

## Ferrites acéllemezek fülesedésének jellemzése pólusábrák alapján

Benke Márton\*, Hlavács Adrienn, Schweitzer Bence, Mertinger Valéria

<sup>1</sup>Fémtani Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet, Miskolci Egyetem, Miskolc,  
Magyarország

\*Levelező szerző: fembenke@uni-miskolc.hu

### Absztrakt

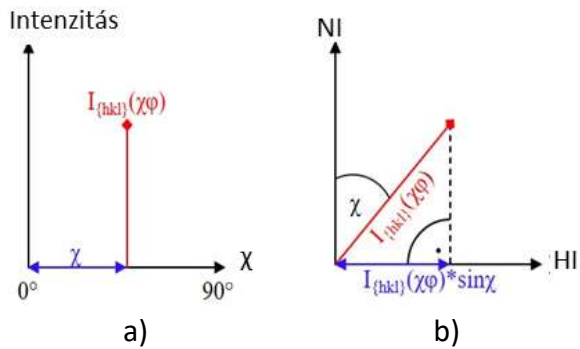
A fülesedés a lemezszerű félkésztermékek síkbeli alakváltozókéességének irányfüggését jellemző jelenség. Korábbi kutatásaink során kidolgoztuk a felületen középpontos kockarácsú fémek fülesedésének becslésére alkalmas egyszerű, és a jellemző végvastagságok esetében általánosan alkalmazható eljárást. Jelen cikkünkben ezen módszer kidolgozását mutatjuk be térben középpontos kockarácsú fémekre, különböző állapotú, hidegen hengerelt DC01 típusú ferrites acéllemezek vizsgálatain keresztül. Eredményeink alapján megállapítottuk, hogy az {110} pólusábráknak a hengerlési síkra eső merőleges vetülete alkalmas ferrites acéllemezek fülesedésének jellegének meghatározására, azonban a fülesedés mértékének becsléséhez további fejlesztések szükségesek.

**Kulcsszavak:** fülesedés, textúra, pólusábra, ferrites acél

### 1. Bevezetés

A lemezszerű félkésztermékekben kialakult síkbeli anizotrópiának köszönhetően mélyhúzáskor egyenetlen csészemagasságok alakulnak ki a hengerlési irányhoz (HI) viszonyított elfordulási szög ( $\phi$ ) függvényében. A legnagyobb magasságú helyeket „füleknek”, míg a legkisebb magasságú helyeket „völgyeknek” nevezi a szakirodalom. Alumínium ötvözetek esetében a négyes szimmetriát mutató fülesedés a leggyakoribb. Ilyen esetben hidegen hengerelt állapotban a fülek jellemzően a HI-hoz képest a  $45^\circ + (n \cdot 90^\circ)$  irányokban jelennek meg, míg újrakristályosodott állapotban a  $0^\circ + (n \cdot 90^\circ)$  irányokban [1-4]. A fülesedés jellemzése történhet kísérletileg csészehúzó vizsgálatokkal, illetve számítás útján. Napjainkban a fülesedés becslésére általában végelesemes módszereket alkalmaznak, melyek elméleti anyagfolyási törvényeken alapulnak,

meglehetősen komplikáltak, és csak adott lemezvastagság-tartományban használhatóak [5-10]. Az elmúlt években a jelen cikk szerzői kidolgoztak egy olyan módszert, amellyel gyorsan, egyszerűen becsülhető négyes szimmetriájú fülesedést mutató alumínium lemezek fülesedésének jellege és mértéke pusztán a {200} pólusábrák adatai alapján. Az eljárás során a {200} pólusábrák adatait a pólusábra koordinátarendszer helyett a minta koordináta-rendszerében ábrázoljuk (Hengerlési Irány, HI-Keresztirány, KI-Normálirány, NI) oly módon, hogy a teljes {200} intenzitás eloszlásfüggvénynek a hengerlési síkra (HI-KI) eső merőleges vetületét képezzük. Valamely  $\phi$ , illetve  $\chi$  pólusábra-koordinátánál mérhető {hkl} intenzitást a pólusábra-, illetve a minta koordinátarendszerben az 1. ábra szemlélteti.



