

# Normál- és keresztengerelt, lágyított, AW-5056 Al-lemezek fülesedésének becslése {h00} pólusábrák alapján

## Earing prediction of unidirectionally and cross-rolled, annealed 5056 Al sheets from {h00} pole figures

Schweitzer Bence,<sup>1</sup> Benke Márton,<sup>2</sup> Hlavacs Adrienn,<sup>3</sup> Mertinger Valéria<sup>4</sup>

*Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet, Miskolci Egyetem, Műszaki Anyagtudományi Kar, Miskolc, Magyarország*

<sup>1</sup> [thebencyx@gmail.com](mailto:thebencyx@gmail.com)

<sup>2</sup> [fembenke@uni-miskolc.hu](mailto:fembenke@uni-miskolc.hu)

<sup>3</sup> [femhadri@uni-miskolc.hu](mailto:femhadri@uni-miskolc.hu)

<sup>4</sup> [femvali@uni-miskolc.hu](mailto:femvali@uni-miskolc.hu)

### Abstract

Earing of deep drawn cups is an effective measure of plastic anisotropy. It is the result of crystallographic anisotropy, i.e. texture. There are several methods to predict earing, but all of these methods are rather complex. Furthermore, above a certain sheet thickness, deep drawing cannot be performed, and prediction methods fail since they are usually valid within a certain sheet thickness range. A new, simple method has been proposed to predict earing. Besides simplicity, another major benefit of the method is that it can be applied to a wide range of sheet thicknesses. The method has been previously applied for unidirectionally rolled and recrystallized and cross-rolled Al sheets. In the present manuscript, the proposed method is applied on the 5056 type, unidirectionally and cross-rolled, then annealed Al sheets having very weak (close to random) structure. It is shown that for such samples, the method predicts negligible earing. It is also revealed that for the 5056 type Al alloy, the differences in texture and earing between unidirectionally and cross-rolled samples become so small after annealing, that the benefit of cross rolling is negligible.

**Keywords:** *cross-rolling, earing, texture.*

### Összefoglalás

A mélyhúzott csészék fülesedése egy jól látható mértéke a képlékeny anizotrópiának. Ezt a kristálytani anizotrópia, vagyis a textúra okozza. Többféle módszer is megjelent a fülesedés becslésére, de ezen módszerek meglehetősen összetettek. Továbbá egy bizonyos lemezvastagság felett nem végezhető mélyhúzás, így ezek a módszerek sem lesznek használhatók, tekintve, hogy csak egy adott lemezvastagság-tartományban vannak validálva. Egy új, egyszerű módszert javasunk a fülesedés becslésére. Egyszerűsége mellett nagy előnye, hogy széles lemezvastagság-tartományban használható. A módszert már korábban alkalmazták normálhengerelt, újrakristályosított és keresztengerelt Al-lemezek vizsgálata során. Ebben a munkában a javasolt módszert 5056-os normál- és keresztengerelt, majd lágyított Al-lemezekon használjuk. Látható, hogy a legtöbb minta esetében a becsült fülesedés elhanyagolható mértékű. Az szintén kiderült, hogy az 5056-os alumíniumötvözet esetében a textúra- és fülesedésbeli különbségek a normál-, illetve keresztengerelés között olyan kicsik lágyítás után, hogy a keresztengerelés alkalmazásának előnyei is elhanyagolhatók.

