

Intenzíven képlékeny alakított lemezek további konvencionális képlékenyalakításának hatása a felületi alakváltozás homogenitására

The Effect of Subsequent Conventional Plastic Deformation on the Homogeneity of Surface Strain in Severely Plastically Deformed Sheet

BÉRES Levente¹, MOLNÁR Tamás¹, SZŰCS Máté²

1. Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.,
H-3519 Miskolc, Iglói út 2., +36 46/560-110, <http://www.bayzoltan.hu>
2. Miskolci Egyetem, Fémtechnológiai, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet,
Anyag- és Vegyészmérnöki Kar, <http://www.uni-miskolc.hu>

Abstract

Aluminum sheets produced by severe plastic deformation (SPD), specifically friction-assisted lateral extrusion (FALEP), exhibit outstanding strength properties due to their ultrafine-grained microstructure (UFG). However, due to the inherent characteristics of the process, the microstructural and mechanical properties of the sheets often show an inhomogeneous distribution. The objective of the present research is to investigate how subsequent conventional plastic deformation processes—such as cold rolling—affect the distribution of surface strain fields. During tensile testing, the surface strain of Al 1050 sheets produced by both severe and conventional plastic deformation was evaluated using a digital image correlation (DIC) system.

Keywords: friction-assisted lateral extrusion (FALEP), severe plastic deformation (SPD), ultrafine-grained microstructure (UFG), digital image correlation (DIC), surface strain homogeneity

Kivonat

Az intenzív képlékeny alakítással (SPD), ezen belül a súrlódással segített keresztirányú extrúzióval (FALEP) előállított alumíniumlemezek kiemelkedő szilárdsági mutatókkal rendelkeznek az ultrafinom szemcsés anyagszerkezetnek (UFG) köszönhetően. Ugyanakkor az eljárás sajátosságából adódóan a lemezek mikroszerkezeti és mechanikai jellemzői gyakran inhomogén eloszlást mutatnak. Jelen kutatás célja annak megfigyelése, hogy az utólagos, konvencionális képlékeny alakítási folyamatok – mint például a hideghengerlés – milyen hatással vannak a felületi alakváltozási mezők eloszlására. Az intenzív és hagyományos képlékeny alakítással előállított Al 1050 lemezekben, szakítóvizsgálat során, a felületi alakváltozást digitális képkorrelációs (DIC) rendszerrel mértük.

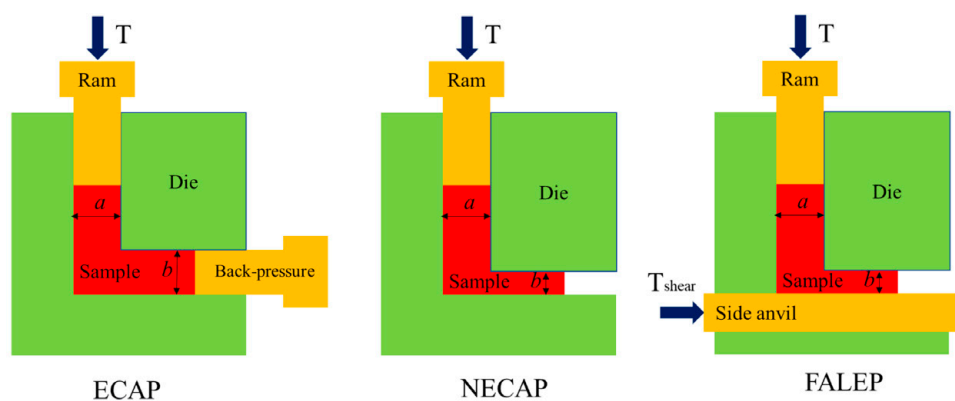
Kulcsszavak: súrlódással segített keresztirányú extrúzió (FALEP), intenzív képlékeny alakítás (SPD), ultrafinom szemcsés anyagszerkezetnek (UFG), digitális képkorreláció (DIC), felületi alakváltozás homogenitás

