

- [2] Burnett, P. and T. Page: Surface softening in silicon by ion implantation. Journal of materials science, 1984. 19(3): p. 845–860.
- [3] Jönsson, B. and S. Hogmark: Hardness measurements of thin films. Thin solid films, 1984. 114(3): p. 257–269.
- [4] Burnett, P. J. and D. Rickerby: The mechanical properties of wear-resistant coatings: I: Modelling of hardness behaviour. Thin Solid Films, 1987. 148(1): p. 41–50.
- [5] Johnson, K.: The correlation of indentation experiments. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1970. 18(2): p. 115–126.
- [6] Marsh, D.: Plastic flow in glass. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 1964. 279(1378): p. 420–435.
- [7] Tabor, D.: The hardness of solids. Review of physics in technology, 1970. 1(3): p. 145.
- [8] Tuck, J., et al.: Modelling of the hardness of electroplated nickel coatings on copper substrates. Surface and Coatings Technology, 2000. 127(1): p. 1–8
- [9] Tuck, J. R., et al.: On the application of the work-of-indentation approach to depth-sensing indentation experiments in coated systems. Surface and Coatings Technology, 2001. 137(2-3): p. 217–224.
- [10] Puchi-Cabrera, E.: A new model for the computation of the composite hardness of coated systems. Surface and Coatings Technology, 2002. 160(2-3): p. 177–186.
- [11] Iost, A., et al.: A comparison of models for predicting the true hardness of thin films. Thin Solid Films, 2012. 524: p. 229–237.
- [12] Coorevits, T., et al.: An integral approach of indentation of Functionally Graded Materials. Surface and Coatings Technology, 2020. 381: p. 125–176.
- [13] Mata, M., O. Casals and J. Alcalá: The plastic zone size in indentation experiments: The analogy with the expansion of a spherical cavity. International Journal of Solids and Structures, 2006. 43(20): p. 5994–6013.
- [14] Ichimura, H., F. Rodriguez, and A. Rodrigo: The composite and film hardness of TiN coatings prepared by cathodic arc evaporation. Surface and Coatings Technology, 2000. 127(2-3): p. 138–143.
- [15] Ichimura, H., Y. Ishii and A. Rodrigo: Hardness analysis of duplex coating. Surface and Coatings Technology, 2003. 169: p. 735–738.
- [16] Széll Attila: Melegalakító szerszámacélon kialakított karbonitridált réteg mikroszerkezetének optimalizálása továbbí pvd bevonatoláshoz, Dunaújvárosi Egyetem, TDK dolgozat, 2019.

HLAVÁCS ADRIENN – SCHWEITZER BENCE – MERTINGER VALÉRIA – BENKE MÁRTON

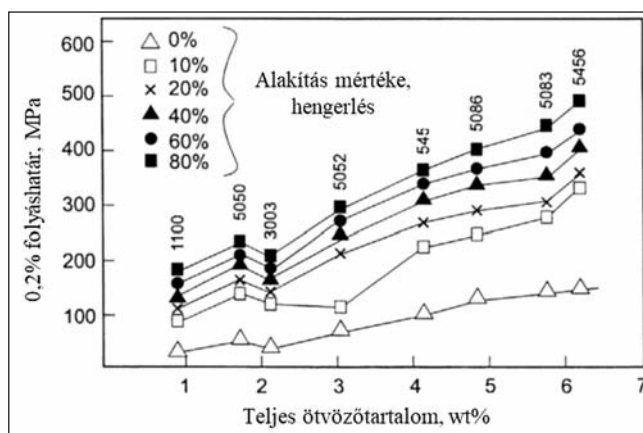
## Melegen hengerelt alakítható alumínium-ötvözetek fülesedése és a fő ötvözők hatása

*Jelen kutatásban melegen hengerelt állapotú, új összetételű, alakítható (3xxx-es és 5xxx-es típusú) alumínium-ötvözetek fülesedését vizsgáljuk. A lemezek vastagságából adódóan a konvencionális csészehúzó vizsgálatok nem alkalmazhatóak, ezért az általunk kidolgozott fülesedést becsülő módszert alkalmazzuk, melyhez kizárólag textúravizsgálatok eredményeire van szükség. Az eredményekből megállapítható, hogy a két ötvözet másképp viselkedik a meleghengerlés után, illetve, hogy az ötvöztartalom az egyik ötvözet esetében befolyásolja, a másik ötvözet esetében nincs hatással a fülesedés értékeire.*