**Kulcsszavak:** *keresztengerelés, fülesedés, textúra.*

## 1. Bevezetés

A keresztthengerlés kifejezést különböző speciális típusú hengerlések esetén alkalmazzuk [1]. Ebben az esetben a keresztthengerlés a konvencionális, „egyirányú hengerlés” egy módosított verziója, amikor a szűrési lépések között a lemezeket 90°-kal elforgatjuk a normálirány (NI) körül [2–5]. Ennek eredménye a konvencionális hengerléshez képest egy véletlenszerűhöz közeli textúra négyes szimmetriával. Li és társai magnéziumlemezeken alkalmaztak keresztthengerlést, és megállapították, hogy az a véletlenszerűhöz közeli textúrát eredményezett [2]. Wronski és társai kis karbontartalmú, ferrites acélon és rézen végeztek keresztthengerlést, és azt figyelték meg, hogy bár az acél képlékeny anizotrópiája nőtt, a réz csökkent [3]. Huh és társai azért alkalmaztak keresztthengerlést 5182-es, lágyított alumíniumlemezeken, hogy megakadályozzák a kocka textúra komponens növekedését. A hengerlésnek köszönhetően közel véletlenszerű textúrát és jobb alakíthatóságot értek el [4]. Tang és társai keresztthengerelt AZ31-es Mg-ötvözet vizsgálata során hasonló eredményeket értek el. Nagy szívósság mellett rendkívül kis mértékű füledést értek el [5]. Összességében elmondható, hogy a keresztthengerlés alkalmazása a random orientációeloszláshoz közeli textúrát és kisebb képlékeny anizotrópiát okoz.

A mélyhúzás egyszerű módszer a hengerelt lemezek képlékeny anizotrópiájának jellemzésére. Emellett több módszer is megjelent a füledés becslésére. Fukui és Kudo rávilágított arra, hogy a füledés megbecsülhető a Lankford-számból a következő formulával:  $\Delta r = (r_0 + r_{90}) / 2 - r_{45}$  [6]. Azóta megjelentek mechanikus [7], kristálytani alapú [8, 9] és még kifinomultabb módszerek [10]. Manapság a füledés becslését végeselemes módszerekkel végzik [11]. Ezen módszerek egyik hátránya az, hogy csak egy meghatározott lemezvastagság-tartományban használhatók. Ha a lemez vastagsága a tartományon kívülre esik, a módszert módosítani és validálni kell. Ez kritikussá válik akkor, ha a lemez vastagsága már nem teszi lehetővé a mélyhúzás alkalmazását, és így a módszer nem validálható. A szerzők nemrég publikáltak egy egyszerű módszert, amely {h00} pólusábrák alapján becsli a füledést [12, 13]. Az egyszerűsége mellett a kifejlesztett módszer széles lemezvastagság-tartományban használható, így általánosan alkalmazható. Továbbá használható EBSD-vel mért pólusábrákon, illetve roncsolásmentes módszerként [14]. A módszert

sikeresen alkalmaztuk konvencionálisan hidegen hengerelt, majd később lágyított Al-lemezeken, és a következő, négyes szimmetriájú füledéstípusokat mutatta: hengerelt, nullához közeli és újrakristályosodási füledés, lényegesen különböző lemezvastagságoknál (0,3–3 mm) [12]. Később alkalmaztuk és validáltuk keresztthengerelt Al-lemezeken is [13]. Jelen kutatásban tovább kívánjuk szélesíteni a kifejlesztett füledésbecslő módszer alkalmazhatósági körét. Most a módszert normálhengerelt és keresztthengerelt Al-lemezeken alkalmazzuk, amelyeket később lágyító hőkezelés alá vetünk, hogy gyenge, a random orientációeloszláshoz közeli, újrakristályosodási textúrát kapjunk.

## 2. Elvégzett vizsgálatok

5056-os, 4 mm kiinduló vastagságú alumíniumlemezeket hengereltünk konvencionálisan és keresztthengerelve, Von Roll hengerállványt használva. A hengerlés módján kívül (normál vagy kereszt) minden egyéb paraméter megegyezett. A lemezeket 6, illetve 12 szűrással hengereltük. Az A1, A5, A6 minták normálhengereltek, az A3K, A4K, A9K minták pedig keresztthengereltek 6 szűrési lépéssel ~1 mm végvastagságig. A szűrési lépések között az A4K mintát NI körül forgattuk az óramutató járásával megegyezően, az A3K és A9K mintákat pedig oda-vissza forgattuk. A résállítás 0,6 mm volt az első szűrési lépésnél, a további szűrásoknál 0,5 mm. Az A10 mintát normál-, az A11K-t pedig keresztthengereltük 12 szűrési lépéssel ~1 mm végvastagságig. Az első szűrési lépésnél a résállítás 0,3 mm volt, az ezt követő szűrásoknál pedig 0,25 mm. Az A11K mintát szintén oda-vissza forgattuk NI körül [13]. A hengerelt lemezeket ezután hőkezeltük levegő atmoszférájú kemencében 320° C-os hőmérsékleten, 2 órán keresztül, hogy teljesen újrakristályosodott szerkezet alakuljon ki.