1. BEVEZETÉS

A modern anyagtudomány egyik legdinamikusabban fejlődő területe az intenzív képlékeny alakítás (Severe Plastic Deformation – továbbiakban SPD), amely lehetővé teszi a fémek és ötvözetek mechanikai tulajdonságainak radikális javítását extrém mértékű képlékeny alakváltozás segítségével. Az SPD olyan fémalakítási technikák összefoglaló neve, amelyek során az anyagot igen nagymértékű hidrosztatikus nyomás alatt rendkívül nagy plasztikus alakváltozásnak vetik alá. Az SPD eljárások során alkalmazott extrém deformáció hatására az anyagban lévő szemcsék megnyúlnak, majd fragmentálódnak. Ez a folyamat ultrafinom szemcsés (Ultrafine-Grained – UFG) vagy nanostrukturált anyagokat eredményez.

Az SPD kutatásának alapjai 1946-ig nyúlnak vissza, amikor Bridgman Nobel-díjat kapott a nagy nyomások fizikájában tett felfedezéseiért, amelyek során később kifejlesztette a nagy nyomáson végzett csavarást (High-Pressure Torsion – HPT), egy új fajta alakítási eljárást, amely során az anyag tulajdonságai jelentős mértékben megváltoztak [1]. A HPT mellett a könyöksajtolás (ECAP – Equal Channel Angular

Pressing) a leggyakrabban alkalmazott intenzív képlékeny alakító módszer, aminek hátránya a ciklikus jelleg, mivel egyetlen lépésben csak viszonylag kis alakváltozást (általában ~ 2 -es egyenértékű nyírást) hoz létre, így több lépésben lehet csak elérni vele a stabil ultrafinom szemcsés állapotot [2]. Ezért az ECAP-ot tovább fejlesztve hozták létre a NECAP-ot (Non-Equal Channel Angular Pressing), vagy más néven nem egyenlő keresztmetszetű csatornában történő könyöksajtoltást: ez az ECAP eljárás egy olyan változata, ahol a belépő csatorna keresztmetszete nagyobb, mint a kilépő csatornáé. Az NECAP hatékonyabb szemcsefinomítást tesz lehetővé egyetlen lépésben, mint az ECAP, de a hatalmas erőigénye miatt az ipari alkalmazhatósága korlátokba ütközik. Míg a NECAP-nál a sűrűdés hátráltatja a folyamatot, addig a módszerből továbbfejlesztett sűrűdással segített laterális extrúzió (FALEP) eljárás a sűrűdést hajtóerőként használja, emiatt a FALEP körülbelül ötször kisebb nyomóerőt igényel, mint a NECAP azonos extrúziós arány mellett. Így a FALEP, akár egyetlen lépésben, alacsonyabb energiabefektetés mellett is képes elérni a stabil, ultrafinom szemcsés állapotot (UFG). A berendezés egy függőleges nyomóbélyegből (ram) és egy vízszintes hajtóbélyegből (side anvil) áll, ami által a függőleges nyomás és a vízszintes sűrűdési nyírás kombinációja lehetővé teszi, hogy az anyagfolyam plasztikus állapota alacsonyabb nyomóerők mellett is kialakuljon [3]. Az ECAP, NECAP és FALEP sematikus rajza az 1. ábrán láthatók.



1. ábra. Az ECAP, NECAP és FALEP sematikus rajzai ([3]- Figure 1)

