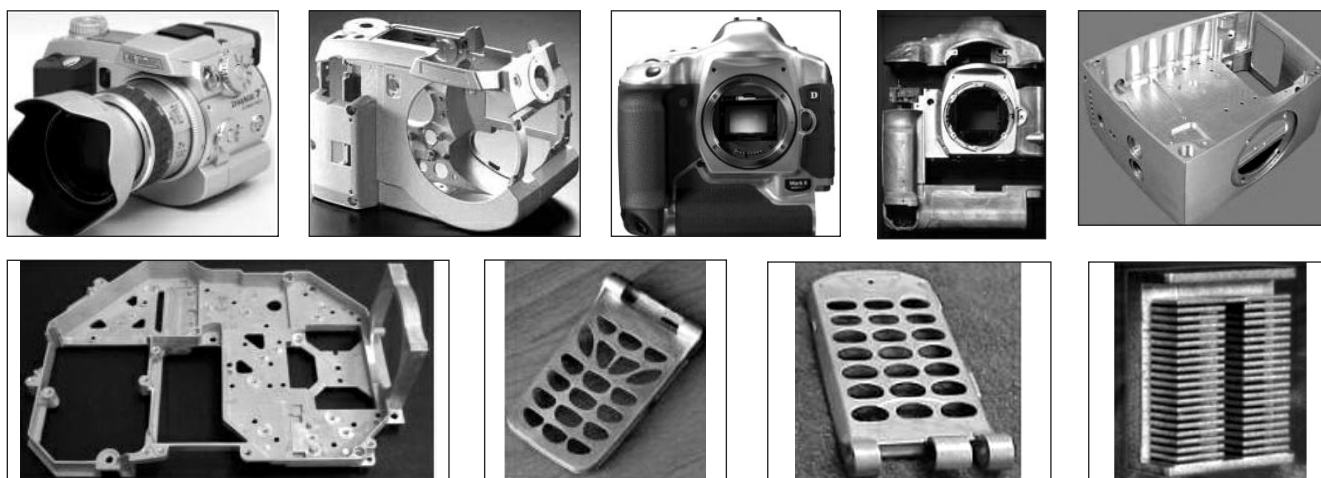
Az autóipar elsősorban az 5,2Y-1,8RF-0,5Zr-1,8Nd összetételű WE54 típust alkalmazza, amely 1000 órát meg nem hala-

dó 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.

3. táblázat. Az öntészeti Mg-ötvözetek kémiai összetétele

| Csoport  | EN 1753    | Öntési eljárás |         | Al   | Zn   | Mn   | RF   | Zr  | Ag  | Y    | Li  | Si   | Fe    | Cu    | Ni    | Fe/Mn |
|----------|------------|----------------|---------|------|------|------|------|-----|-----|------|-----|------|-------|-------|-------|-------|
| MgAlZn   | EN-MB21120 | D              | minimum | 8,3  | 0,35 | 0,15 | -    | -   | -   | -    | -   | -    | -     | -     | -     | -     |
|          |            |                | maximum | 9,5  | 0,9  | 0,50 | -    | -   | -   | -    | -   | 0,08 | 0,005 | 0,025 | 0,001 | 0,032 |
|          | EN-MB21120 | S, K, L        | minimum | 8,3  | 0,40 | 0,17 | -    | -   | -   | -    | -   | -    | -     | -     | -     | -     |
| MgAlMn   | EN-MB21210 | D              | minimum | 1,6  | -    | 0,33 | -    | -   | -   | -    | -   | -    | -     | -     | -     | -     |
|          |            |                | maximum | 2,5  | 0,20 | 0,70 | -    | -   | -   | -    | -   | 0,08 | 0,004 | 0,008 | 0,001 | 0,012 |
|          | EN-MB21220 | D              | minimum | 4,4  | -    | 0,26 | -    | -   | -   | -    | -   | -    | -     | -     | -     | -     |
| MgAlSi   | EN-MB21310 | D              | minimum | 1,8  | -    | 0,18 | -    | -   | -   | -    | -   | 0,7  | -     | -     | -     | -     |
|          |            |                | maximum | 2,5  | 0,20 | 0,70 | -    | -   | -   | -    | -   | 1,2  | 0,004 | 0,008 | 0,001 | 0,022 |
|          | EN-MB21320 | D              | minimum | 3,5  | -    | 0,25 | -    | -   | -   | -    | -   | 0,5  | -     | -     | -     | -     |
| MgZnCu   | EN-MB32110 | S, K, L        | minimum | -    | 5,5  | -    | -    | -   | -   | -    | -   | -    | -     | 2,4   | -     | -     |
|          |            |                | maximum | 0,2  | 6,5  | 0,15 | -    | -   | -   | -    | -   | 0,20 | 0,05  | 3,0   | 0,01  | -     |
|          | EN-MB65120 | S, K, L        | minimum | -    | 2    | -    | 2,5  | 0,4 | -   | -    | -   | -    | -     | -     | -     | -     |
| MgZnREZr | EN-MB35110 | S, K, L        | minimum | -    | 3,5  | -    | 0,75 | 0,4 | -   | -    | -   | -    | -     | -     | -     | -     |
|          |            |                | maximum | -    | 5,0  | 0,15 | 1,75 | 1,0 | -   | -    | -   | 0,01 | 0,01  | 0,03  | 0,005 | -     |
|          | EN-MB65210 | S, K, L        | minimum | -    | 3    | 0,15 | 4,0  | 1,0 | -   | -    | -   | 0,01 | 0,01  | 0,03  | 0,005 | -     |
| MgREAgZr | EN-MB65210 | S, K, L        | minimum | -    | -    | -    | 2    | 0,4 | 2,0 | -    | -   | -    | -     | -     | -     | -     |
|          |            |                | maximum | -    | 0,2  | 0,15 | 3    | 1,0 | 3,0 | -    | -   | 0,01 | 0,01  | 0,03  | 0,005 | -     |
|          | EN-MB65220 | S, K, L        | minimum | -    | -    | -    | 1,5  | 0,4 | 1,3 | -    | -   | -    | -     | 0,05  | -     |       |
| MgYREZr  | EN-MB95310 | S, K, L        | minimum | -    | -    | -    | 1,5  | 0,4 | -   | 4,75 | -   | -    | -     | -     | -     |       |
|          |            |                | maximum | -    | 0,2  | 0,15 | 4,0  | 1,0 | -   | 5,5  | 0,2 | 0,01 | 0,01  | 0,03  | 0,005 | -     |
|          | EN-MB95320 | S, K, L        | minimum | -    | -    | -    | 2,4  | 0,4 | -   | 3,7  | -   | -    | -     | -     | -     |       |
|          |            |                | maximum | 0,20 |      |      | 4,4  | 1,0 | -   | 4,3  | 0,2 | 0,01 | 0,01  | 0,03  | 0,005 | -     |