Kerek, 30 mm átmérőjű minták lettek kimunkálva a lemezekből röntgendiffrakciós textúravizsgálatra. E vizsgálathoz egy Euler-bölcsővel felszerelt, Bruker D8 Advance diffraktométert használtunk Cu sugárforrással. A csőfeszültség és a csőáram 40 kV és 40 mA volt. {111}, {200} és {220} pólusábrákat mértünk 75° kidöntésgig. A {200} pólusábrák újraszámítása a berendezés TexEval szoftverjével történt. Ortorombos alakváltozást alkalmaztunk mind a normál-, mind a keresztthengerelt minták esetében.

A füledésbecslő módszert már részletesen bemutattuk egy korábbi publikációban [12].

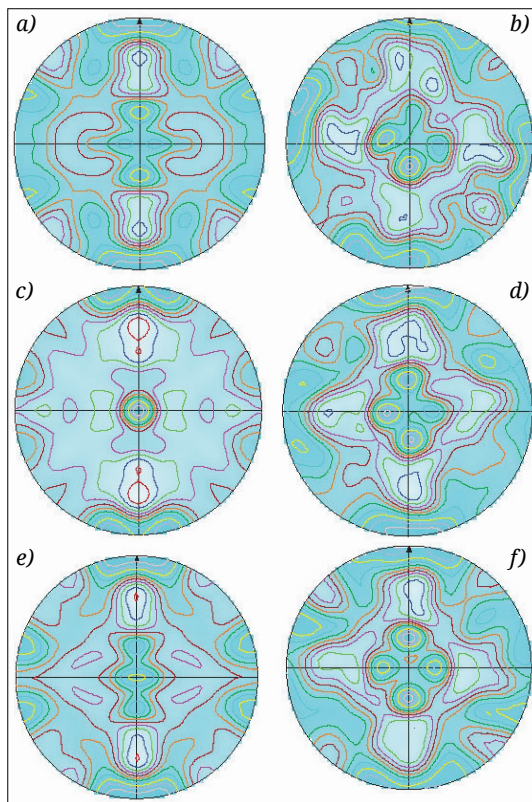
Röviden: generáljuk a {200} pólusábrák CHI-metszeit. Minden PHI- (a minta forgatása) szöghöz tartozik egy {200} CHI-metszet. A módszer azt feltételezi, hogy a CHI-metszeteken lévő intenzitásváltozás megközelíthető Gauss-görbék összegeével. A CHI-metszetek intenzitásgörbéit megillesztjük Gauss-görbékkel [15]. Minden Gauss-görbe nettó intenzitása súlyozva van, és szorozva a CHI-csúcsérték szinuszával. Ezután a súlyozott területek összegét ábráztuk a PHI-érték függvényében [12]. A skálázási faktor meghatározása a kísérleti eredmények összehasonlításával történt a [13] cikkben leírtak szerint. A skálázási faktor a normálhengerelt minták esetében 40, a kereszt-hengerelt esetében 60 volt, egységesen.