Az SPD eljárás során létrehozott ultrafinom szemcsés (UFG) anyagok olyan polikristályos fémek, amelyek átlagos szemcsemérete a szubmikrométeres tartományba, azaz $1\ \mu\text{m}$ alá esnek. Az SPD-vel készült anyagok számos pozitív tulajdonsággal rendelkeznek, az UFG szemcsehatárai nagy energiájú, „nem-egyensúlyi” állapotban vannak, amit a rácshibák (diszlokációk, vakanciák) nagy sűrűsége jellemez [4]. A szemcseméret csökkenés hatására a folyáshatár és a szakítószilárdság jelentősen megnő a durvaszemcsés anyagokhoz képest, ami a Hall–Petch összefüggéssel magyarázható, alumínium ötvözeteknél például a szilárdság akár a tízszeresére is növekedhet [1, 3]. Bár a szilárdság drasztikusan nő, az alakíthatóság, különösen az egyenletes nyúlás, általában csökken a korai képlékeny instabilitás miatt. Az alakíthatóság jellemzésére szolgáló Lankford-paraméter tekintetében megfigyelték, hogy egyes SPD-eljárások, mint például a FALEP, sajátos kristálytani textúrát hoznak létre. Ennek eredményeként az alumíniumlemezek R-értéke jelentősen megnövekedhet, ami kedvezően befolyásolja a mélyhúzhatóságot, így az alumíniumlemezek ipari alkalmazhatósága még tovább bővíthető [2]. Az UFG anyagoknál azt is tapasztalták, hogy a megnövekedett szemcsehatár-sűrűség hatékonyan akadályozza a repedések terjedését, ezáltal hozzájárul a kifáradási élettartam növekedéséhez. Ugyanakkor a törési szívósság gyakran anizotróp jelleget mutat, ami elsősorban az alakítási folyamat során megnyúlt szemcse szerkezet következménye [1].

Az SPD anyagalakítási folyamatokkal előállított lemezek tulajdonságainak megértésében segítség lehet egy szakítóvizsgálat keretében elvégzett felületi alakváltozásmező mérés. Ha terhelés hatására az alakváltozásmező változása inhomogenitást mutat akkor azt valamilyen anyagszerkezeti inhomogenitásra vezethető vissza, ilyen lehet az egy anyagon belüli egyenletlen szemcseméreteloszlás vagy maradó feszültség eloszlás, ami a további alakítási folyamatokra és végtermékre negatív hatással lehet. A FALEP eljárással készített lemezek esetében legjobb ismereteink szerint nem született még olyan tanulmány, ahol terhelés közben vizsgálták volna a felületi alakváltozásmező homogenitását.

Más esetekben már vizsgálták digitális képpelkorrelációval (DIC- Digital Image Correlation) a felületi deformációt az alumíniumlemezek szakítóvizsgálata során, aminek inhomogenitása több okból is származhat. Az anyag mikroszerkezeti hibáinak variációi, mint például a szemcseméret-különbségek és a lokalizált átkristályosodási vagy csúszási sávok, egyenletlen feszültségeloszlást és lokalizált deformációs zónákat eredményeznek [5]. Ezenkívül a hengerlési iránnyal és a minta orientációjával kapcsolatos

anizotrópia befolyásolja a mechanikai tulajdonságokat és a feszültségeloszlást, ami inhomogén alakváltozáshoz vezet [6].

A tanulmányunkban azt szeretnénk megvizsgálni, hogy hogyan alkalmazható a felületi alakváltozásmező homogenitás vizsgálatának szempontjából az alakváltozásmező pontjainak alakváltozás közbeni relatív szórása. A szakítóvizsgálat közben, ha digitális képkorrelációs felületi alakváltozás-mérő rendszerrel vizsgáljuk a próbatestünket, akkor a felvett képek alapján létre tudunk hozni egy ponthálót, ahol a pontok lekövetik a felületi alakváltozást, ezáltal a felületi alakváltozásmező is megfigyelhetővé válik. Az alakváltozásmező homogenitását az egyes pontok alakváltozásának egymáshoz viszonyított relatív szórásával kísérreljük meg jellemezni. Az alakváltozásmező relatív szórása alkalmas mérőszám lehet arra, hogy jellemezzen egy anyagon belüli inhomogenitást.

2. PRÓBATEST ÉS MÉRÉSI MÓDSZER

Minden alakítási folyamat kiindulási anyaga Al 1050 lágyított lemez volt, amit tovább alakítottunk. Összesen három különböző lemezalakító eljárást alkalmaztunk, amik a következők voltak: hideghengerlés, FALEP + hideghengerlés és tisztán FALEP.

