

KÁRPÁTI VIKTOR – MIKÓ TAMÁS – BARKÓCZY PÉTER – ANGEL DÁVID ÁDÁM – GÁCSI ZOLTÁN

Nyomóvizsgálatok alkalmazása homogenizálás során bekövetkező folyamatok hatásának kimutatására alumíniumötvözetekben

Alakíthatóság alatt a fémek alakváltozási képességét értjük: számszerűen a repedés, illetve a törés bekövetkeztéig felhalmozódott alakváltozás jellemzi. Az alakíthatóságot számos tényező befolyásolhatja, jellemzésére szintén sokféle módszer használatos. Munkánkban alakítható alumíniumötvözetek előmelegítése/homogenizálása során végbemenő folyamatok hatását vizsgáltuk a melegalakíthatóságra. A kísérletek során gyorsan végrehajtható, nagy mintaszámú próbasorozatot kezelni tudó, megbízható eredményeket adó nyomóvizsgálatot alkalmaztunk a Miskolci Egyetem Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetében lévő Instron 5982 típusú anyagvizsgáló berendezéssel. A gyors hevítést saját fejlesztésű induktorral oldottuk meg, melynek szabályozását a darab hőmérsékletét mérő termoelemmel végeztük. A kísérlet során a hideg- és meleghengertést, az ott végbemenő fémteni folyamatokat fizikailag szimuláltuk. A cikk a különböző képlékenyalakítási és hőkezelési technológiák okozta szövetszerkezeti és nyomószilárdsági következményeket ismerteti.

Bevezetés

Az Arconic-Köfém Kft.-vel közös kutatási projektet indított a Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Kara a Dunaújvárosi és a Széchenyi István Egyetemekkel, mely projekt egyik kulcskérdése az ötvözetek alakíthatósága, leginkább hengerelhetősége. Az alakíthatóság vizsgálatára számos módszer létezik, mint például a kísérleti hengerlés (Von Roll hengerállvány), vagy termikus szimulációban végzett alakítás (Gleeble), mely szintén rendelkezésünkre áll, viszont ezek a módszerek nagyméretű, vagy speciális mintát igényelnek, előállításuk nagy mintaszámú kísérlet esetében körülményes és hosszadalmas. Célunk egy kísérletsorozat megterve-

zése és végrehajtása volt, amely segítségével a próbák alakíthatóságát az esetleges nagy mintaszám esetében is rövid idő alatt, megbízhatóan meg tudjuk állapítani.

A hideg- és melegalakítás közötti alapvető eltérés, hogy az újrakristályosodás végbemegy-e az alakítás hőmérsékletén vagy nem. Az újrakristályosodás egy csíráképződéssel és csíranövekedéssel járó fémteni folyamat, melynek hajtóereje az alakítás

szórában a fémekben megnövekedett tárolt energia. Hidegalakítás során ez a folyamat nem játszódik le, így az anyagban fokozatosan nő az egydimenziós, vonalszerű rácshibák száma, ami az anyag keményedését, alakváltozási képességének kimerülését fogja okozni. A szemcseszerkezet megváltozik, a szemcsék nyújtottabbak, kristálytanilag orientáltak (textúrák) lesznek, minek következtében anizotróp viselkedést fognak

1. táblázat. A minták összetétele, %

Ötvözet	Al	Si	Mn	Fe	Mg	Zn	Pb	Cu	Cr	Ti	Cd
3003	97,99	0,23	1,1	0,53	0,016	0,023	0,001	0,057	0,004	0,022	0,0005
5005	98,48	0,14	0,054	0,47	0,77	0,008	0,001	0,012	0,014	0,012	-
5052	96,89	0,12	0,08	0,26	2,41	0,01	0,002	0,044	0,16	0,012	-

Kárpáti Viktor 2017-ben szerzett BSc anyagmérnök diplomát a Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Karán. Jelenleg MSc-hallgató és a Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet tanszéki mérnöke. Kutatási területe képlékenyalakítás, kristályosodás, roncsolásmentes anyagvizsgálat.

Mikó Tamás 2016-ban doktorált a Miskolci

Egyetem Műszaki Anyagtudományi Karán. Tudományos munkatárs a Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetben. Kutatási területe: képlékenyalakítás, roncsolásos anyagvizsgálat, porkohászat.