### 3. Eredmények

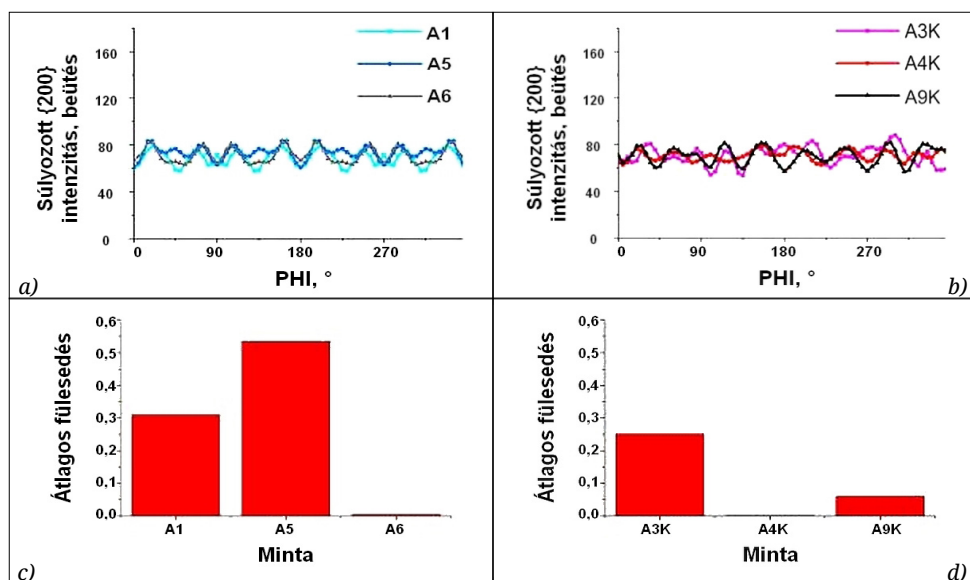
#### 3.1. A 6 szűrással hengerelt minták eredményei

Az 1. ábra az újrászámított {200} pólusábráit mutatja a lágyított, 6 szűrással normál- és kereszt-hengerelt mintáknak. A hengerlési irány minden esetben a 12 óra irányába mutat. A pólusábrákon nincsenek kiugróan nagy intenzitású csúcsok. Ez alapján elmondható, hogy a normál- és kereszt-hengerelt minták randomhoz közeli jelleget mutatnak.

A 2. ábra összefoglalja a 6 szűrással hengerelt, majd lágyított minták becsült fülesedését és a



1. ábra. A 6 szűrással hengerelt, majd lágyított minták újrászámított {200} pólusábrái: (a) A1; (b) A3K; (c) A5; (d) A4K; (e) A6; (f) A9K

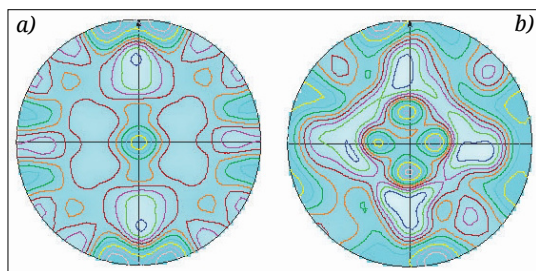


2. ábra. A 6 szűrással hengerelt, majd lágyított minták becsült fülesedése: (a) normálhengerelt minták; (b) kereszt-hengerelt minták; (c) a becsült átlagos fülesedése a normálhengerelt mintáknak; (d) a kereszt-hengerelt mintáknak

becsült átlagos fülesedés értékeit. Megfigyelhető, hogy a jellegzetes hengerlési fülesedés  $HI + 45^\circ + (n \cdot 90^\circ)$  irányban, vagy az újrakristályosodási fülesedés  $RD + (n \cdot 90^\circ)$  irányban (vagy bármely más irányban) nem jelentkezik. A megfigyelhető intenzitáscsúcsok közti különbség kicsi, 60 és 80 beütés között változik. A becsült fülmagasság és a becsült átlagos fülesedés alapján elmondható, hogy a lágyítás után a normál- és keresztthengerelt minták fülesedése rendkívül csekély.