A hideghengerlés esetében 2 mm-es kiindulási vastagságról hengereltünk 0,5 mm-es szűrásokkal 3 szűrásban, míg el nem értük a végső vastagságot, ami átlagosan 0,6 mm volt.

A FALEP + hideghengerlés eljárással készült lemez esetében 20 mm-es Al 1050 lágyított lemezből egy FALEP szűrásban alakítottuk 4 mm-es vastagságúra, a folyamat során az extrúziós arány 5 volt. Majd utóhengerlés során 0,5 mm-es szűrásokkal értük el a végső méretet, ami átlagosan 0,6 mm volt.

A tisztán FALEP eljárással készült lemezek esetében egy lépcsőben 20mm-es vastagságról alakítottuk 0,9 mm-esre, a folyamat során az extrúziós arány 22 volt. Itt a kimunkált próbatestek felülete nem volt egyenletes a nyírást elősegítő csúszó bélyeg mintázata miatt. Ezért a próbatestek további csiszolást igényeltek, így a végső próbatestek vastagsága átlagosan 0,9 mm-ről 0,8 mm-re csökkent.

A különböző alakítási folyamattal kapott lemezekből szakítópróbatésteket munkáltunk ki, úgy, hogy a hengerlés vagy extrúzió iránya a leendő szakítás irányához képest 0, 45, 90 fokos szöget zárjon be. A hideghengerléshez az 1-3. minta csoport, a FALEP + hideghengerléshez a 4-6. mintacsoport és a tisztán FALEP eljárással készült lemezekhez a 7. mintacsoport tartozik, minden mintacsoportban három darab próbatéste vizsgáltunk. A vizsgálati csoportok jellemzői az 1. táblázatban találhatóak. A kimunkált szakítópróbatéste párhuzamos szakaszának hossza 50 mm, szélessége 12,5 mm volt, a vastagsága 1–6. csoport esetén 0,6 mm, míg a 7. csoport esetén 0,8 mm.

A nagyobb mértékű alakváltozás megfigyelése érdekében minden csoportnál az alakított lemezek 400 °C-on egy órás hőkezelésen mentek keresztül, ami után a próbatestek szobahőmérsékleten hűltek le. A különböző eljárással készült lemezek és próbatestek a Miskolci Egyetem Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet segítségével készültek el.