Barkóczy Péter 2000-ben szerzett diplomát, majd 2004-ben doktorált a Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Ka-

rán. Jelenleg az intézmény docense és a FUX Zrt. fejlesztési igazgatója.

Angel Dávid Ádám a Miskolci Egyetem Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetének PhD-hallgatója. Kutatási területe: porkohászat, titán mátrixú kompozitok.

Gácsi Zoltán szakmai életrajzát 2015/3. számunkban közzétettük.

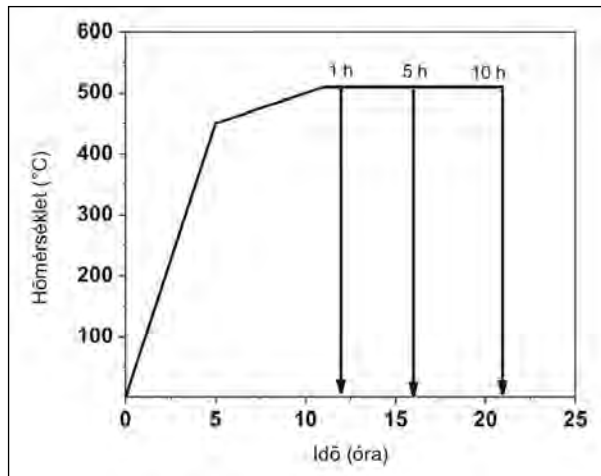
mutatni. Melegalakítás során az újrakristályosodás folyamata az alakítás hőmérsékletén végbemegy [1–3]. Az újrakristályosodás folyamata maga is összetett, a megújulásra, az új csírák képződésére, növekedésére, majd a szemcsedurvulási szakaszra osztható. Alumíniumötvözetek ezen folyamatok végbemenetele szerint nagyon szélsőségesen viselkedhetnek. Bizonyos ötvözetcsaládok esetén a hidegalakítással tárolt energia csak a megújulási szakaszra elegendő és a keménység csökkenése

ugyan megtörténik, de a szemcsék orientációjának a változása nem, ami a végtermék felhasználása szempontjából nagyon fontos. Az újrakristályosodás végbemenetelében szintén nagy szerepet játszanak a kiválások, melyek a termékek melegalakítását megelőző hevítés, homogenizáló hőkezelés során jelentősen változhatnak [4–5].

Vizsgált anyagminőségek és kísérleti hőkezelések

A kutatómunkánk során alakítható 5xxx típusú ötvözetcsoporthoz két ötvözetet, illetve a 3xxx csoport egy ötvözetét vizsgáltunk, összetételüket az 1. táblázat szemlélteti. A 3xxx ötvözet fő ötvözője a Mn, ami 1% körüli érték. Attól függően, hogy oldatban van, vagy különböző kiválások formájában, jelentős hatást gyakorol az alakíthatóságra. Az 5xxx típus szintén az alakítható, nem nemesíthető alumíniumötvözetek közé tartozik. Ennek a csoportnak a fő ötvözője a Mg, ami jellemzően 0,7-2,4% között változik.

Kutatómunkánk során az 1. ábra szerinti homogenizáló hőkezelési programot alkalmaztuk. A homogenizálás csúcshőmérséklete 510 °C, a homogenizálási időtartam 1, 5 és 10 óra volt mindhárom ötvözet esetében. A különböző idejű homogenizálások olyan eseteket modelleznek, amikor a valódi termelésben ugyanazon adag különböző okok miatt (tuskó eleje/közepé/vége, a hőkezelés nem tervszerű kivitelezése) eltérő időtartamokig tartózkodik a kemencében.



