

Könyöksajtolással előállított ultra-finom-szemcsés alumíniumötvözet mechanikai és mikroszerkezeti tulajdonságainak a vizsgálata

Krállics György* – Fodor Árpád**

Abstract

Investigation of mechanical properties and micro-structure of an aluminium alloy having ultra-fine grains processed by ECAP. The interest in bulk nanostructured materials (NSM), processed by methods of severe plastic deformation (SPD), is justified by their unique physical and mechanical properties. ECAP is one of the most widespread techniques for producing ultra-fine grained materials. The main idea of ECAP is that the metal is deformed through a process of simple shear taking place in the cross sectional area without any geometrical change of the ingot.

In the present report the results of systematic investigations of the influence of SPD on mechanical properties and microstructure of 6082 commercial Al-Mg-Si alloy billets, processed by the ECAP technique was examined by tensile-, upsetting test and TEM, X-ray diffraction peak profile analysis.

High strength and high ductility phenomenon that was found recently in materials after SPD were reached with the route C. Such unusual behaviour of materials in comparison with "classical" tendencies to lost ductility with increased strength needs to be understood therefore to be studied deeper. We revealed this phenomenon on Al 6082 after eight pass at route C. The other observed phenomenon that needs future studies was the induced anisotropy occurred through the upsetting tests of specimens after certain routes of ECAP.

Bevezetés

Az intenzív képlékeny alakítással előállított tömbi nanoszemcsés anyagok kivételes fizikai és mechanikai jellemzőkkel rendelkeznek. Könyöksajtolás az egyik legelterjedtebb technológiai az ilyen anyagok előállítására. A könyöksajtolás mechanikai sémája szerint a fémkristályok a nyírási sík mentén tiszta nyíró igénybevétel hatására deformálódnak a munkadarab keresztmetszetének változatlansága mellett.

A cikk bemutatja a 6082-es Al-Mg-Si kereskedelmi alumínium-ötvözetű próbadarabokon könyöksajtolással megvalósított intenzív képlékeny alakítás hatását az anyag mechanikai és mikroszerkezeti tulajdonságaira felhasználva a szakító-, zömítő, a transzmissziós elektron-mikroszkópi és röntgendiffrakciós csúcspofil vizsgálatok eredményeit.

A nagy szilárdság mellett jelentős mértékű képlékeny alakváltozó-képességet mértünk a C típusú alakítási út esetében. Az ilyen kivételes jelenség pontosabb megértése – összehasonlítva a hagyományos anyagviselkedéssel, ami szerint "magnövelt szilárdság alacsony képlékenységgel párosul" – további vizsgálatokat igényel. Ezt a hatást a C típusú alakítási úttal gyártott 6082-es alumíniumötvözet nyolcadik átsajtolással előállított mintáinál tapasztaltuk. A zömítőkísérletek során az úgynevezett indukált anizotrópiát figyeltünk meg a többször zömített munkadarabon, mely mechanizmusnak tisztázása is még további kísérleteket kíván.

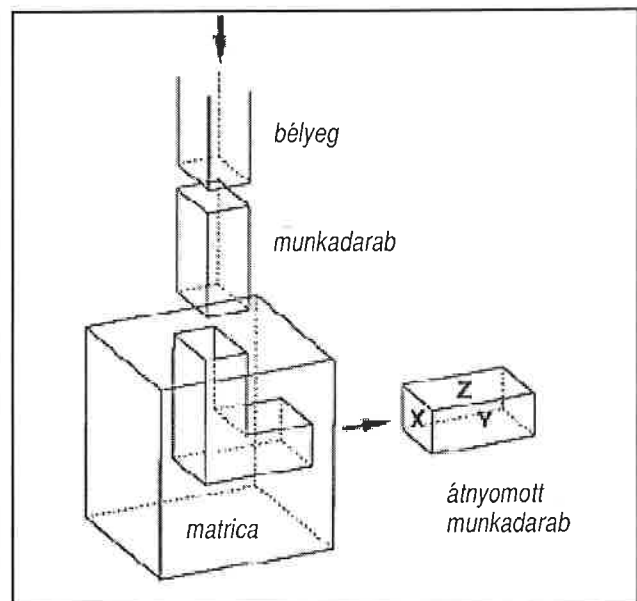
A könyöksajtolási technológia

Az ECAP (Equal Channel Angular Pressing) [1], amelyet 1972-ben

*Egyetemi docens, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Anyagtudomány és Technológia Tanszék H-1111. Budapest, Bertalan L u.7. Tel.: (1) 463 1445, e-mail: krallics.@eik.bme.hu és ** a tanszék Ph.D hallgatója, tel.: (1) 463 1234, e-mail: arpad.fodor@freemail.hu