Vizsgált anyagcsoportok

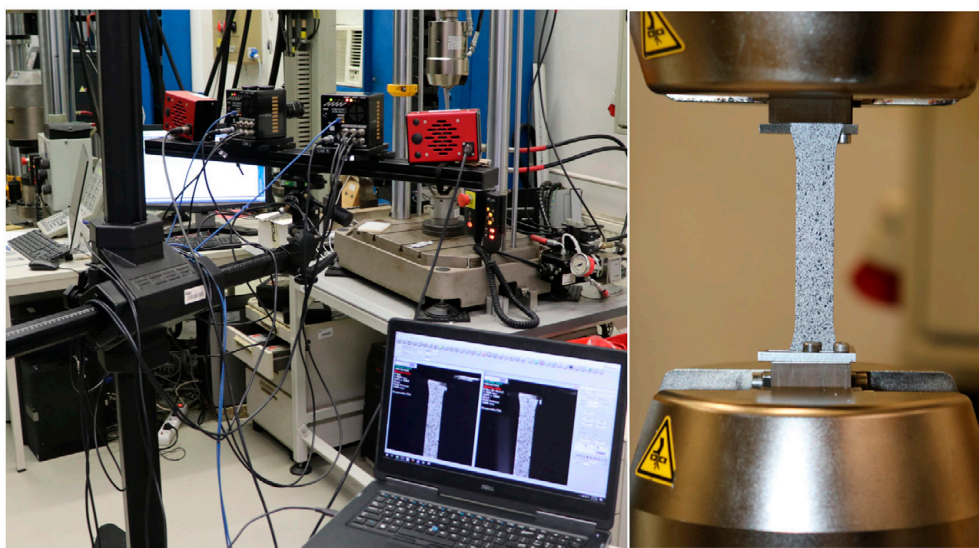
1. táblázat

Minta csoport-azonosító	Kiindulási alapanyag	Lemez alakítási eljárások megnevezése	Szakító próbatéste mintavételezési szöge a hengerlési irányhoz képest	Szakító próbatéste mintavételezési szöge az extrúziós irányhoz képest
1.	Al 1050-O	Hideghengerlés	0°	-
2.	Al 1050-O	Hideghengerlés	45°	-
3.	Al 1050-O	Hideghengerlés	90°	-
4.	Al 1050-O	FALEP + hideghengerlés	0°	90°
5.	Al 1050-O	FALEP + hideghengerlés	45°	45°
6.	Al 1050-O	FALEP + hideghengerlés	90°	0°
7.	Al 1050-O	FALEP	-	0°

A szakítóvizsgálatokat egy INSTRON 8874-es típusú szervohidraulikus, biaxiális anyagvizsgáló berendezésen végeztük el és 25 kN-os class-1 es pontosságú erőmérő cellát alkalmaztunk az erőméréshez. a vizsgálati sebesség 6 mm/min volt minden esetben.

A GOM DIC rendszer esetében a mérési sík 200x200 mm volt, ezen a területen belül bármely egyedi mintázattal ellátott pontok térbeli elmozdulását a mérőrendszer nyomon tudja követni; ehhez a mérőrendszer használata előtt festékszórással egyedi mintázatot (matt fehér alapon változó méretű és véletlenszerűen elhelyezkedő matt fekete pöttyök) vittünk fel a próbatetek felületére, aminek segítségével a vizsgálatok szoftveres kiértékelésénél a próbatest párhuzamos szakaszának egészén az alakváltozás mezőt vizsgáltuk. A GOM Aramis DIC mérőrendszere Titanar 75 mm-es fókusz távolságú objektívekkel felszerelt Photron Fastcam Mini WX50 kamerákból és GOM Correlate 2017 képfeldolgozó szoftverből állt, a vizsgálati elrendezés a 2. ábrán látható. A mérőrendszer ilyen beállítások mellett 0,004 mm-es pontossággal tudta nyomon követni a pontháló mozgását pontonként. A szakító vizsgálatokat és a DIC felületi alakváltozásmérést a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. mechanikai anyagvizsgáló laborjában végeztük el.

A szakító vizsgálatok során rögzített képeket a GOM Correlate 2017 szoftver segítségével dolgoztuk fel. Az alakváltozás mező kiértékeléséhez szükséges pontháló (mesh) létrehozásához 20x20 pixel méretű felületelemet (facet) használtunk, aminek a tényleges mérete 2,42 mm² volt. Minden egyes felületelem 3 pixelenként (0,05 mm) lett létrehozva a felületen, ami a hálósűrűséget jellemzi. Az alakváltozásmezők vizsgálatához olyan ponthálókat hoztunk létre, amik a próbatest párhuzamos szakaszának egészére kiterjednek (50x12 mm).



2. ábra. Optikai alakváltozás-méréssel végzett vizsgálat elrendezése bal oldalt, szakítópróbatest a próbatestre felvitt egyedi mintázattal jobb oldalt

3. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK

Vizsgálatsorozatunk során a meghatározott mechanikai tulajdonságokat a 2. táblázat tartalmazza. A különböző irányú alakváltozásokat a teljes párhuzamos vizsgálati szakaszon definiált alakváltozásmező segítségével kaptuk meg. A próbatesteket Y irányba húztuk a vizsgálat során.