### Bevezetés

Az alumínium (Al) alapú ötvözetek felhasználás szempontjából nemesíthető és alakítható ötvözetek csoportjára bonthatók. Az alakítható alumínium-ötvözetek családjába tartoznak az ötvöztelen (1xxx-es), a mangán- (Mn) tartalmú (3xxx-es), a magnézium- (Mg) tartalmú (5xxx-es) és az egyéb ötvözőket tartalmazó Al (8xxx-es) ötvözetek. Ezen ötvözetekből készült félkész termékek végső tulajdonságait nagymértékben befolyásolja a felhasznált alapanyag ötvöztartalma és az előállítás módja [1–5]. Az alakítás és az ötvöztartalom hatását a folyáshatárra alakítható alumínium-ötvözetek esetében a 1. ábra mutatja.

A hengerléssel előállított félkész termékek tulajdonságaiban fontos szerepet játszik az alakíthatóság irányfüggése is, amelyet a meleg-, illetve hideghengerlés, valamint az alkalmazott lágyító hőkezelések során kialakuló kristálytani



■ 1. ábra. A folyáshatár változása a hidegalakítás mértéke és az ötvöztartalom függvényében [3]

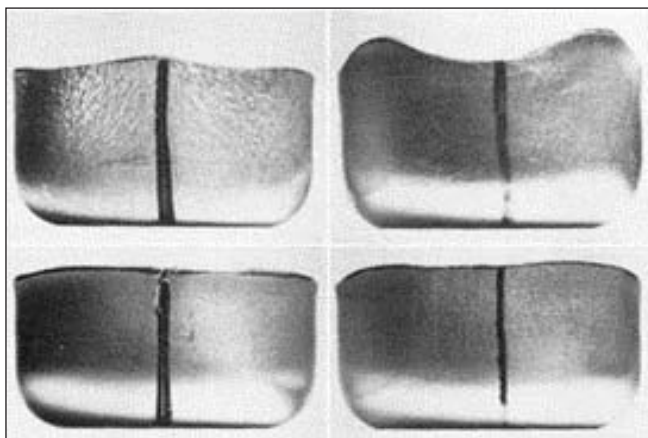
**Hlavács Adrienn** szakmai életrajzát a 2019/1. számunkban közzétük.

**Schweitzer Bence** 2019-ben szerzett anyagmérnöki diplomát a Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Karán. Jelenleg ugyanott kohómérnöki MSc-képzésén 3. féléves hallgató. Főbb kutatási területei: röntgendiffrakciós textúravizsgálatok, fülese-

dés becsülő módszer alkalmazása FKK és TKK rácsú fémek esetén.

**Dr. Mertinger Valéria** szakmai életrajzát a 2017/2. számunkban közzétük.

**Dr. Benke Márton** szakmai életrajzát a 2019/1. számunkban közzétük.



■ 2. ábra. Különböző textúrájú mélyhúzott alumínium csészék [6]

textúra befolyásol [3]. A kristálytani textúra okozta inhomogenitás kimutatásának legelterjedtebb módja a csészehúzó vizsgálat. Ennek során textúras anyagok esetében lehúzott csészén magasabb (fülek), illetve mélyebb (völgyek) figyelhetők meg. A legelterjedtebb alumíniumötvözetek esetében négyes szimmetria látható a fülek megjelenésében. Hidegen hengerelt lemezek esetében a fülek hengerlési irányhoz (HI) képest ( $\phi$ )  $45^\circ + (n \cdot 90^\circ)$  helyeken, míg újrakristályosodott állapotban a HI-hoz képest a  $0^\circ + (n \cdot 90^\circ)$  irányokban jelentkeznek (2. ábra) [3, 6–8].