S = homokformaöntés, K = kokillaöntés, D = nyomásos öntés, L = precíziós öntés



■ 3. ábra. Mg-ötvözetek elektronikai termékekhez

## 2.2. Az Mg-Al-Zn ötvözetek

Az öntészeti Mg-ötvözetek előző csoportjához képest az Mg-Al-Zn ötvözeteket szélesebb körben használják, mivel jóval olcsóbbak. Összetett formák kitöltésére is alkalmasak, de önthetőségüket erősen meghatározza két körülmény: hajlamosak a mikroporozitásra és érzékenyek a falvastagság-változásokra. Jellemző öntési technológiájuk a nyomásos öntés. Az olvadék oxidációjának csökkentésére 10 ppm körüli Be-ötvözést alkalmaznak. A klasszikus 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 binér ötvözetek

Az alumínium maximális oldhatósága 12,7% (437°C-on). A szilárd oldat is legsűrűbb hexagonális (HCP) kristályszerkezetű, mint maga a fémmagnézium. Szobahőmérsékleten azonban az Al oldhatósága 1% alá csökken. A lehűléskor delta- és tér-közepes köbös (TKK) gamma-fázis ( $Mg_{17}Al_{12}$ ) válik ki. A megszilárdulást az Mg-ban dús delta-dendritek képződése határozza meg.

### Mg-Zn binér ötvözetek

A horgany maximális oldhatósága 6,2% (342°C-on). A szilárd oldat (alfa) a legsűrűbb, hexagonális (HCP) kristályszerkezetű. Szobahőmérsékleten a Zn oldhatósága 2% alá csökken. A horgany kissé

javítja a szívósságot, a korrózióállóságot, csökkenti az olvadáspontot és növeli az ömledék hígfolyságát. A mikroporozitási és a melegpedési hajlam növelése miatt 3%-ban szokás maximálni a mennyiségét. Az Mg-Zn-Al rendszerben megjelenhet az  $Mg_{32}(AlZn)_{49}$  típusú ternér fázis, ha az Al/Zn arány nagyobb, mint 3.

### Mn-nal ötvözött típusok

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, amelyeknek a Mg-mal reagálva létrejövő intermetallikus fázisai mikrokatódként működnek, és a környező Mg erőteljes anódos oldódását váltják ki korróziós környezetben. A mechanikai tulajdonságokat az Al-tartalom határozza meg (1. ábra). Az Al-Zn ötvözésű Mg-ötvözetek alkalmazási határhőmérséklete nem mehet 120°C fölé.