### 3.2. A 12 szűrással hengerelt minták eredményei

A 3. ábra az újrászámított {200} pólusábráit mutatja a lágyított, 12 szűrással normál- és keresztthengerelt mintáknak. Megállapítható, hogy a hőkezelés hatására a normál- és keresztthengerelt minták randomhoz közeli textúrát mutatnak.



3. ábra. A 12 szűrással hengerelt, majd lágyított minták újrászámított {200} pólusábrái: (a) A10; (b) A11K

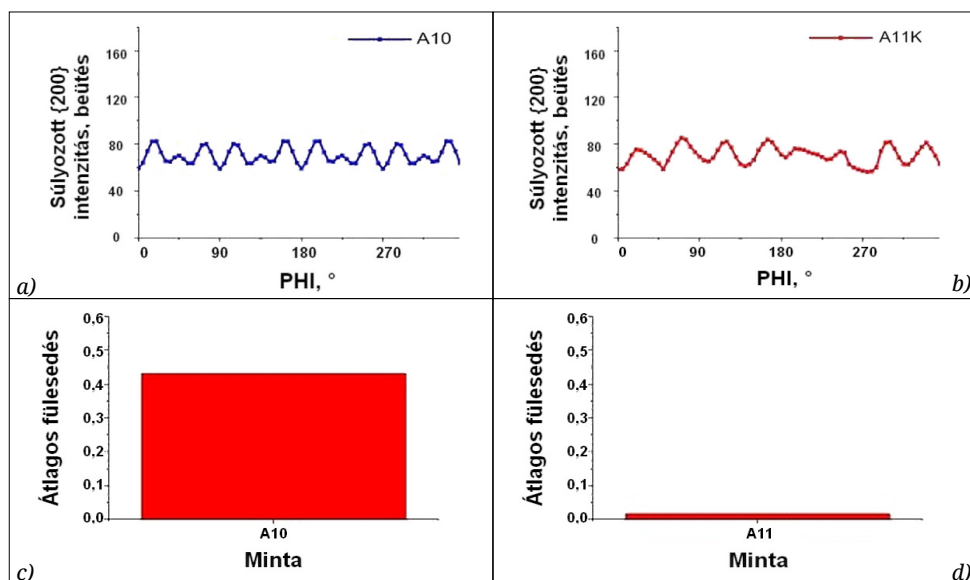
A 12 szűrással hengerelt, majd lágyított minták becsült fülesedését és becsült átlagos fülesedés-értékeit a 4. ábra mutatja. Az ábrák alapján elmondható, hogy az átlagos fülesedés értéke rendkívül kicsi, 1 alatti.

### 4. Következtetések

Látható volt, hogy a lágyított, 5056-os normál- és keresztthengerelt Al-lemezek {200} pólusábráin nem jelentkeznek intenzitásúcsok. Ezáltal egy homogén intenzitásfüggvény volt látható a vizsgált minták {200} pólusábráin (a hengerlési síkban). A kifejlesztett fülesedésbecslő módszer a {h00} pólusábrák intenzitásfüggvényein alapul, vagyis a {h00} intenzitás megoszlásán a hengerlési síkon. Látható, hogy azokban az esetekben, amikor homogén {200} intenzitáseloszlás jelentkezett a hengerlési síkban, kicsi fülmagasság és átlagos fülesedés volt kimutatható a kifejlesztett fülesedésbecslő módszerrel. Az is megállapítható, hogy az 5056-os Al-ötvözet esetében a normál- és keresztthengerelt minták közötti különbség olyan kicsi a lágyítás után, hogy a keresztthengerelés előnyös tulajdonságai elhanyagolhatók.

### 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



4. ábra. A 12 szűrással hengerelt majd lágyított minták becsült fülesedése: (a) normálhengerelt minta; (b) keresztthengerelt minta; (c) a normálhengerelt mintának, (d) a keresztthengerelt mintának



projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-19-4 kódszámú Új Nemzeti Kiválósági Programjának támogatásával készült. A kutatás az NKFIH K119566 projekt keretében valósult meg.

### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Neugebauer R., Glass R., Kolbe M., Hoffmann M.: *Optimisation of processing routes for cross rolling and spin extrusion*. Journal of Materials Processing Technology, 125–126. (2002) 856–862.  
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00392-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00392-8)
- [2] Li X., Al-Samman T.: *Mechanical properties and anisotropy of ME20 magnesium sheet produced by unidirectional and cross rolling*. Materials & Design, 32. (2011) 4385–4393.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.079>
- [3] Wronski S., Wrobel M., Baczmanski A., Wierzbanski K.: *Effects of cross-rolling on residual stress, texture and plastic anisotropy in f.c.c. and b.c.c. metals*. Materials Characterization, 77. (2013) 116–126.  
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2013.01.005>
- [4] Huh M. Y., Cho S. Y., Engler O.: *Randomization of the annealing texture in aluminum 5182 sheet by cross-rolling*. Materials Science and Engineering A, A315. (2001) 35–46.  
[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01207-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01207-2)
- [5] Tang W., Huang S., Li D., Peng, Y.: *Mechanical anisotropy and deep drawing behaviors of AZ31 magnesium alloy sheets produced by unidirectional and cross rolling*. Journal of Materials Processing Technology, 215. (2015) 320–326.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.08.020>
- [6] Fukui S., Kudo H.: *The earing in deep-drawing and directionality in tension-test of sheet metal*. Rep. Inst. Sci. Tech. Univ. Tokyo, 4. (1950) 33.
- [7] Sowerby R., Johnson W.: *Prediction of earing in cups drawn from Anisotropic sheet using slip-line field theory*. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 9. (1974) 102–108.  
<https://doi.org/10.1243%2F03093247V092102>
- [8] Tucker G. E. G.: *Texture and earing in deep drawing of aluminium*. Acta Metallurgica, 9. (1961) 275–286.  
[https://doi.org/10.1016/0001-6160\(61\)90220-6](https://doi.org/10.1016/0001-6160(61)90220-6)
- [9] Kanatake N., Tozawa Y., Otani T.: *Calculations from texture of earing in deep drawing for fcc metal sheets*. International Journal of Mechanical Sciences, 25. (1983) 337–345.  
[https://doi.org/10.1016/0020-7403\(83\)90012-7](https://doi.org/10.1016/0020-7403(83)90012-7)
- [10] Van Houtte P., Cauwenberg G., Aernoudt E.: *Analysis of the earing behaviour of aluminium 3004 alloys by means of a simple model based on yield loci calculated from orientation distribution functions*. Materials Science and Engineering, 95. (1987) 115–124.  
[https://doi.org/10.1016/0025-5416\(87\)90503-9](https://doi.org/10.1016/0025-5416(87)90503-9)
- [11] Engler O., Mertens N., Van Dam P.: *Texture-based design of a convoluted cut-edge for earing-free beverage cans*. Journal of Materials Processing Technology, 211. (2011) 1278–1284.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.02.011>
- [12] Benke M., Hlavacs A., Imre P., Mertinger V.: *Prediction of earing of aluminium sheets from {h00} pole figures*. European Journal of Mechanics endash; A/Solids, 81. (2020) 103950.  
<https://doi.org/10.1016/j.euromech-sol.2020.103950>
- [13] Benke M., Schweitzer B., Hlavacs A., Mertinger V.: *Prediction of earing of cross-rolled Al sheets from {h00} pole figures*. Metals - Open Access Metallurgy Journal, 10/2. (2020) 192.  
<https://doi.org/10.3390/met10020192>
- [14] Seps M., Mertinger V., Benke M.: *Sample cutting-free pole figure measurement method for centreless diffractometers in modified X mode*. Materials Characterization, 151. (2019) 351–357.  
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.03.031>
- [15] Ma Q., Mao W., Feng H., Yu Y.: *Rapid texture measurement of cold-rolled aluminum sheet by X-ray diffraction*. Scripta Materialia, 54. (2006) 1901–1905.