1.Ábra Adott  $\{hkl\}$  reflexió intenzitása  $\chi$  minta döntési szög és  $\varphi=0^\circ$  elfordulási szög esetén a keresztirány felőli nézetben a) a pólusábra b) a minta koordináta-rendszerében [14]

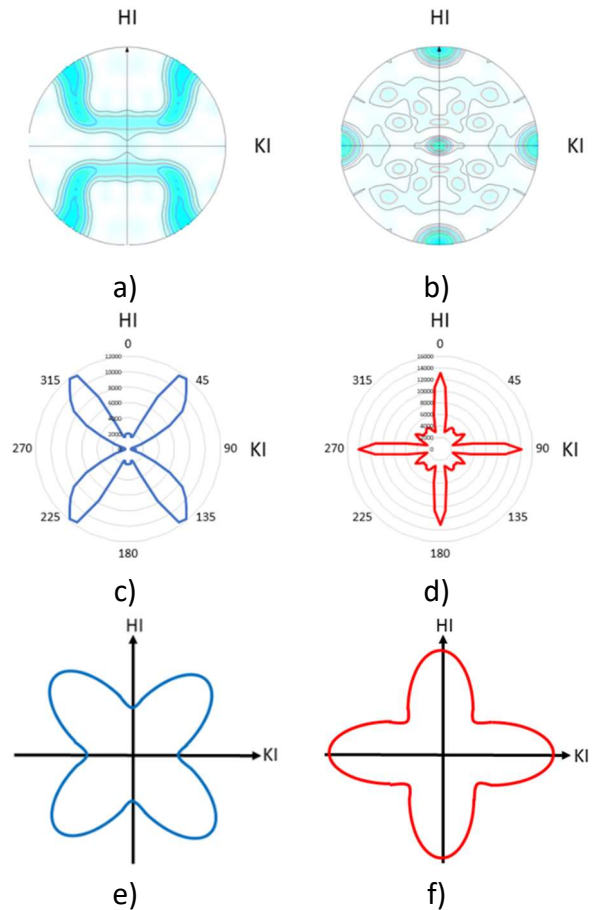
Az eljárás kidolgozásának alapját az a felismerés adta, mely szerint a teljes  $\{200\}$  pólusábrákon az intenzitásmaximumok, valamint a mélyhúzott csészék magasságai alapján szerkesztett csészeprofilon a fülek közel azonos  $\varphi$  értékeknél találhatók. Ezt hidegen hengerelt alumínium, illetve újrakristályosított réz lemezen mutatja be a 2. ábra.

A kidolgozott módszer legjelentősebb előnye, hogy általánosan használható a jellemző végső vastagságok esetében, illetve kereszt-hengerlés során is [11,12]. További előnyként érdemes megemlíteni, hogy valóban roncsolásmentes (mintavétel nélküli) pólusábraméréssel kombinálva valóban roncsolásmentes vizsgálati metodika kifejlesztésének lehetőségét is magába foglalja [13].

A további fejlesztések során a pólusábra alapú fülesedést becsülő eljárás sikeresen ki lett dolgozva az  $\{111\}$  típusú reflexiók pólusábráinak esetére is, melyek esetében az intenzitásmaximumok, illetve fülesedési irányok közötti egybeesés már nem áll fenn [14]. Ezen eredmény bizonyítja, hogy a módszer alkalmazásához nem szükséges feltétel az, hogy a pólusábrák intenzitás maximumai, illetve a fülesedési irányok közel azonos  $\varphi$  irányokba essenek.

Az alumínium mellett a ferrites acélokot szintén nagy mennyiségben alkalmazza az ipari szféra lemezszerű félkésztermékek előállítására. A fülesedés problémája itt is jelen van, azonban a kidolgozott módszer egy az egyben nem

alkalmazható ezen lemezek esetében, hiszen a ferrites acéllemezek rácsszerkezet is, valamint csúszási rendszerei is eltérnek a felületen középpontos kockarácsú alumíniumétól. Jelen cikkünkben ismertetett kutatás célja a pólusábra alapú fülesedést becsülő módszer kidolgozása térben középpontos kockarácsú fémek esetére.