Szakító vizsgálati eredmények

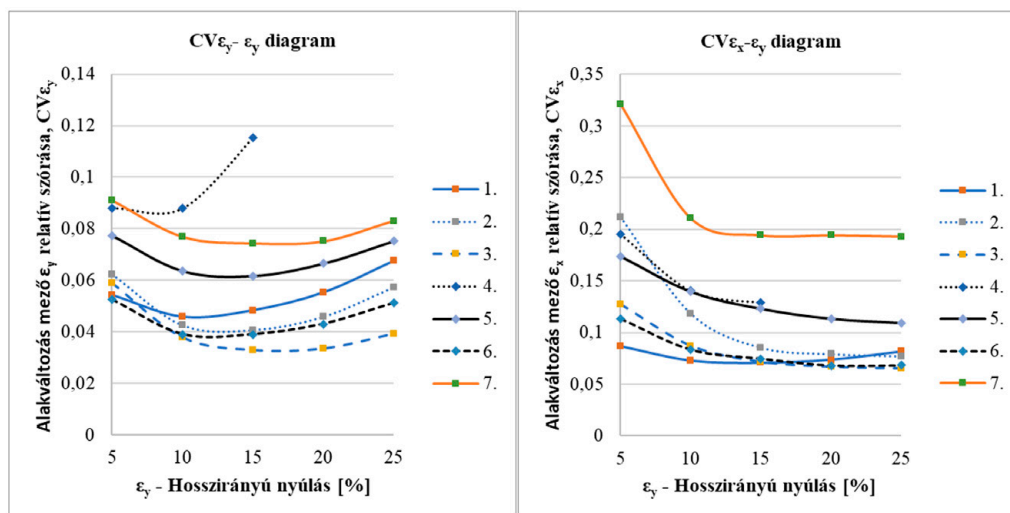
2. táblázat

Mintacsoport azonosító	Szélesség [mm]	Vastagság [mm]	R _m [MPa]	F _m [N]	ε _{Rm} [%], Y iránynál	ε _{max} [%], Y iránynál	ε _{Rm} [%], X iránynál	ε _{max} [%], X iránynál
1.	12,50	0,60	80,36	602,43	29,40	41,52	12,85	16,38
2.	12,49	0,61	82,83	634,53	33,22	41,47	9,55	11,32
3.	12,49	0,62	75,76	586,79	28,64	41,56	10,19	13,56
4.	12,47	0,64	71,29	565,82	17,95	18,82	6,20	6,39
5.	12,44	0,63	70,66	556,92	32,92	43,18	14,21	17,06
6.	12,47	0,62	70,04	544,42	34,52	45,24	12,13	14,93
7.	12,54	0,80	69,94	704,36	31,59	36,50	7,21	8,23

Az alakváltozási mezők homogenitását az egyenletes nyúlás szakaszában vizsgáltuk meg, itt olyan nyúlásértékek mellett vizsgáltuk a hossz- és keresztirányú alakváltozás relatív szórását, amely mindegyik mintacsoportnál előfordult, így az 5-10-15-20-25 %-os hosszirányú nyúlásnál határoztuk meg a hossz- és keresztirányú alakváltozás mezők relatív szórását, ami a 3. ábrán látható. Mérnöki nyúlást és -alakváltozást határoztunk meg mindenhol. A 4-es mintacsoport esetében a 20-25 %-os hosszirányú mérnöki nyúlásnál nem tudtuk meghatározni a relatív szórásokat a próbatest szakadása miatt. Az alakváltozás mezők relatív szórását ($CV\varepsilon_i$) az (1) összefüggés alapján határoztuk meg, ahol $\sigma\varepsilon_i$ az i irányú alakváltozásmező pontthalmazán meghatározott alakváltozási értékek szórása, $\bar{\varepsilon}_i$ pedig az i irányú alakváltozásmező alakváltozásának átlaga.

$$CV\varepsilon_i = \sigma\varepsilon_i / \bar{\varepsilon}_i \quad (1)$$

Az alakváltozás mezők relatív szórásának vizsgálatai alapján az tapasztalható, hogy a hideghengerlés homogénebb, mind hossz- és keresztirányú felületi alakváltozás eloszlást eredményez, mint a FALEP + hideghengerlés folyamata esetén. Az egyes alakítási módokat vizsgálva az tapasztalható, hogy a hideghengerlés (1-3. mintacsoport) esetében a hossz- és keresztirányú alakváltozás mező relatív szórás értéke alacsonyabb volt és a lemezből különböző irányokban kivett próbatestek relatív szórása is közelebb esik egymáshoz, mint a FALEP + hideghengerlés (4-6. mintacsoport) esetében. Ha a hossz- és keresztirányú alakváltozás mező relatív szórását együttesen figyelembe vesszük, akkor a 7. mintacsoportnak volt a legnagyobb a relatív szórása.