A csészehúzó vizsgálatok elvégezhetőek a végvastagságú lemezekben, így a félkész termékek jellemzése megoldott. Napjainkban már fontos az alapanyag viselkedésének ismerete a teljes gyártási folyamat alatt, különösen olyan esetekben, amikor új összetételű ötvözetek állnak bevezetés előtt. A melegen hengerelt állapotú lemezek esetében azonban a csészehúzó vizsgálat nem végezhető el a lemezek vastagsága miatt. A Miskolci Egyetem Fémtechnológiai és Nanotechnológiai Intézete által kidolgozott {200} pólusábra alapú módszer alkalmas alumíniumötvözetek fülesedésének jellemzésére széles lemezvastagság-tartományban [9–14]. Kutatásunk során célunk új összetételű, 3xxx és 5xxx típusú alakítható alumíniumötvözetek fülesedésének jellemzése a teljes gyártási folyamat során. Jelen cikkünkben csak melegen hengerelt állapotú lemezek fülesedését mutatjuk be olyan ötvözeteken, melyekben az Fe és Si tartalma az elterjedt ötvözetekhez viszonyítva szélesebb tartományban változik.

### Elvégzett vizsgálatok

Alakítható alumíniumötvözetek családjába tartozó 3xxx és 5xxx típusú melegen hengerelt állapotú ötvözetek vizsgálatát végeztük el. A vizsgálatok során 30/50-nel jelöltük az alap ötvözeteket, amihez képest vizsgáltuk az ötvözőtartalom változását. A 3xxx-es ötvözetek esetében a szilícium- (Si) és a vas- (Fe) tartalom hatását vizsgáltuk. Egyik minta esetében megmaradt az eredeti Fe/Si arány,

másik minta esetében megnövekedett. Az 5xxx-es ötvözetek esetében a Mn és az Mg változását vizsgáltuk. A vizsgált ötvözetek ötvözőinek változását az 1. táblázat mutatja.

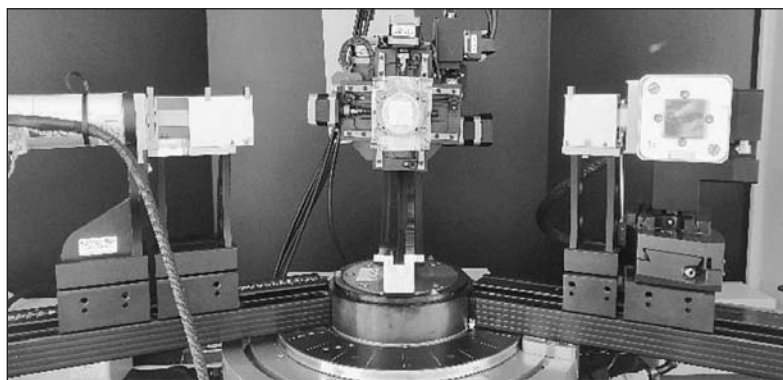
A meleghegerléseket VonRoll típusú kísérleti hengerállványon végeztük, a 3xxx-es ötvözetek esetében  $470^\circ\text{C}$ -on 6,7 mm vastagságig, az 50, 51 és 52 jelű ötvözetek esetében  $450^\circ\text{C}$ -on 5 mm vastagságig, az 53, 54 és 55 jelű ötvözeteken  $450^\circ\text{C}$ -on 7 mm vastagságig.

A röntgendiffrakciós textúravizsgálatokat a Miskolci Egyetem Fémtechnológiai, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet Röntgendiffrakciós Laboratóriumában található Euler-bölcsővel felszerelt Bruker D8 Advance diffraktométerrel végeztük (3. ábra), az alábbi paraméterek alkalmazásával:  $\text{CoK}\alpha$  sugárzás, 40 kV csőfeszültség, 40 mA áram, gyújtási idő 10 s, lépésköz ( $\Delta 2\theta$ )  $0,05^\circ$ . A mérés során a legnagyobb relatív intenzitású, {111}, {200} és {220} pólusábrákat vettük fel. A pólusábrák alapján kiszámítottuk az orientációs eloszlásfüggvényt (ODF). Az ODF szintetizálása során először a mért pólusábrákat újrászámítottuk, hogy megkapjuk a holtterek adatait is, vagyis a teljes,  $\chi = 0\text{--}90^\circ$  tartományhoz tartozó pólusábrákat. Az újrászámításhoz a hengerlést jellemző ortorombos alakváltozást használtuk, ami a HI és keresztirány (KI) tengelyeire egyaránt szimmetrikus pólusábrát eredményez.