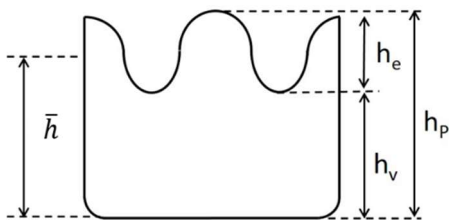


2.Ábra Hidegen hengerelt Al, illetve újrakristályosított Cu eredményei. Hidegen hengerelt Al  $\{200\}$  pólusábra, c)  $\{200\}$  pólusábra hengerlési síkra eső vetülete, e) fülesedése. Újrakristályosított Cu b)  $\{200\}$  pólusábra, c)  $\{200\}$  pólusábra hengerlési síkra eső vetülete, e) fülesedése. [11]

## 2. Vizsgálati módszer és anyag

Vizsgálatainkhoz  $\sim 0,8$  mm végvastagságra hidegen hengerelt DC04 típusú, ferrites acéllemezeket alkalmaztunk, melyeket az ISD Dunafer Zrt. biztosított. Egyes lemezekon újrakristályosító hőkezeléseket végeztünk  $650^\circ\text{C}$ -on, illetve  $700^\circ\text{C}$ -on 1 h időtartamig, légterű kemencében azzal a céllal, hogy kiindulási, hideghengerlésre jellemző textúrát gyengítsük,

illetve létrehozzuk az újrakristályosodási textúrát. A minták azonosítója a gyártótól származó adag azonosító, melyet a minta állapota követ. A hőkezelések után a lemezek levegőn lettek szobahőmérsékletre hűtve. A csészehúzóvizsgálatokat a Neumann János Egyetem GAMF tanszékén végeztük Erichsen típusú csészehúzó berendezéssel 50 mm-es teríték átmérőből kiindulva. A további paraméterek: szerszám átmérő: 34 mm, tüske átmérő: 33 mm; szerszám lekerekítés: 5 mm; tüske lekerekítés: 5 mm. A lehúzott csészéken a fülmagasságokat tolmérő segítségével mértük. Az átlagos fülesedést az átlagos fülmagasság és átlagos csészemagasság hányadosaként számoltuk, %-ban kifejezve az (1)-(5) egyenletek segítségével (3. ábra) [11-13].



**3.Ábra Az átlagos fülesedés számításához használt paraméterek. [11]**

$$\bar{h}_p = \frac{h_{p1} + h_{p2} + h_{p3} + \dots}{n_p} \quad (1)$$

$$\bar{h}_v = \frac{h_{v1} + h_{v2} + h_{v3} + \dots}{n_v} \quad (2)$$

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

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

$$Z = \frac{h_e}{\bar{h}} * 100 \quad (5)$$

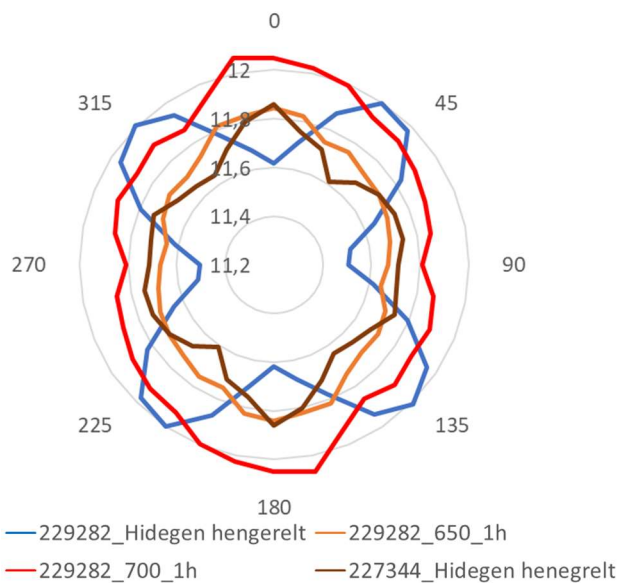
, ahol  $h_{pn}$  a csúcsmagasság,  $n_p$  a fülek száma,  $\bar{h}_p$  az átlagos csúcsmagasság,  $h_{vn}$  a völgymagasság,  $n_v$  a völgyek száma,  $\bar{h}_v$  az átlagos völgymagasság,  $h_e$  az átlagos fülmagasság,  $\bar{h}$  az átlagos csészemagasság,  $Z$  az átlagos fülesedés. A textúravizsgálatokat Euler-bölcsővel felszerelt Bruker D8 Advance típusú röntgendiffraktométerrel (CoK $\alpha$  sugárforrás, 40 kV csőfeszültség, 40 mA fűtőáram) végeztünk, a csészehúzó terítékeken, csészehúzás előtt. A textúramérések során  $\chi=75^\circ$ -ig végeztük a minta