Belorussziában találtak fel, egy olyan szemcseszerkezet finomító eljárást jelent, amellyel a térfogati kiterjedésű munkadarabok mechanikai tulajdonságait tudatosan, irányítottan lehet megváltoztatni. A gyártási eljárás leírásában igazi nagy áttörést az 1990-es évek hoztak, amikor is a mérnökök figyelme a nanoszemcsés anyagok vizsgálata felé fordult.

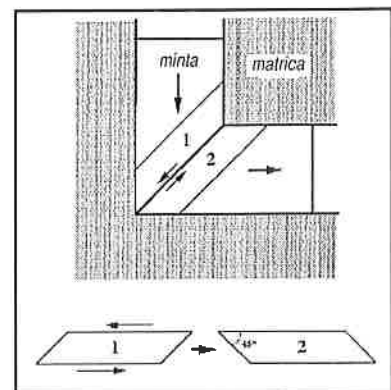
Több olyan gyártási eljárás is létezik, amelyekkel nanoszemcsés szerkezetűvé lehet alakítani anyagokat, pl. a gázkonzenzáció, őrlés golyósmalomban. Ezen eljárások legnagyobb hátránya a gyártás utáni porozitás, illetve szennyező anyagok jelenlétében rejlik, ami az intenzív képlékeny alakításokban nem fordul elő. A könyöksajtolásnak az olyan hagyományos eljárásokkal – hengerlés, sajtolás, húzás, amelyekkel szintén nagy alakváltozást, illetve szemcsefinomodást lehet elérni – szembeni előnye abban mutatkozik meg, hogy a munkadarabok keresztirányú mérete nem fog megváltozni, illetve a feszültségek elosz-



1. ábra. A könyöksajtolás sematikus bemutatása
Fig. 1 Schematic illustration of ECAP

lása valamint az alakváltozás is közel egyenletes lesz a munkadarab teljes térfogatában. A könyöksajtolás lényegét az 1. ábra szemlélteti.

A matricában két, egymást derékszögben metsző csatorna található, amelyek keresztmetszete megegyezik és állandó. A munkadarabot, az egyik csatornából a másikba egy tűske mozgásával juttatjuk. A csatornák találkozásánál

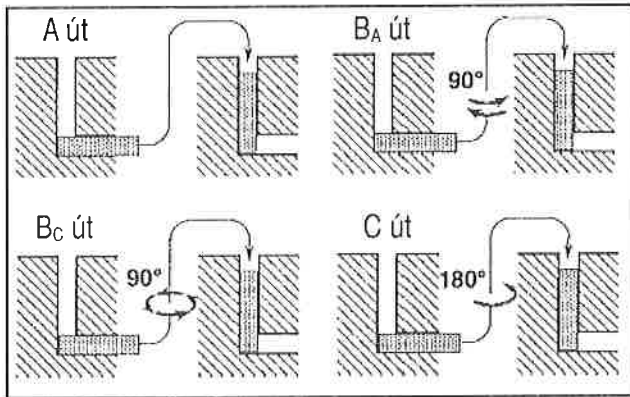


2. ábra. Az elnyíródás elve az 1-es és a 2-es elem között
Fig. 2 The principle of shearing between elements 1 and 2

a munkadarab keresztmetszetének vékony rétegében az anyag egyszerű nyírást szenved [2].