Az intézetünkben kidolgozott pólusábra alapú módszert alkalmaztuk a vizsgált alumíniumlemezek fülesedésének becslésére. A módszer alapja, hogy a {200} pólusábra teljes intenzitáseloszlás-függvényének a hengerlési síkra eső merőleges vetülete jó közelítéssel azonos a csészehúzás-kor kapott profillal. A módszer első lépése pólusábrák mérése (4a ábra), újrászámítása (4b ábra), majd a {200} ref-

1. táblázat. A vizsgált ötvözetek

| Ötvözetcsalád | Ötvözet jelölése | Ötvözőtartalom (tömegszázalék) |      |      |      | Arány |
|---------------|------------------|--------------------------------|------|------|------|-------|
|               |                  | Mn                             | Si   | Fe   | Mg   |       |
| 3xxx ötvözet  | 30               | 1,08                           | 0,25 | 0,6  | -    | 2,4   |
|               | 31               | 1,08                           | 0,15 | 0,36 | -    | 2,4   |
|               | 32               | 1,08                           | 0,15 | 0,40 | -    | 2,6   |
| 5xxx ötvözet  | 50               | 0,35                           | -    | -    | 3,28 |       |
|               | 51               | 0,13                           | -    | -    | 3,42 |       |
|               | 52               | 0,44                           | -    | -    | 3,25 |       |
|               | 53               | 0,28                           | -    | -    | 4,91 |       |
|               | 54               | 0,32                           | -    | -    | 4,60 |       |
|               | 55               | 0,42                           | -    | -    | 4,19 |       |



■ 3. ábra. Euler-bölcsővel felszerelt Bruker D8 Advance diffraktométer

lexió esetében a  $\chi$ - (a diffraktáló nyaláb normális és a normál irány közötti szög) metszetek illesztése  $n$  darab Gauss-görbével. Ezután meghatározzuk a Gauss-görbék területeit ( $T_i^\varphi$ ), majd szorozzuk a Gauss-görbék maximumához tartozó  $\chi$ -érték szinuszával ( $\sin\chi_{MAX,i}^\varphi$ , 4c ábra). Az ily módon súlyozott intenzitásadatokat összegezzük az adott  $\varphi$  (HI-val bezárt szög a hengerlési síkon) értékhez, végül az összegzett intenzitásokat ábrázoljuk  $\varphi$  függvényében, ami a csészeprofil relatív változását adja (4d ábra) [9–13].

A becsült fülesedés számszerű meghatározásához a csészehúzó vizsgálatok során alkalmazott átlagos fülesedés számítási módszert alkalmaztuk (1–5. képletek) ahol,  $h_{p_i}$  a csésze magassága a füleknél,  $\bar{h}_p$  az  $n$  darab fül-nél mért csészemagasságok átlaga,  $h_{v_i}$  a csésze magassága a völgyeknél,  $\bar{h}_v$  az  $n$  darab völgnél mért csészemagasságok átlaga,  $h_e$  az átlagos fülmagasság,  $h$  az átlagos csészemagasság,  $Z$  a becsült átlagos fülesedés [13].