döntését a keresztirány (KI) körül,  $5^\circ$ -os lépésként. A fülesedés becsléséhez a legnagyobb relatív intenzitású, {110}, {200} illetve {211} pólusábráknak a hengerlési síkra eső merőleges vetületeit alkalmaztuk. Az eljárást részletesen ismerteti a [11-13] hivatkozás, lépései röviden az alábbiak. A mért, részleges {110}, {200}, illetve {211} pólusábrák alapján újra számítjuk a teljes pólusábrákat. Az újrászámított, teljes pólusábrák  $\chi$ -metszeteit illesztjük Gauss-függvényekkel oly módon, hogy a Gauss-függvények összege közelítse az újrászámított görbét. A Gauss-függvények területeit súlyozzuk a csúcsponthoz tartozó  $\chi$  értékek sin-ával, majd összegezzük a súlyozott adatokat az adott  $\varphi$  értékhez. Végül az összegzett intenzitás adatokat ábrázoljuk  $\varphi$  függvényében. Az így kapott pólusábra vetületek adatai alapján szintén meghatároztuk az átlagos fülesedés értékeket az (1)-(5) egyenletek alapján, ez esetben az intenzitás „fülek” átlagának és az átlagos intenzitás hányadosaként, szintén %-ban kifejezve. A pólusábra adatokból számított átlagos fülesedés értékeket 3-es skálázási fakorral osztottuk, hogy azok összevethetők legyenek a fentebb leírt paraméterekkel végzett csészehúzás eredményei alapján számolt átlagos fülesedés értékekkel.

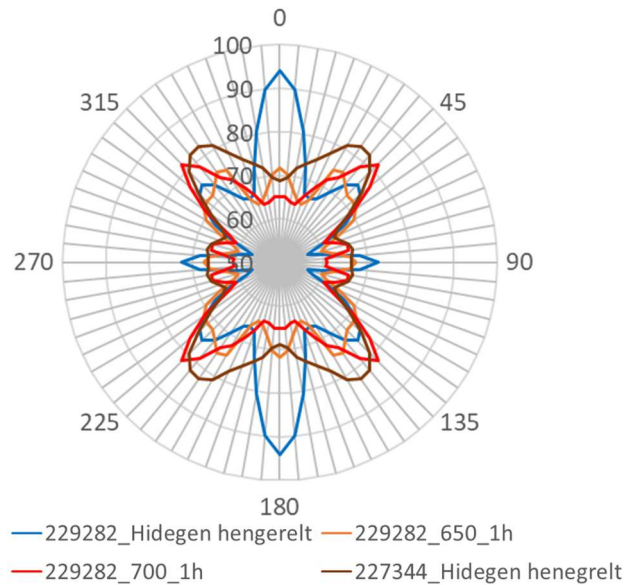
### 3. Eredmények

A 4. ábra a hidegen hengerelt, illetve különböző hőmérsékleteken 1 h időtartamig lágyított DC04 típusú lemezek mért csészemagasságait ábrázolja. Az 5-7. ábrák ugyanezen mintáknak az {110} (5. ábra), a {200} (6. ábra), illetve a {211} (7. ábra) pólusábrák hengerlési síkra eső merőleges vetületeit mutatják a hengerlési irányhoz viszonyított  $\varphi$  szög függvényében. Látható, hogy a legkarakteresebben eltérő fülesedést a „228292\_Hidegen hengerelt”, illetve a „227344\_Hidegen hengerelt” jelű minták mutatják. Ezen minták esetében az intenzitás-eloszlások jellegében a legdominánsabb különbség az {110} pólusábrák merőleges vetületein fedezhető fel. Ez részben természetesen annak tudható be, hogy a Miller-