### 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 (RF-) 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 Al2RE és Al4RE típusú intermetallikus fázisokat képeznek. A gyors hűtéssel gyarapítható utóbbiak különösen jelentősen gátolják a kúszási mikromechanismusokat, s ezáltal az ötvö-

4. táblázat. Kokillaöntésű Mg-ötvözetek mechanikai tulajdonságai

| Csoport  | Anyag      | Állapot | R <sub>m</sub> [MPa] | R <sub>p0,2</sub> [MPa] | A <sub>50</sub> [%] | HBW     |
|----------|------------|---------|----------------------|-------------------------|---------------------|---------|
| MgAlZn   | EN-MB21120 | F       | > 160                | > 110                   | > 2                 | 55 - 70 |
|          |            | T4      | > 240                | > 120                   | > 6                 | 55 - 70 |
|          |            | T6      | > 240                | > 150                   | > 2                 | 60 - 90 |
| MgZnCu   | EN-MB32110 | T6      | > 195                | > 125                   | > 2                 | 55 - 65 |
| MgZnREZr | EN-MB35110 | T5      | > 210                | > 135                   | > 3                 | 55 - 70 |
|          | EN-MB65120 | T5      | > 145                | > 100                   | > 3                 | 50 - 60 |
| MgREAgZr | EN-MB65210 | T6      | > 240                | > 175                   | > 3                 | 70 - 90 |
|          | EN-MB65220 | T6      | > 240                | > 175                   | > 2                 | 70 - 90 |
| MgYREZr  | EN-MB95310 | T6      | > 250                | > 170                   | > 2                 | 80 - 90 |
|          | EN-MB95320 | T6      | > 220                | > 170                   | > 2                 | 75 - 90 |

5. táblázat. Nyomásos öntésű Mg-ötvözetek mechanikai tulajdonságai

| Csoport | Anyag      | Állapot | R <sub>m</sub> [MPa] | R <sub>p0,2</sub> [MPa] | A <sub>50</sub> [%] | HBW     |
|---------|------------|---------|----------------------|-------------------------|---------------------|---------|
| MgAlZn  | EN-MB21120 | F       | 200 - 260            | 140 - 170               | 1 - 9               | 65 - 85 |
| MgAlMn  | EN-MB21210 | F       | 150 - 220            | 80 - 100                | 8 - 25              | 40 - 55 |
|         | EN-MB21220 | F       | 180 - 230            | 110 - 130               | 5 - 20              | 50 - 65 |
|         | EN-MB21230 | F       | 190 - 250            | 120 - 150               | 4 - 18              | 55 - 70 |
| MgAlSi  | EN-MB21310 | F       | 170 - 230            | 110 - 130               | 4 - 14              | 50 - 70 |
|         | EN-MB21320 | F       | 200 - 250            | 120 - 150               | 3 - 12              | 55 - 80 |

**6. táblázat.** Li-ötvözésű Mg-ötvözetek összetétele és mechanikai tulajdonságai szobahőmérsékleten

|         | Li [%] | Zn [%] | Al [%] | R <sub>p0,2</sub> [MPa] | A <sub>50</sub> [%] |
|---------|--------|--------|--------|-------------------------|---------------------|
| 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                  |

zet kivételesen jó kúszásállósággal bír [3,4]. A különféle Mg-ötvözetek kúszási alakváltozására vonatkozó adatokat tartalmazza az 1. táblázat.

#### Cu-tartalmú ötvözetek

A ZC63 (6,0% Zn - 3,0% Cu - 0,5% Mn) ötvözet az észak-amerikai autógyártók kedvelt típusa. Jó öntészeti tulajdonságai miatt motorblokkokat is öntenek belőle.

#### 2.3. Az öntészeti ötvözetek tulajdonságai

Az öntészeti Mg-ötvözetekre nagyon sok nemzeti szabvány van forgalomban. Gyakori, hogy egy adott országon belül több szabvány is érvényes, amelyek egyike mindig repülőgépipari szabvány. A különféle szabványos jelöléseket az 2. táblázat foglalja össze az itt tárgyalt ötvözetcsoportok szerint tagolva. A 3. táblázatban, hasonló bontásban szerepel a szóban forgó ötvözetek kémiai összetétele, és emellett a jellemző öntészeti eljárás jele is. A 4-5. 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 szakítószilárdság értékében (a folyáshatárok gyakorlatilag azonosak, 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 (2. ábra). A hőkezeléstípusok egyezményes jelölése és jelentése a következő:

**7. táblázat.** Alakítható Mg-ötvözetek, valamint a legfontosabb szabványokban alkalmazott jelölései

| Csoport | Német    | USA   | Brit      | Francia  | Európa  | Összetétel |      |      |      | Folyáshatár           |
|---------|----------|-------|-----------|----------|---------|------------|------|------|------|-----------------------|
|         | DIN 1729 | ASTM  | BS        | AIR 9052 | AECMA   | Al %       | Zn % | Mn % | Zr % | R <sub>p0,2</sub> MPa |
| Mg99,8  | 3.5003   | -     | -         | -        | -       | -          | -    | -    | -    | -                     |
| MgMn2   | 3.5200   | M1A   | MAG-E-101 | G-M2     | -       | -          | 1,6  | -    | -    | 150-170               |
| MgAl2Zn | -        | -     | -         | -        | -       | 2,2        | 0,5  | 0,1  | -    | 150-170               |
| MgAl3Zn | -        | AZ31C | MAG-E-111 | -        | -       | 3,0        | 1,0  | 0,1  | -    | 150-170               |
| MgAl3Zn | 3.5312   | AZ31B | MAG-E-111 | G-A3 Z1  | MG-P-62 | 3,0        | 1,0  | 0,35 | -    | 160                   |
| MgAl6Zn | 3.5612   | AZ61A | MAG-E-121 | G-A6 Z1  | MG-P-63 | 6,3        | 1,0  | 0,20 | -    | 180 - 200             |
| MgAl8Zn | 3.5812   | AZ80A | -         | G-A7 Z1  | MG-P-61 | 8,0        | 0,5  | 0,20 | -    | 200 - 230             |
| MgZn3Zr | -        | ZK30  | MAG-E151  | -        | MG-P-43 | -          | 3,0  | -    | 0,6  | 200 - 230             |
| MgZn6Zr | -        | ZK60A | MAG-E-161 | -        | -       | -          | 6,0  | -    | 0,6  | 220 - 250             |
| -       | -        | WE43A | -         | -        | -       | -          | -    | -    | 0,5  | 155-170               |
| -       | -        | WE54  | -         | -        | -       | -          | -    | -    | 0,5  | 190 - 220             |

- F = öntött állapot, utólagos hőkezelés nélkül
- T4 = oldó izzítás és természetes öregítés (érlelés)
- T5 = az öntvény szabályozott hűtése + mesterséges öregítés vagy túlóregítés (stabilizálás) lépésekből álló nemesítés
- T6 = oldó hőkezelésből + a maximális keménységre végzett mesterséges öregítésből álló nemesítés.

Magnéziumötvözetből készül számos elektronikai berendezés vázszerkezete. Az ilyen videokamerák, fényképezőgépek, hangfaldobozok, számoló és számítógépek, szkennerek, folyadékkristályos monitorok borítása egyetlen, erős magnézium-ötvözet vázra van felerősítve, amely teljes védelmet biztosít az elcsavarodás, ütközés és más külső behatások ellen (3. ábra).

Az egyre könnyebb, ugyanakkor nagyobb terhelhetőségű sporteszközök – teniszütők, golfütők stb., iránti igény jelentősen megnövekedett a fogyasztói társadalom kiszélesedésével. A teniszütők fejének kerete készül magnéziumból, illetve magnéziumalapú kompozitból. Az erősítőszál jelentősen növeli a merevséget, ami nem

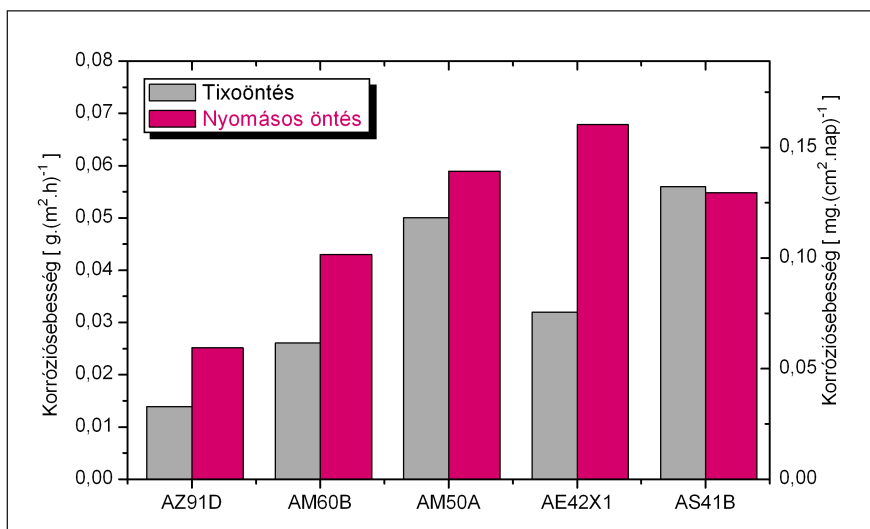
elhanyagolható szempont az ütés erősségét illetően. A jó minőségű görkorcsolyák keréktartó váza, amely a fő teherviselő elem, magnéziumötvözetből készül. A szuperkönnyű orsóval szerelt horgászbotokat főleg lepkézéshez használják. A többszöri bedobás-visszatekerés közben nem elhanyagolható a bot és az orsó tömege, valamint a készség kiegyensúlyozottsága.