$$\bar{h}_p = (h_{p1} + h_{p2} + \dots + h_{pn})/n \quad (1)$$

$$\bar{h}_v = (h_{v1} + h_{v2} + \dots + h_{vn})/n \quad (2)$$

$$h_e = \bar{h}_p - \bar{h}_v \quad (3)$$

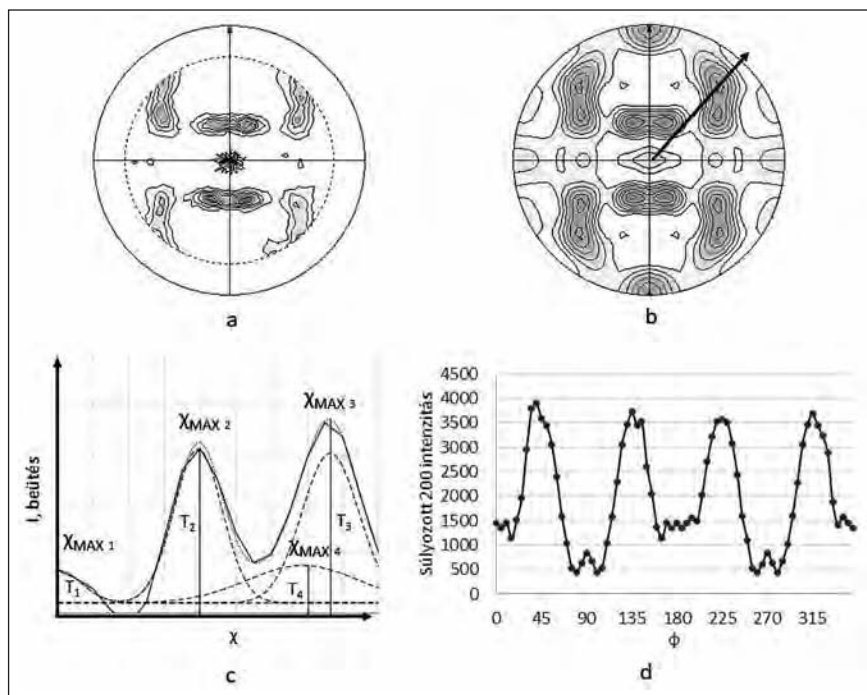
$$h = (\bar{h}_p + \bar{h}_v) / 2 \quad (4)$$

$$Z = (h_e / h) \cdot 100 \quad (5)$$

## Eredmények

Az 5. ábra mutatja a 3xxx-es típusú melegen hengerelt alumíniumötvözetek becsült csészeprofiljai és a becsült átlagos fülesedés eredményeit. Mindhárom ötvözet esetében alakításra jellemző, négyes szimmetriájú csészeprofilot kapunk. A becsült átlagos fülesedés értékei esetében megfigyelhető, hogy a Fe- és a Si-tartalom csökkentése növeli (2,01-ről 2,71). Az Fe/Si arány növelése szintén erősíti az alakítási fülesedés mértékét (2,71-ről 3,31).

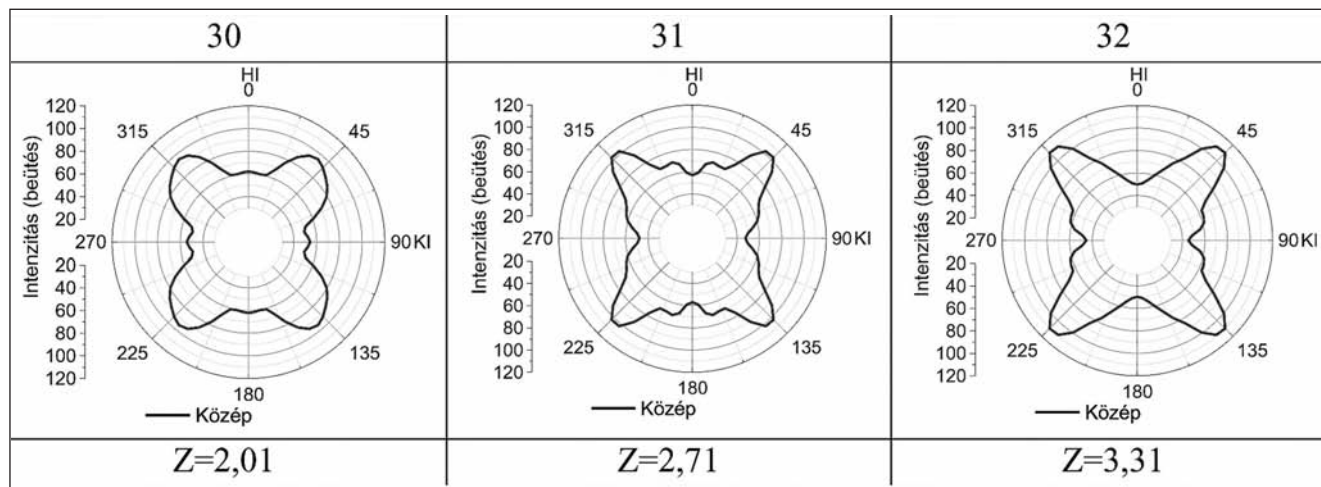
A becsült csészeprofilokat és a becsült átlagos fülesedés eredményeit a melegen hengerelt 5xxx-es ötvözet esetében a 6. ábra mutatja. Az eredmények alapján megállapítható, hogy meleghengert követően 8-as szimmetriájú, közel textúramentes csészeprofilokat kapunk, ami a becsült átlagos fülesedés kis értékén is jelentkezik ( $Z = 0,28 - 1,1$ ).