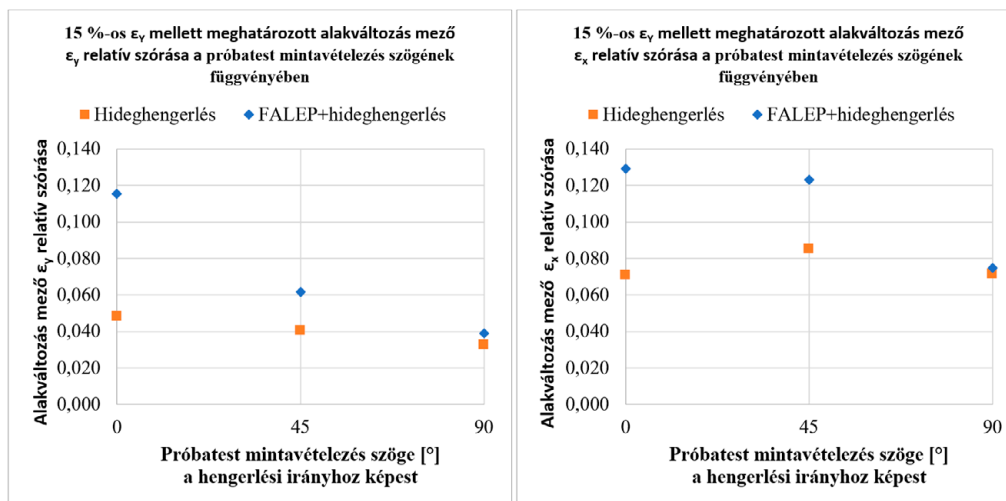


3. ábra. Az 5-10-15-20-25 %-os hosszirányú nyúlásoknál meghatározott hosszirányú alakváltozási mező relatív szórása (bal oldalt) illetve a keresztirányú alakváltozási mező relatív szórása (jobb oldalt). A görbéket 5, illetve 3 egyedi pontra illesztettük.

A FALEP + hideghengerlés esetén a 4. mintacsoportnál, a terhelés iránya párhuzamos a hengerlés irányával, míg az extrúzió irányával merőleges; már az egyenletes nyúlás szakaszánál jól láthatóan elkezdődik egy lokális deformáció, ahol később a kontrakciós zóna alakult ki. Itt jól megfigyelhető egy nagyobb mértékű lokális deformáció, illetve több kisebb mértékű is. Általános esetben a szakítószilárdságig kellene tartania az egyenletes nyúlás szakaszának, viszont ebben az esetben korábban elkezdődik egy lokális nagymértékű alakváltozás. A többi mintavételezési iránynál ilyen jellegű karakterisztikus viselkedéssel nem találkoztunk. Az alakváltozási mező keresztirányú alakváltozásának vizsgálatokor nem tapasztaltuk, hogy megnövekedett volna a 4. mintacsoportnál a relatív szórás az egyenletes nyúlás szakaszánál. Anizotrópiára utal, hogy az extrúzió irányában az alakváltozási mező homogenitása más volt, mint a rá merőleges irányban.