A kerékpársport és a kerékpáros közlekedés világszerte hihetetlen népszerűségnek örvend. Hazánk ezen a téren nem számít éppen nagyhatalomnak, de a könnyű kerékpárok iránti igény világosan érzékelhető.

A jó öreg acélvázak kerékpárok vázáinak tömege 4-5 kg körül mozgott, és 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-ötvözetű kerékpárvázak viszont jelentősen csökkentik a lendítőtömeget: 1,2-1,5 kg-ot nyomnak mindössze a latban. A szénszálas kompozitból épített – és egy vagyonba kerül – csodák pedig nem érik el az 1000 grammot sem (4. ábra).



4. ábra. Mg-ötvözetből készült sporteszközök



■ 5. ábra. Az öntési eljárás hatása a Mg-ötvözetek korróziójára

### 3. Alakítható ötvözetek

#### Al-Zn ötvözésű 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 legerterjedtebb, 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 nyomófolyáshatár nem tért el; az alakítható ötvözeteknél azonban fel kell hívni a figyelmet arra, hogy számos típusnál a nyomófolyáshatár csak 60-70%-a a húzásra érvényes.

A nagyobb szilárdságú AZ61A és AZ80A típusok a folytatással és a kovácsolással készülő gyártmányok alapanyagai. Ezeket alakítás után nemesítik.

#### Mn-ötvözésű 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-t is tartalmaz; 345°C-ig melegsziárd, hengerelt gyűrűk és súllyesztékes kovácsolás-szal készülő gyártmányok alapanyaga.

#### Zr-ötvözésű (Th-mentes) ötvözetek

A Zr szemcsefinomító és szemcsedurvulás-gátló hatása. A kis, ill. közepes Zn-tartalmú típusok hengerelhetők. Az öntészeti ötvözetek között említett RZ5 típus folya-

tással és kovácsolással is feldolgozható. A ZK30, ZK40A és a ZK60A ötvözetekből elsősorban rudak és csövek készülnek.

#### Th-tartalmú ötvözetek

A Th-mal való ötvözés kompatibilis a Zr-ötvözéssel. A Th hozzáadásának célja a megalakíthatóság és a melegsziárdóság növelése.

#### Ritkaföldfém – (RF-) tartalmú ötvözetek

Hasonlóan a tóriumhoz, ezen ötvözőkkel is a megalakíthatóság javítása a cél. Az öntészeti ötvözeteknél már megismert WE43 és WE54 típusok képviselik a szóban forgó csoportot.

#### Li-tartalmú ötvözetek

A lítiummal ötvözött típusokra 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. A taiwani Hsu-Yang Technologies Co. Ltd. Tai-pei (TW) három feltalálója 2002-ben nyújtott be ilyen ötvözetekre szabadalmi kérelmet az USA-ban [4]. Az általuk szabadalmaztatott anyagokból – amelyek mechanikai tulajdonságait a 6. táblázat tartalmazza – készített 0,2 mm vastag lemezekon  $m = 0,67$  húzási tényezőt mértek, amely közel esik az 1100-as sorozatú alumíniumlemezek 0,55-ös és a jól mélyhúzható acéllemezek 0,45-ös húzási tényezőjéhez.

Az európai szabványosítás nem érin-

tette azt a helyzetet, miszerint az alakítható Mg-ötvözeteket az 1950-ben alapított AECMA (European Association of Aerospace Industries) szabványai szerint tipizálják. A legfontosabb alakítható Mg-ötvözetek típusait, összetételét és folyáshatárát a 7. táblázat összegzi.

A Mg-ötvözetek egyik különlegesen fontos tulajdonsága a rezgéscsillapító képesség. 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 nagyfokú íkresedési hajlammal magyarázható.

### 4. A Mg-ötvözetek korróziós jellemzői

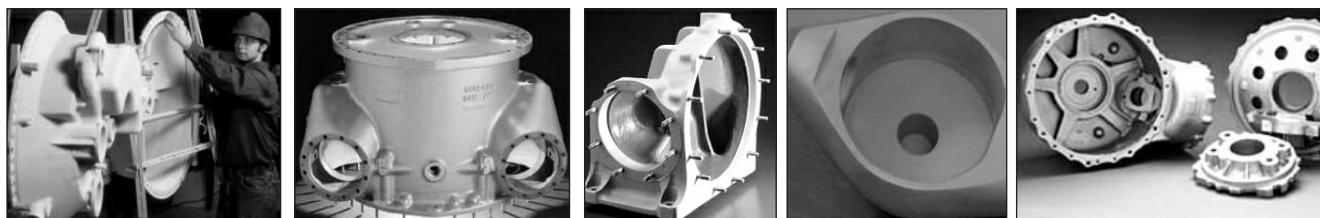
A magnéziumötvözetek korróziós viselkedését három tényező határozza meg:

- a jelentős redukálóképesség,
- a savakkal és azok sóival való nagyfokú reakcióképesség,
- az erősen negatív elektrokémiai potenciál, amely miatt más fémekkel érintkezve anódosan viselkedik.