■ 1. ábra. A homogenizálási program

Alakíthatósági tesztek és szövetszövetvizsgálat

Az alakíthatósági tesztek hideg- és melegzömítésekkel végeztük el. A hidegzömítést 23 °C-on, a melegzömítést 400 °C-on 1/s-os alakítási sebességgel és 60%-os alakítási mértékkel végeztük [6–7]. A melegen zömítendő darabok hevítését és hűntartását egyedileg tervezett induktor segítségével biztosítottuk, a hőmérsékletet a hengeres próbatest (Ø 10 × 15 mm) palástjának közepébe fűrt lyukba erősített hőelem segítségével mértük. Az erő mérésére 100 kN-os erőmérő cellát, az alakváltozás mérésére video extenzométert használtunk. A zömítővizsgálatok előtt és után mértük a darabok geometriai méreteit. A zömítővizsgálat után a hidegen alakított darabokat hőkezeltük, előmelegített kemencében 500 °C-on, 1 órán keresztül. A hőkezelés után a

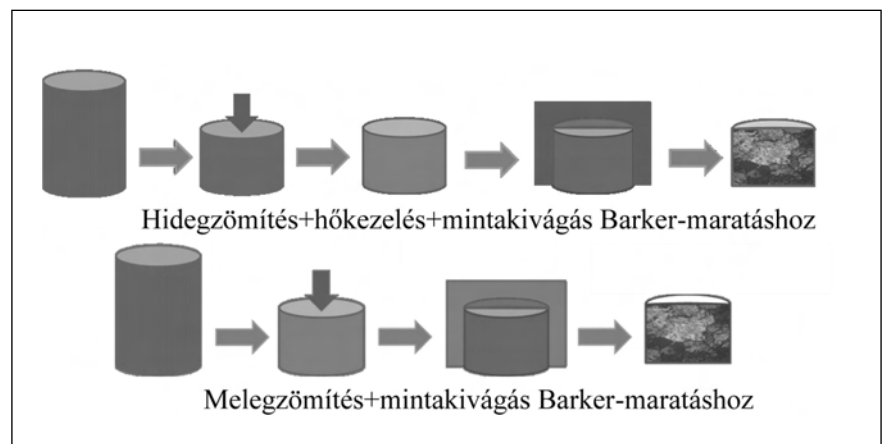
darabokat vízben hűtöttük le, hogy az aktuális szerkezetet megőrizzük.

A zömítés során mért adatokból valódi feszültség és valódi alakváltozás diagramokat határoztunk meg. Az alakított, a hidegzömített, majd lágyított, illetve a melegzömített próbatesteket a nyomás tengelyének síkjában (hosszcsiszolati sík) kettévágtuk (2. ábra). Ezen a metszeten színes maratási technikát alkalmaztunk a szemcseszerkezet láthatóvá tételére (Barker-maratás), amelynek segítségével a

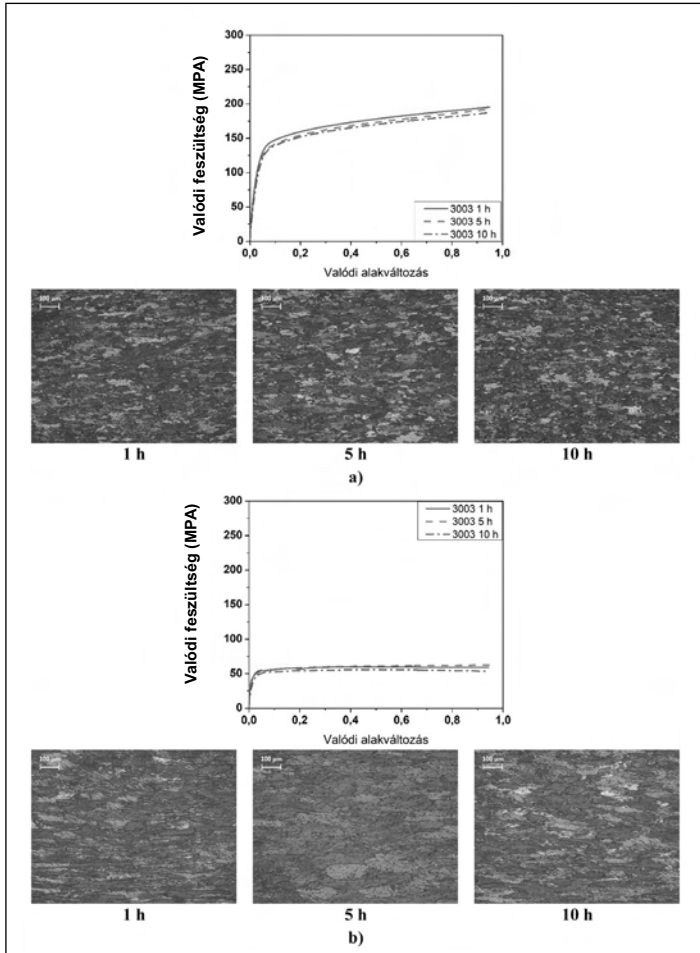
különböző orientációjú szemcsék különböző színnel jeleníthetők meg polarizált fényben. A Barker-maratásos szemcseszerkezet-vizsgálatot a Miskolci Egyetem Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet Optikai mikroszkóp laboratóriumában, polarizált fényű Zeiss Axiovert 100 típusú mikroszkópon végeztük el. A szemcsék morfológiája alapján az újrakristályosodás tényére lehet következtetni.