■ 4. ábra. A pólusábra alapú fülesedést becsülő módszer lépései: a) mért {200} pólusábra; b) újraszámított {200} pólusábra jelölve egy tetszőleges  $\chi$ -metszettel; c)  $\chi$ -metszet illesztése Gauss-görbékkel; d) {200} teljes intenzitáseloszlás-függvény merőleges vetülete a hengerlési síkra [9–11]

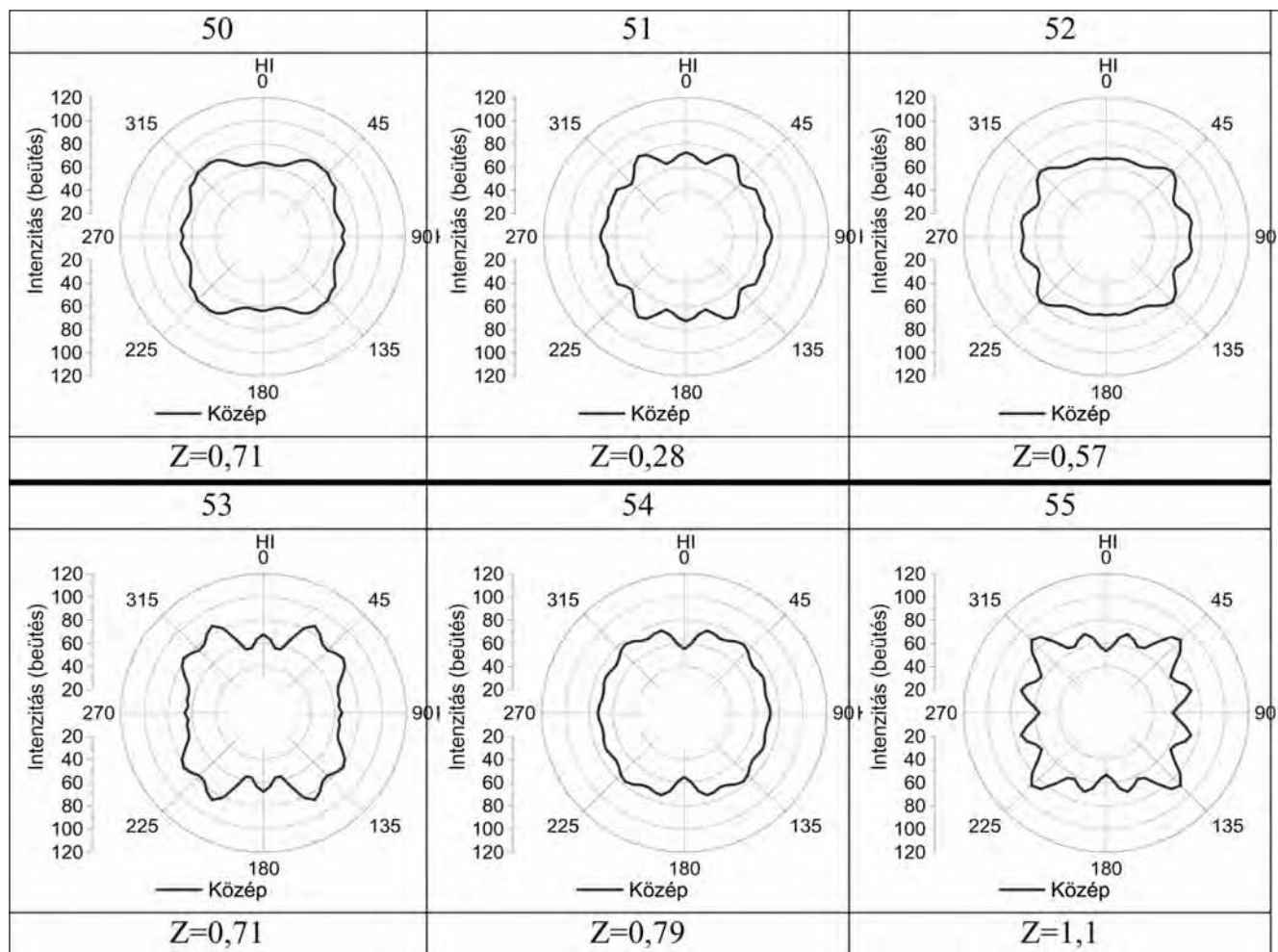
## Összefoglalás

A melegen hengerelt 3xxx-es és 5xxx-es típusú alumínium-ötvözetek vizsgálatának eredményeiből megállapítható, hogy a 3xxx-es ötvözetre erős alakítási fülesedés jellemző, melyet a Si-tartalom 0,2 m/m%-os csökkentése, valamint a Fe 0,2 m/m%-os csökkentése tovább erősít. Ezek alapján, az ötvözetek tervezésekor érdemes figyelembe venni a Si-



■ 5. ábra. A 3xxx-es melegen hengerelt alumíniumötvözetek becsült csészeprofiljai és a becsült átlagos fülesedés eredményei





■ 6. ábra. Az 5xxx-es melegelt alumíniumötvözetek becsült csészeprofiljai és a becsült átlagos fülesedés eredményei

és Fe-ötvözők növelésének hatását a lemezek alakváltozó képességének inhomogenitására. Az 5xxx-es ötvözetnél szinte fülesedésmentes viselkedést tapasztaltunk, melyet a Mn 0,2 m/m%-os csökkentése, valamint 0,1 m/m%-os növelése, továbbá a Mg mennyiségének 0,2 m/m%-os növelése érdemben nem befolyásol.

### Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutatómunka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

### Irodalom

- [1] R. E. Sanders Jr., S. F. Baumannh, H. C. Stumpf: Wrought Non-Heat-Treatable Aluminum Alloys, Treatise on Materials Science and Technology Vol. 31, 1989, 65–105