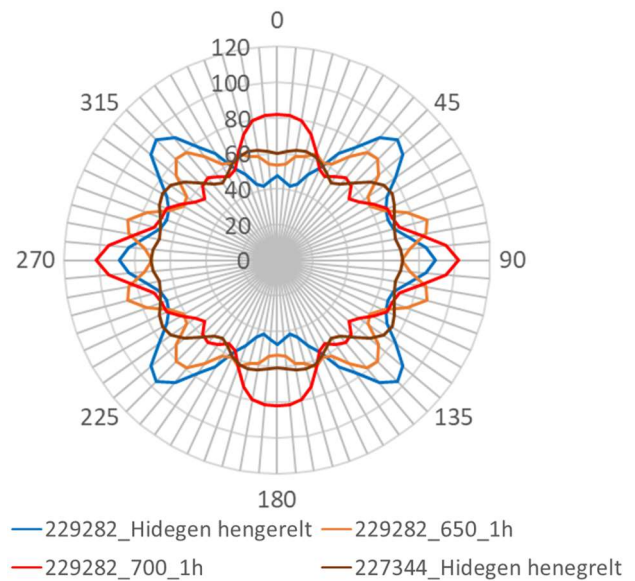
index növekedésével a mért intenzitások  $\varphi$  szerinti megoszlása egyre egyenletesebb. A „229282\_Hidegen hengerelt” lemez esetében, amelynél  $\varphi=45^\circ+(n*90^\circ)$  irányú fülesedés tapasztalható, az {110} pólusára vetületen maximumok éppen a csészevölgyek irányában, a  $\varphi=0^\circ+(n*180^\circ)$  irányokban jelentkeznek. Azon lemezeknél, melyek esetében  $\varphi=0^\circ+(n*90^\circ)$  irányú fülesedés látható („229282\_700\_1h” és „227344\_B Hidegen hengerelt”), az {110} pólusára vetületeken maximumok a  $\varphi=45^\circ+(n*90^\circ)$  irányokban láthatók. Amely lemez nem mutat érdemi fülesedést („229282\_650\_1h”), a pólusára vetületen sem található jellemzően kiugró intenzitásmaximum. Ezen eredmények alapján megállapítható, hogy az {110} pólusára vetületeken az intenzitás maximum irányai a csészeprofil völgyek irányáival közel azonosak. Ilyen jellegű egyértelmű összefüggés nem fedezhető fel a csészeprofil, illetve a {200}, illetve a {211} pólusábrák vetületein.



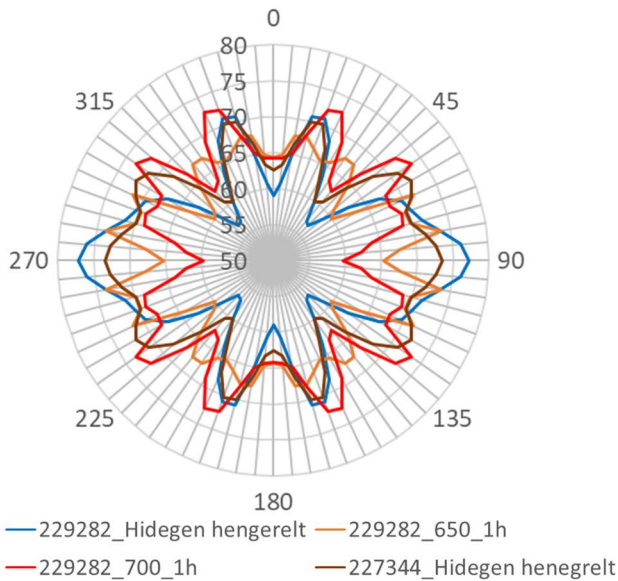
**4.Ábra Mért fülmagasságok különböző állapotú DC04 típusú lemezekben a HI-nyal bezárt szög függvényében**



**5.Ábra A {110} pólusára hengerlési síkra eső merőleges vetületei különböző állapotú DC04 típusú lemezekben a HI-nyal bezárt szög függvényében**



**6.Ábra A {200} pólusára hengerlési síkra eső merőleges vetületei különböző állapotú DC04 típusú lemezekben a HI-nyal bezárt szög függvényében**



**7.Ábra A {211} pólusára hengerlési síkra eső merőleges vetületei különböző állapotú DC04 típusú lemezeken a HI-nyal bezárt szög függvényében**

A 4. és 5. ábrák eredményei alapján számolt átlagos fülesedési értékeket az 1. Táblázat foglalja össze.