Eredmények

A 3–5. ábrák mutatják az eredményeket mindhárom ötvözetre: a valódi feszültséggörbéket hideg- és melegalakítás után, a szövetszerkezet melegalakítás után, valamint a hidegalakítás és azt követő hőkezelés során kialakuló szövetszerkezet. A 6. ábra a maximális valódi feszültségadatokat foglalja össze.



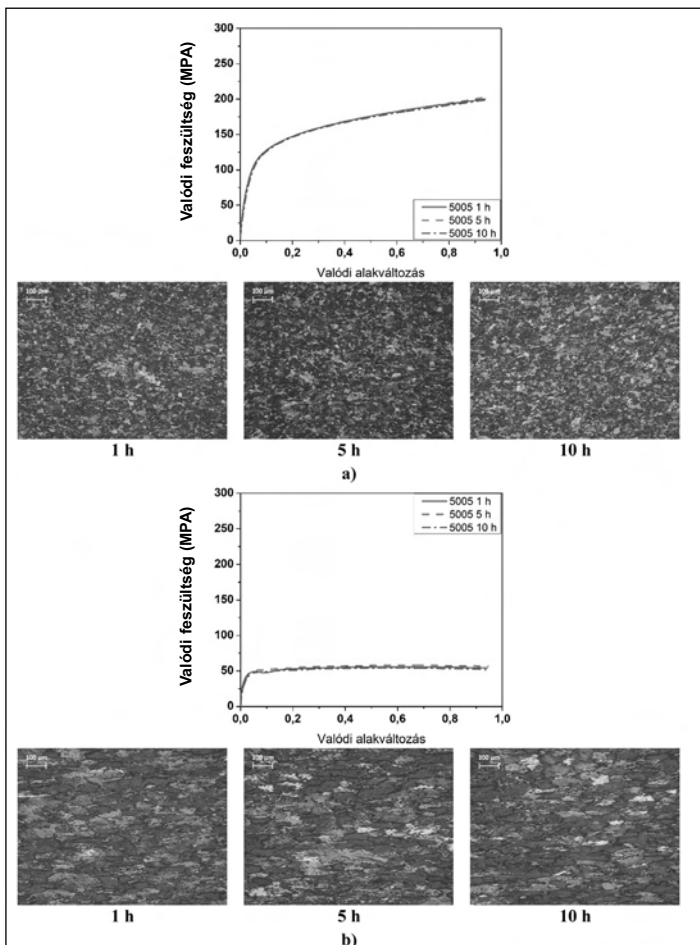
■ 2. ábra. A mintakészítés lépései



3003-as ötvözet

A 3. és a 6. ábra diagramjain látható, hogy az eltérő homogenizálási időtartamok nem okoznak különbséget a feszültséggörbék lefutásában sem hideg-, sem melegalakításkor. Nincs érdemi különbség a szilárdsági adatokban sem. Ennek megfelelően a homogenizálási idő növelése a szemcseszerkezetben sem okoz különbséget. A melegalakítás után döntően megmaradt az alakított, elnyújtott szemcseszerkezet, kevés ekviaxiális szemcsével, ami a dinamikus újrakristályosodás csak nagyon kis mértékű végbemene-telére utal. (Vagyis ez azt jelenti, hogy amit melegalakításnak hívunk, fémtani szempontból nem volt melegalakítás.) A hidegalakítást követő lágyítás után részben újrakristályosodott szemcseszerkezetet látunk, vagyis a nagyszögű szemcsehatármozgással járó klasszikus újrakristályosodás nem játszódott le.