Az ötvöző-, ill. szennyező elemek hatását tekintve szinte katasztrofálisan gyorsítja a korróziót a Fe, Ni, Co és Cu. Az Mg-Al ötvözetekben a Fe nagyon reaktív Al-Fe intermetallikus fázist(oka)t képez. Az Al, Si, Pb, Sn, Mn, Cd és kb. 3%-ig a Zn egyáltalán nem fokozza a korróziót. Sőt, a Mn, az ittrium és a Zn kifejezetten javítja a korrózióállóságot, mivel megszüntetik a szennyezők káros hatását. Ha  $Fe/Mn < 0,032$ , a korrózió veszélye nem számottevő. A korróziós folyamatok sebességét az öntési technológia is befolyásolja: a legtöbb ötvözetnél számottevően jobb a tixoöntéssel készített darabok korrózióval szembeni ellenállása, mint a nyomásos öntésűeké (5. ábra).

A magnézium felületén is védőréteg alakul ki, de ennek stabilitása nem túlzottan erős. A passzív film sérülése lyukkorróziót okoz. Az 1,5%-nál több alumíniumot tartalmazó típusok feszültségi korrózióra is érzékenyek. A galvanikus csatolás majdnem minden más fémes anyaggal a Mg galvánkorrózióját okozza, de pl. az alumínium vagy a kadmiumozott acél szinte alig fenyegeti ilyen szempontból.

A megfelelő ötvözőkkel való ötvözés mellett a korrózióvédelem a felületi védő oxidréteg erősítésére irányul. Eleinte a fe-



■ 6. ábra. Helikopteralkatrészek

lületkezelést savas vagy semleges fürdőben való passzíválás, majd festés követte, de 20-25 éve ezeket a módszereket elkezdte felváltani az anódos oxidálás, amely jóval hatékonyabbnak bizonyult. Az elterjedtebb elektrokémiai kezelések a következők:

- "DOW 7" (9, 17, 19)-eljárás: savas fürdővel működik, helikopterek alkatrészeihez fejlesztette ki a Dow Chemicals);
- HAE-eljárás: bázikus fürdővel működik, az autóipar és a helikoptergyártók használják;
- MAGOXID- vagy KEPLA-eljárás: bázikus fürdő + nátrium-szilikátos rétegtömítés;
- OXSILAN MG 0610 (AMTS-S-0610, ~11, ~12): kromátmentes szilanizálás;
- ALGAN 2, ALGAN 2M: plazmás-géles kezelés;
- ALGAN 4MAC: mikroíves kezeléssel felvitt kerámiaréteg;
- Gardobond X4707: fluoridos kezelés;
- AMTS-C-7265: speciális kompozitbevonat;
- Alodine 5200

## 5. Különleges alkalmazások

Az előzőekből kitűnt, hogy a magnézium-ötvözetek korrózióval szembeni ellenállását jelentősen megnövelte a nagy tisztaságú ötvözetek gyártástechnológiájának kifejlesztése. Ez utat nyitott a repülőgé- és helikoptergyártásba való betörésnek. Az 1990-es években indított új helikopterfejlesztési programok (MD500, Apache, Eurocopter EC120, NH90, Sikorsky S92) mind egyikeiben jelentős szerepet kaptak a Mg-ötvözetek. A hajtóművek össztömegének átlagosan 2%-át teszik ki (az Al-ötvözetek aránya 6%). A Rolls-Royce 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



■ 7. ábra. Magnéziumanódok

2000 kerekei, az AlphaJet ablakkeretei, karter- és váltóházak (6. ábra).

A francia gyorsvasút a TGV első két generációs járműveiben az ülések kerete alumínium-ötvözetből készült, tömegük 26 kg. Az éppen 10 éve debütált, 3. generációs TGV Duplex magnézium üléskereteinek tömege csak 14 kg, és jelentősen nőtt a rezgécillapító hatás.