- [2] E. Köves: Alumínium kézikönyv, 1984
- [3] I. J. Polmear: Light Alloys (Fifth Edition), Metallurgy of the Light Metals, 2017
- [4] E. A. Starke Jr.: Alloys: Aluminum, Encyclopedia of Condensed Matter Physics, 2005, 18–24.

- [5] C. Vargel: Corrosion of Aluminium Second Edition, 2020
- [6] T. Sheppard, M. A. Zaidi: Influence of hot-working parameters on earing behaviour of Al-2Mg sheet, Metals Technology Vol. 9, 1982, 368–374.
- [7] P-W. Kao: Texture and earing behaviour of cold-rolled aluminium alloy 3004. Materials Science and Engineering Vol. 74 Issue 2, 1985, 147–157.
- [8] O. Engler: Control of texture and earing in aluminium alloy AA 3105 sheet for packaging applications, Materials Science and Engineering A 538, 2012, 69–80.
- [9] M. Benke, A. Hlavacs, I. Piller, V. Mertinger: Lemezek fülesedése és a {h00} pólusábrák közötti kapcsolat. BKL Kohászat 152, 2019/3, 36–39.
- [10] M. Benke, A. Hlavacs, P. Imre, V. Mertinger: Prediction of earing of aluminium sheets from {h00} pole figures, European Journal of Mechanics – A/Solids Vol. 81, 2020, 103950
- [11] Benke M.: A kristálytani anizotrópia (textúra) újszerű megközelítése, Habilitációs értekezés, 2020
- [12] M. Benke, B. Schweitzer, A. Hlavacs, V. Mertinger: Prediction of earing of cross-rolled Al sheets from {h00} pole figures, Metals 10(2), 2020, 192.
- [13] M. Benke: Prediction of earing of aluminium sheets from {111} pole figures, Crystallography. Reports, 2020, 980–984.
- [14] A. Hlavacs, M. Szűcs, V. Mertinger, M. Benke: Prediction of Earing of Hot-Rolled Al Sheets from Pole Figures Metals 11, 2021, 99.