Ha azt vizsgáljuk, hogy 15 %-os hosszirányú alakváltozás mellett hogyan változik a hossz- és keresztirányú alakváltozás mezőnek a relatív szórása a próbatest mintavételezés szögének függvényében (4. ábra), akkor azt tapasztaljuk, hogy a hideghengerlés hosszirányú alakváltozás mezőjének relatív szórása közel azonos, míg a FALEP + hideghengerlés esetében ahogy nő a mintavételezési szög, úgy csökken a relatív szórás. Ahogy nő a mintavételezési szög, úgy zár be egyre kisebb szöget a terhelés vonala és az extrúzió iránya és ez a hosszirányú alakváltozás mező relatív szórásának csökkenésével jár. Itt az extrúzió irányában háromszor kisebb relatív szórást tapasztaltunk, mint a hengerlési irányban, a hosszirányú alakváltozás mezőt vizsgálva. Ez a jelenség megfigyelhető a keresztirányú alakváltozás mezőt vizsgálva is,

csak nem olyan szignifikánsan. Ebből arra következtetünk, hogy a FALEP alakítási folyamattal olyan textúra jött létre, ami hideghengerlés és hőkezelés után is megőrzi a karakterisztikáját.



4. ábra. A 15 %-os hosszirányú alakváltozás mellett a hossz- (bal oldalt) és keresztirányú (jobb oldalt) alakváltozás mező relatív szórása a próbatest mintavételezés szögének függvényében

4. ÖSSZEGRÉS

A jelen kutatás az Al 1050 lágyított lemezekben végzett különböző alakítási folyamatok hideghengerlés, FALEP és ezek kombinációjának hatását vizsgálta az egytengelyű húzófeszültség hatására a változó felületi alakváltozásmező homogenitásán keresztül. A vizsgálat során digitális képprofilalkalmazás alakváltozásmérő rendszert alkalmaztunk a szakítóvizsgálatok közbeni deformáció nyomon követésére.

Arra a következtetésre jutottunk, hogy a FALEP alakítási folyamat során kialakult sajátos kristálytani textúrák és anyagszerkezeti jellemzők hatással vannak az alakváltozási mező homogenitására, aminek kvantitatív jellemzésére az alakváltozási mező relatív szórásának meghatározása alkalmas lehet. Viszont ennek igazolására még további olyan vizsgálatokra (textúra, EBSD, Lankford-tényező) van szükség, ami szintén jellemzi az anyag homogenitását.

A szilárdsággal kapcsolatos eredményeinket összehasonlítva a témával foglalkozó irodalommal [2] azt találtuk, hogy az utólagos hőkezelés hatására a tisztán FALEP eljárással készült lemezek esetében, az extrúzióval párhuzamos irányt vizsgálva a szakítószilárdság 187-ről 70 MPa-ra csökken le, viszont a szakítószilárdsághoz tartozó megnyúlás 5,2%-ról 36,5%-ra nőtt. Ennek oka a hőkezelés hatására létrejövő szemcseduvulás lehet, ennek igazolására még további vizsgálatokat tervezünk.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] K. Edalati, A. Bachmaier, V. A. Beloshenko, Y. Beygelzimer, V. D. Blank, , L. S. Toth , *Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances*, Materials Research Letters, Taylor and Francis Ltd., 2022, pp. 163-256.
- [2] V. Vu, L. S. Tóth, Y. Beygelzimer, Y. Zhao, *Microstructure, Texture and Mechanical Properties in Aluminum Produced by Friction-Assisted Lateral Extrusion*, Materials, MDPI, 2021, 2465.
- [3] L. S. Tóth, M. Sepsí, M. Szűcs, S. N. Kumaran és T. C. Lowe, *The mechanics of the friction-assisted lateral extrusion process*, J Mater Sci, Springer, 2024, pp. 6059-6074.
- [4] L. S. Toth és C. Gu, *Ultrafine-grain metals by severe plastic deformation*, MATERIALS CHARACTERIZATION, Elsevier Inc., 2014, pp. 1-14.
- [5] G. Zhao, M. Sun, J. Li, H. Li, L. Ma és Y. Li, *Study on quasi-in-situ tensile microstructure evolution law of 5052-O aluminum alloy based on EBSD*, Materials Today Communications, Elsevier Ltd, 2022.
- [6] M. Harant, P. Verleysen, M. Forejt és S. Kolomy, *The Effects of Strain Rate and Anisotropy on the Formability and Mechanical Behaviour of Aluminium Alloy* , Metals, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2024.