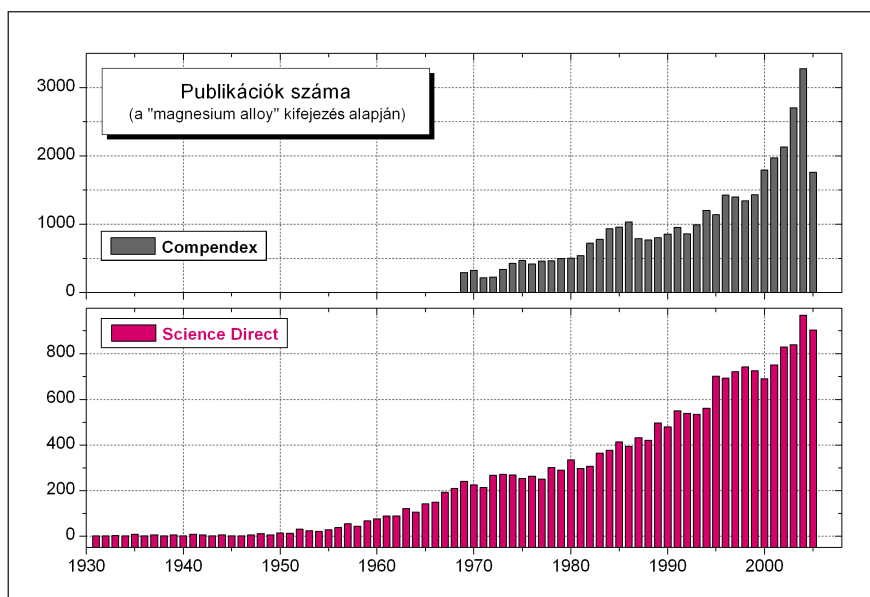
A főleg Japánban és Németországban fejlesztett, 30-40% Li-tartalmú Mg-Li ötvözetek sűrűsége nem ritkán kisebb, mint a vízé. A fejlesztések célja egyrészt nagy fajlagos ellenállású ötvözetek előállítása, másrészt pedig a jelentős tömegcsökkentés, pl. a Ferrari-BBS keréktárcsája esetében.

A magnéziumanódokat széles körben alkalmazzák a tengervízbe merülő, ill. ta-

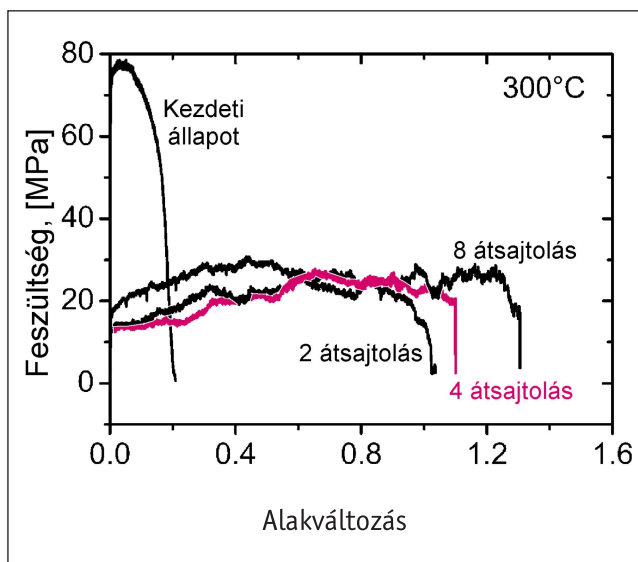
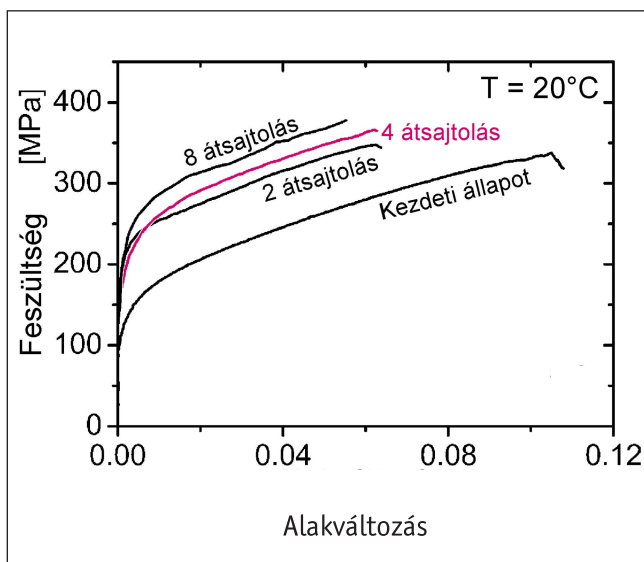
lajba fektetett acélszerkezetek katódos védelmére. Mivel Magyarországon nem okoz problémát a tengervíz korróziós hatása, elsősorban a csővezetékek és a hőtárolós villanybojlerek korrózióvédelmi rendszereiben fordulnak elő. Jellegzetes típusaikat a 7. ábra mutatja.

## 6. A Mg-ötvözetek és a tudomány

A magnézium-ötvözetekről szóló tudományos publikációk számát a „magnesium alloy” keresőszavak alapján vizsgáltuk meg a két legnagyobb publikációs adatbázisban, az Elsevier kiadó folyóiratainak adatait összesítő Science Directben, valamint a jóval kiterjedtebb, a konferenciákat is figyelő Compendexben (8. ábra).