■ **3. ábra.** A 3003-as ötvözet a) valódi feszültséggörbéi hidegalakítás után és szemcseszerkezete hidegalakítás és lágyítás után; b) valódi feszültséggörbéi és szemcse-szerkezete melegalakítás után



5005-ös ötvözet

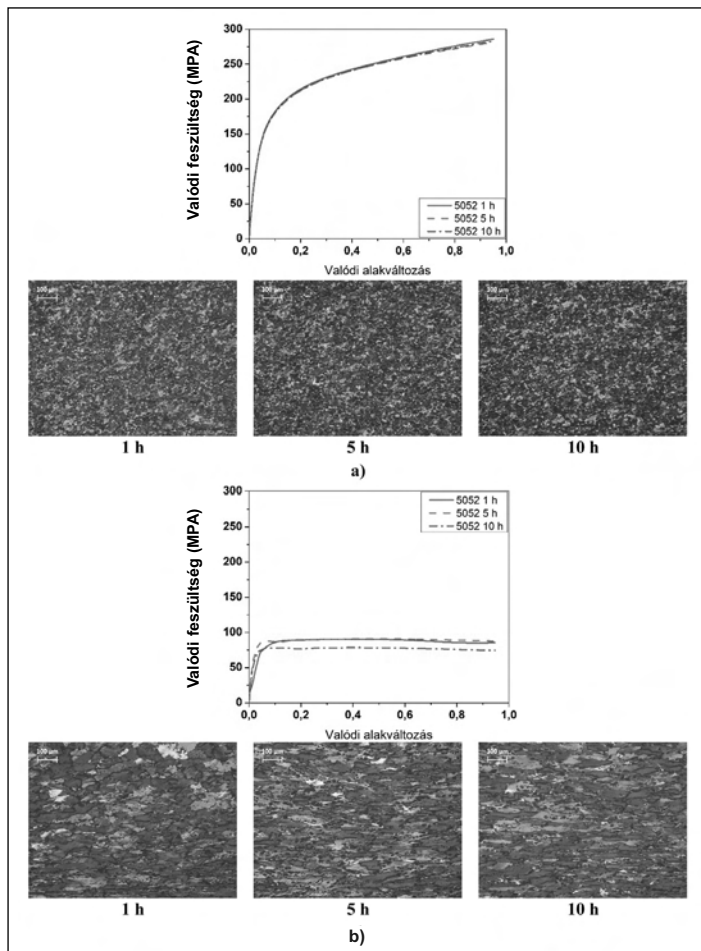
A 4. és a 6. ábra alapján megállapítható, hogy az 5005-ös ötvözet esetében sincs hatása a homogenizálási idő növelésének a feszültséggörbék lefutására sem hideg-, sem melegalakítás során. A szövetszép alapján melegalakításkor a dinamikus újrakristályoso-dás itt sem ment teljesen végbe. A hidegalakítást követően kilágyított minták szemcseszerkezete viszont döntően ekviaxiális, finom szemcsékből áll, vagyis a nagyszögű szemcsehatármozgással járó klasszikus újrakristályosodás lejátszódott az 5005-ös ötvözet lágyítása közben.

■ **4. ábra.** Az 5005-ös ötvözet a) valódi feszültséggörbéi hidegalakítás után és szemcseszerkezete hidegalakítás és lágyítás után; b) valódi feszültséggörbéi és szemcseszer-kezete melegalakítás után

5052-es ötvözet

Az 5. és 6. ábra alapján az 5052-es ötvözetnél a 10 órás homogenizálás kisebb szilárdságot eredményezett melegalakítás közben, míg hidegalakításkor nem tapasztaltunk eltérést. A szemcseszerkezet melegalakítás esetében itt is csak részleges újrakristályosodást mutat, hidegalakítást követő lágyítás után viszont egyenletes, finomszemcsés szerkezet alakult ki, ami ezúttal is azt jelenti, hogy a nagyszögű szemcsehatármozgással járó klasszikus újrakristályosodás lejátszódott az 5052-es ötvözet lágyítása közben.