Alakítás közben a szemcsék nemcsak finomodnak, hanem nagy szemcseszögű határokkal fognak egymáshoz kapcsolódni. A szerszámcsatornában kialakuló, közel hidrosztatikus feszültségállapot következtében, az anyag nem fog károsodást, törést szenvedni. A négyszög keresztmetszelű szerszámcsatorna mellett gyakran használnak kör keresztmetszetű csatornát is.

A könnyöksajtolás számos előnye a munkadarabok többszöri átnyomásával, alakításával mutatkozik meg, mely lehetővé teszi a különböző struktúrák kialakítását a nyírási síkok ill. irányok módosítása által [3]. Ezeket a forgatásokat a szakirodalom alakítási utaknak nevezi, amelyeket a 3. ábrán mutatunk be.

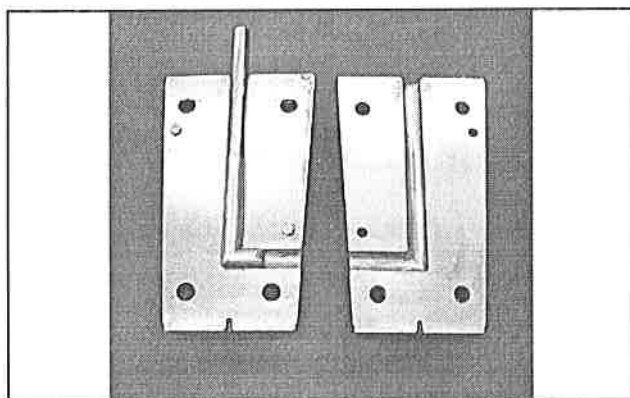


3. ábra. Az alakítási utak megvalósítása
Fig. 3 Versions of ECAP pressings

A mechanikai tulajdonság-változások vizsgálata

Alapvetően AlMgSi1, vagy a kereskedelmi forgalomban az Al 6082 néven kapható alumíniumötvözetet használtuk a kísérleteinkhez. A kiindulási munkadarabok 145 mm hosszú, Ø 15 mm rudak voltak. A darabokat előzetesen hőkezeltük 420°C-on, 40 perc hőntartással. Három különböző úttal – C, B_C, B_A – gyártottunk le 4-szer illetve 8-szor kisajtolt munkadarabokat. Az előzetes vizsgálatok szerint, szemcsefinomodás tekintetében az A út szolgáltatja a legrosszabb eredményt, ezért ezzel az alakítási úttal nem gyártottunk darabokat. Az alakító szerszámot a 4. ábra mutatja, melynek szerszámcsatornájában egy részlegesen alakított munkadarab is látható.

Sajtolás során a matricát a szorítógyűrű fogja össze. Az alakítást szobahőmérsékleten 8 mm/perc sebességgel végeztük. A sajtolás maximális erőszükséglete: 160 kN. A próbatestenek zömítő-, és szakítóvizsgálatokat végeztünk, hogy meghatározzuk a sajtolás hatására kialakuló

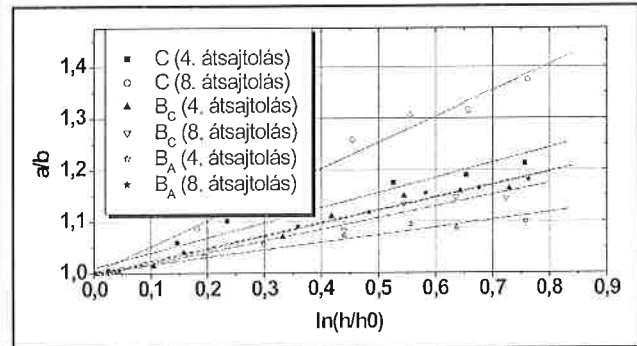


4. ábra. Az alakító szerszám
Fig. 4 Die of ECAP

tulajdonságokat. A vizsgálatokhoz szükséges próbatesteket a munkadarabok hosszanti tengelyének középső szakaszából munkáltuk ki, ahol még az alakváltozás közel egyenletesnek vehető. A vizsgálatokat alakítatlan, egyszer, négyszer, illetve nyolcszor kisajtolt darabokon végeztük el.