■ 8. ábra. A Mg-ötvözetekkel kapcsolatos tudományos publikációk számának alakulása



■ 9. ábra. Könnyöksajtóval alakított Mg-ötvözet próbatestek szakítógörbéi

A diagramok tanúsága szerint az 1960-as években erőteljes kutatási figyelem összpontosult a Mg-ötvözetekre, de aztán a „pangás” másfél évtizede következett. Mintegy 15 éve, azon belül pedig az utóbbi öt évben viszont jelentősen növekedik a magnéziumos publikációk száma, amely arra utal, hogy valami komoly hajtóerő működik – nyilvánvalóan ez a háttérpar új elvárásainak összessége.

A hazai szakemberek viszont meglehetősen mostohán kezelik a magnéziumot, legalábbis, ami a magyar nyelvű publikációkat illeti. A [www.matarka.hu](http://www.matarka.hu) adatbázisában – amely ugyan nem egy mindenre kiterjedő adatbázis – mindössze öt műszaki vonatkozású cikk található, amelynek a magnézium is a tárgykörébe tartozik. *Varga Sándor* a magnézium-ötvözetből készült repülőgép-alkatrészek javítóhegesztéséről írt a *Hegesztéstechnika* 2004. évi 2. számában. A magnézium újrahasonosítása volt a „Műszaki információ. Hulladékok és másodnyersanyagok hasznosítása” című kiadvány 2003/11-es és 2001/12-es s számának témája. *Szőcs Katalin* a ferroötvözetekben található fémes magnézium hatóerejének meghatározásáról írt a *Műszaki szemle* 2001. évi 4. számában, s végül *Kiss A. Sándor* mutatta be a Magyar Magnézium Társaságot a *Környezet és fejlődés* 1992/3-as számában.

A magnéziumról a közelmúltban kiderült, hogy hidridje 7,7% hidrogént képes felvenni. A Mg-hidrid nagy stabilitása és lassú hidrogénleadása azonban gátolja a

tiszta Mg akkumulátor célú felhasználását. E probléma leküzdésére fejlesztették ki kristályos és amorf változatban is a 35% Ni-tartalmú Mg-ötvözetet, amelyben a Mg<sub>2</sub>Ni intermetallikus fázisnak jut a főszerep a hidridképzésben [6].

Az ultrafinomszemcsés és a nanoanyagok különleges mechanikai tulajdonságainak felismerése a magnéziumra is ráirányította azokat a kutatási törekvéseket, amelyek a könnyöksajtóval (ECAP) [7] előállított anyagokkal kapcsolatosak. Ezen a téren hazai kutatók is szép eredményeket értek el, amikor bemutatták, hogy pl. a szobahőmérsékleten mért folyáshatár a duplájára növekedik, 300°C-on pedig szinte szuperképlékenyen alakítható az ultrafinomszemcsés AZ91 ötvözet (9. ábra) [8].

A magnéziumról írott ismertetésünk végén feltétlenül jelezni kell, hogy az első rész megjelenése után Bódi Dezső levélben jelezte, hogy Magyarországon először 1958-ban sikerült ipari mennyiségben fémmagnéziumot előállítani. Dolomitból kiindulva, szilikotermikus-vákuumos redukációs technológiát alkalmaztak az apci Fémtermia Vállalat kísérleti üzemében. A több éves kísérleti program részletes bemutatását ígérte levelében az apci üzem akkori vezetője, Bódi Dezső.

#### Irodalom

[1] *Brown E.G.*: The History of Metallic Magnesium 1808-1890 (University of

Salford MSc Thesis, 1972)

- [2] *Lundin R., Wilson J.R.*: Rare Earth Metals Find Interesting New Uses Despite Lack of Engineering Data. <http://www.arris-intl.com/customer/Papers/remetalspaper.html>
- [3] *Powell B.R., Rezhets V., Balogh M. P., Waldo RA*: Microstructure and Creep Behavior in AE42 Magnesium Die-Casting Alloy. *JOM* 54 (2002:8), 34-38.
- [4] U.S. Patent US6893515 Manufacturing process for highly ductile magnesium alloy
- [5] *Colombié M. et coll.*: Matériaux industriels, matériaux métalliques. Dunod, Paris, 2000.
- [6] *Perez P., Garcés G., Sommer F., Adeva P.*: Mechanical properties of amorphous and crystallised Mg-35 wt.% Ni. *Journal of Alloys and Compounds*, megjelenés alatt
- [7] *Krallics G., Szeles Z., Semenova I.P., Dotsenko T.V., Alexandrov IV*: Experimental Investigations of the Al-Mg-Si Alloy Subjected to Equal-Channel Angular Pressing. in: *Zehetbauer M.J., Valiev R.Z.* (eds.): *Nanomaterials by Severe Plastic Deformation*, Wiley-VCH, Weinheim 2004, 183-189.
- [8] *Máthisa K., Gubicza J., Nam N.H.*: Microstructure and mechanical behavior of AZ91 Mg alloy processed by equal channel angular pressing. *Journal of Alloys and Compounds*, megjelenés alatt