■ 5. ábra. Az 5052-es ötvözet a) valódi feszültségörvéi hidegalakítás után és szemcseszerkezete hidegalakítás és lágyítás után; b) valódi feszültségörvéi és szemcseszerkezete melegalakítás után



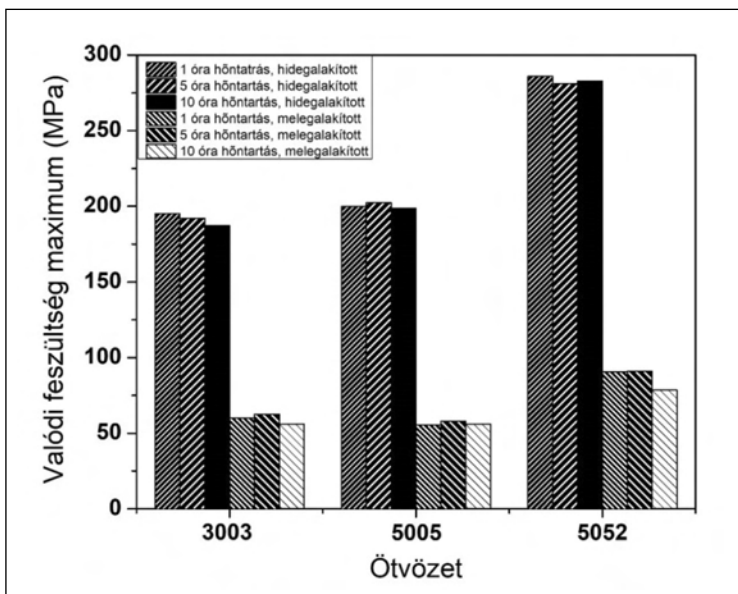
Megállapítások

A 6. ábra mutatja a három ötvözet valódi feszültség maximumának értékét a homogenizálási idő függvényében hideg- és melegzömítés esetében. Látható, hogy a hidegzömítés során mért feszültségmaximumok gyakorlatilag nem függenek a homogenizálás időtartamától. A 3003-as ötvözet rendelkezik a legkisebb feszültségmaximummal (Mn-tartalom 1,1 m/m%). Az 5005-ös ötvözet szilárdsági értéke magasabb, ami annak köszönhető, hogy bár Mn-tartalma kisebb (0,054 m/m%), de a Mg a szilárdságnövelő hatását ki tudja fejteni (0,77 m/m%). A legnagyobb feszültségérték 5052-es ötvözet esetében volt mérhető, ami az ötvözet nagyobb Mg-tartalmának (2,41 m/m%) köszönhető.

A melegzömítés során mért maximális feszültségértékekről általánosságban elmondható, hogy a homogenizálási idő növelésének nincs érdemi hatása. A legnagyobb ötvözet tartalmú 5052-es a legnagyobb szilárdságú ebben az esetben is.

A szövetszövetvizsgálatok alapján elmondható, hogy a melegalakítás közben csak részlegesen megy végbe az újrakristályosodás, mindhárom ötvözet esetében a homogenizálási időtől függetlenül.

A hidegalakítást követő lágyítás eredményében mutatható ki a legnagyobb eltérés. Az ötvözet tartalom növelése az újrakristályosodási folyamatnak egyértelműen kedvez. A legnagyobb ötvözet esetén volt a legfinomabb a szemnagyság és a legnagyobb mértékű az újrakristályosodott hányad. Ez a hatás a magasabb ötvözet tartalom miatt megjelenő kiválások miatt jön létre, ugyanis a csíráképző helyek kialakításában játszanak nagy szerepet [8].



■ 6. ábra. Valódi feszültség maximumok a homogenizálási idő függvényében

Összefoglalás

Kutatásunk célja különböző alumínium-ötvözetek alakíthatóságának vizsgálata volt. A szakirodalommal összehangban fontosabb megállapításaink a következők.

1) A legnagyobb valódi feszültség maximuma a nagy (2,41 m/m%) Mg-tartalmú ötvözetnek van, a legkisebb pedig a leggyengébben ötvözött 3003-asnak.

2) Azonos típusú hőkezelés esetén az alakítási ellenállás értékeit döntően az ötvözet összetétele határozza meg, a homogenizálás időtartamának nincs jelentős hatása [9].

3) A vizsgált ötvözetek esetében a homogenizálási idő változása nem okoz érdemi eltérést a szemcseszerkezetben. Az 1, 5 vagy 10 óra homogenizálási idő indifferens az ötvözet mechanikai tulajdonságai szempontjából.