**1. Táblázat A különböző állapotú DC04 típusú lemezek mért csészemagasságai, illetve {110} pólusára hengerlési síkra eső merőleges vetületei alapján számított átlagos fülesedés értékek. A skálázási faktor értéke: 3**

Minta	Átlagos fülesedés, %	
	Mért	{110} alján becsült/3
<b>229282_Hidegen hengerelt</b>	-3,7	-3,4
<b>229282_650_1h</b>	0,3	1
<b>229282_700_1h</b>	0,2	8,7
<b>227344_Hidegen hengerelt</b>	1	5,3

Az 1. Táblázat értékei alapján megállapítható, hogy az {110} pólusára merőleges vetületeiből számolt átlagos fülesedési értékek esetében nincs olyan egységes skálázási faktor, amelynek alkalmazásával a vizsgált teljes mintasorozatra összevethető értékeket kapunk a mért csészemagasságokból számolt átlagos fülesedési

értékekkel. Ezek értelmében megállapítható, hogy a térben középpontos kockarácsú fémek esetében a fülesedés jellege becsülhető az {110} pólusábráknak a hengerlési síkra eső merőleges vetületei alapján, azonban a fülesedés mértékének becslése a jelen módszer segítségével egyelőre nem megoldott.

#### 4. Összefoglaló

A DC04 típusú lemezsorozat vizsgálata során láthattuk, hogy a  $\varphi=45^\circ+(n*90^\circ)$ , a  $\varphi=0^\circ+(n*90^\circ)$  irányú fülesedést, valamint a közel zérus fülesedést mutató minták {110} pólusábráinak hengerlési síkra eső merőleges vetületei jól megkülönböztethetők egymástól. Azt is láthattuk, hogy a pólusára vetületek intenzitás maximumai a csészeprofil völgyeinek irányával esnek egybe. Ezek alapján megállapítható, hogy a térben középpontos kockarácsú, DC04 típusú acéllemezek fülesedésének típusa megfelelően jellemezhető az {110} pólusábrák hengerlési síkra eső merőleges vetületei alapján. Amint azt a pólusára vetületekből számított átlagos fülesedés értékek esetében láttuk, a fülesedés mértéke nem jellemezhető az {110} pólusábrák alapján. Összefoglalva elmondható, hogy a bemutatott, {110} pólusára adatain alapuló módszer alkalmas a térben középpontos kockarácsú, ferrites acéllemezek fülesedésének jellegét leírni, azonban amennyiben cél a fülesedés mértékének jellemzése, további vizsgálatok elvégzése szükségesek.

#### Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutatómunka az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-20-5 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott Szakmai Támogatásával készült. A csészehúzóvizsgálatok elvégzését és kiértékelését a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal NKFIH K 119566 projektje támogatta. A szerzők köszönettel tartoznak Béres Gábornak a csészehúzóvizsgálatok elvégzésében nyújtott segítségéért.

[13] Sepsi, M.; Mertinger, V.; Benke, M.; *Mat. Char.* **2019**, 151, 351–357.

[14] Benke, M. *Crystallogr. Rep+* **2020**, 65(6), 980–984.

## 5. Irodalmi hivatkozások

[1] Sheppard, T.; Zaidi, M. A.; *Met. Technol.* **1982**, 9, 368–374.

[2] Kao, P.-W. *Mater. Sci. Eng.* **1985**, 74, 147–157.

[3] Van Houtte, P.; Cauwenberg, G.; Aerno dt, E. *Mat. Sci. Eng.* **1987**, 95, 115–124.

[4] Engler, O. *Mat. Sci. Eng. A* **2012**, 538, 69–80.

[5] Aretz, H.; Aegerter, J; Engler, O. *Analysis of Earing in Deep Drawn Cup*, Proceedings of the 10th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes Dedicated to Professor O. C. Zienkiewicz (1921–2009), Pohang, 13-17 Juna 2010. **2010**, 1252/1, 417–424.

[6] Engler, O.; Kalz, S. *Mat. Sci. Eng. A* **2004**, 373, 350–362.

[7] Engler, O.; Hirsch, J. *Mat. Sci. Eng. A* **2007**, 452-453, 640–651.

[8] Zein, H.; El Sherbiny, M.; Abd-Rabou, M.; El Shazly, M. *Mater. Design* **2014**, 53, 797–808.

[9] Reddy, A.C.S.; Rasjesham, S.; Reddy, P.R.; Kumar, T.P.; Goverdhan, J. *Int.J. Eng. Sci. Techn.* **2015**, 7, 21–32.

[10] Soare, S.c.; Barlat, F. *Eur. J. Mech. A Solid.* **2011**, 30, 807–819.

[11] Benke, M.; Hlavacs, A.; Piller, I.; Mertinger, V. *Eur. J. Mech. A-Solid* **2020**, 81, 103950.

[12] Benke, M.; Schweitzer, B.; Hlavacs, A.; Mertinger, V. *Metals*, **2020**, 10, 192.