4) A hidegalakítást követő lágyítás után az 5005-ös és 5052-es ötvözetek

teljes térfogatban újrakristályosodtak. Ennek oka a csíráképződést és a növekedést elősegítő nagyobb Mg-tartalmuk [10].

Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutatómunka az EFOP-3.6.1-16-00011 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 valósul meg.

Irodalom

- [1] Dr. Gácsi Z., dr. Mertinger V.: Fém-tan, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 2000. Digitális változat: <https://www.tankonyvtar.hu/>
- [2] Mikó T.: Alumínium-magnézium ötvözetek folyási viselkedése zö-

mítés során, PhD-értekezés, Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, 2016.

- [3] Altan T., Ngaile G., Shen G.: Cold and Hot Forging Fundamentals and Applications, ASM International, Materials Park Ohio, 2005.
- [4] Dr. Gillemot L.: Anyagszerkezettan és anyagvizsgálat, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1967.
- [5] Szmirnov-Aljajev G. Sz.: Szoprotivlenije materialov plaszticeszkomu deformirovaniju, Masgiz, 1961.
- [6] Aluko O., Adeyemi M. B.: JMEPEG 7 474–478, 1998.
- [7] Williams J. G., Gamonpilas C.: Int J Solids Struct 45 4448–4459, 2008.
- [8] Dr. Zorkóczy B.: Metallográfia és anyagvizsgálat, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1968.
- [9] Girisha H. N., Sharma K. V.: Int J Sci & Eng Res 32 1–4, 2012.
- [10] Yildirim M., Ozyurek D.: Mat Design 51 767–774, 2013.

PETHŐ DÁNIEL – HLAVÁCS ADRIENN – BENKE MÁRTON

A fülesedés és a textúrakomponensek közötti kapcsolat AA3003-as lemezekben*

Az alumíniumlemezek legnagyobb felhasználási módja a mélyhúzás. A mélyhúzhatóságot a kristálytani textúra határozza meg. A kristálytani textúra az anyagban található szemcsék kristálytani orientációját adja meg, más szóval az anizotrópia értékét. A lágyító hőkezelés hatását az anyagra a keménység alapján értékelik, azonban ez nem írja le teljes körűen a hőkezelés eredményességét. Az AA3003-as alumínium-ötvözet fő ötvözője a Mn. A lágyító hőkezelés hatására a Mn kiválik a szilárd oldatból és vegyületet képez. A kiválásoknak a lágyítás során lejátszódó újrakristályosodásra jelentős hatásuk van, mivel csíráképző pontokként működnek. A kutatás célja meghatározni a lágyítási hőkezelés idejének és hőmérsékletének hatását a kristálytani textúrára, valamint a fülesedés értékére. Erről a kutatásról angol nyelvű cikkben már beszámoltunk [1], azonban magyar nyelven nyilvánosan megjelent formában még nem.

Pethő Dániel MSc-kohómérnök, PhD-hallgató a Miskolci Egyetemen, kutatási területe a pormetallurgia.

Hlavács Adrienn MSc-kohómérnök, PhD-hallgató a Miskolci Egyetemen, kutatási területe a hengerlés.

Benke Márton szakmai életrajzát 2018/3. számunkban közzöltük

* A cikk a 2019. évi OTDK pályázaton 3. helyezést ért el.

1. Vizsgálatok

A kísérletek során 7 mm-es melegen hengerelt lemezt hengereltünk le hidegen 1 mm-es vastagságig. Ezt követően lágyító hőkezelést alkalmaztunk a lemezekben három hőmérsékleten öt időtartamig (1. ábra). A hőkezeléseket légterű kemencében hajtottuk végre. A lemezek behelyezésekor a kemence a hőkezelés hőmérsékletére volt

felfűtve, majd a lágyítás után a minták levegőn hűltek.

Bruker D8 Advance diffraktométerrel végeztük el a textúravizsgálatokat, a mérési paraméterek: 40 mA, 40 kV, CoK α , mintaméret 30 × 30 mm. A mérések folyamán az {111}, {200}, {220} síksorozatok Bragg-szögének kimérése után rögzítettük a pólusábrákat. A Tex Eval programmal történt a mért adatok elemzése. A pólusábrák