Zömítővizsgálat

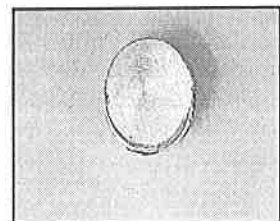
A zömítési kísérlet [5] során a próbadarabok magasságát, a kezdeti kör keresztmetszetből kialakuló ellipszis kis-, és nagytengelyeinek hosszát mértük meg. A tengelyek hányadosát, a fajlagos magasságcsökkenés logaritmusának függvényében ábrázoltuk (5. ábra).



5. ábra Az ellipszis tengelyeinek hányadosa, a fajlagos magasságcsökkenés függvényében linearizálva

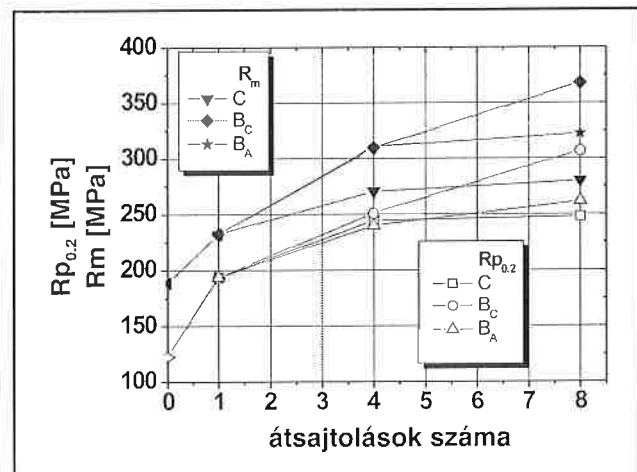
Fig. 5 Diameter ratio vs. compressive strain after via various ECAP passes

A 6. ábra mutatja, hogy a kezdeti kör alakú próbatestek keresztmetszete a zömítő kísérletek során ellipszissé deformálódtak. Az 5. ábra is azt bizonyítja, hogy az alakítási utak igenis hatással vannak az anyag anizotrópiájára. A zömített próbadarabokat úgy munkáltuk ki a munkadarabokból, hogy azok hosszanti tengelye egyazon irányba essen. A kezdeti tengelyszimmetrikus anizotrópia az alakítások során átalakul. Kísérleteinkben mindig az egy irányhoz tartozó anizotrópiikus viselkedést tanulmányoztuk, ami nem nyújt teljes körű információt a próbatest többi irányához tartozó anizotrópiájáról.



6. ábra. A zömítések során kapott próbadarab keresztmetszeti képe

Fig. 6 Deformed state of workpiece after pressing



7. ábra. Szilárdsági mérőszámok függése az alakítás mértékének függvényében

Fig. 7 Yield strength (Rp0.2) and ultimate strength (Rm) via the number of passes for different routes

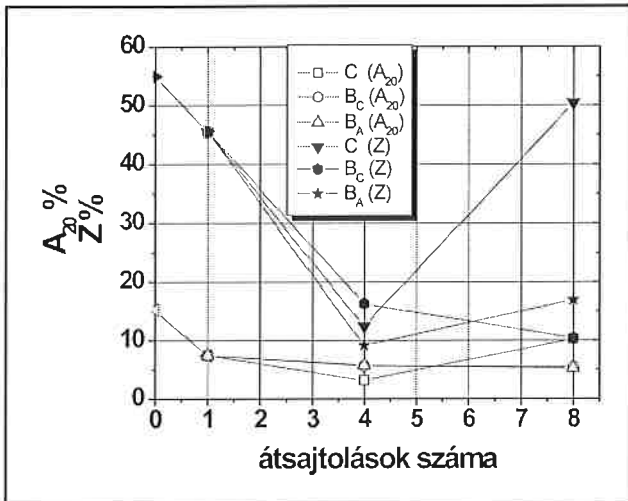
Szakítóvizsgálat

Az előzőekben már említett mintadarabokon Instron TT-DM 100 gépen végeztünk szakítóvizsgálatok [5], és először a szakítószilárdság és a folyáshatár változását ábrázoltuk (7. ábra) a sajtolások számának függvényében. A mérési pontokat egyenesekkel kötöttük össze.

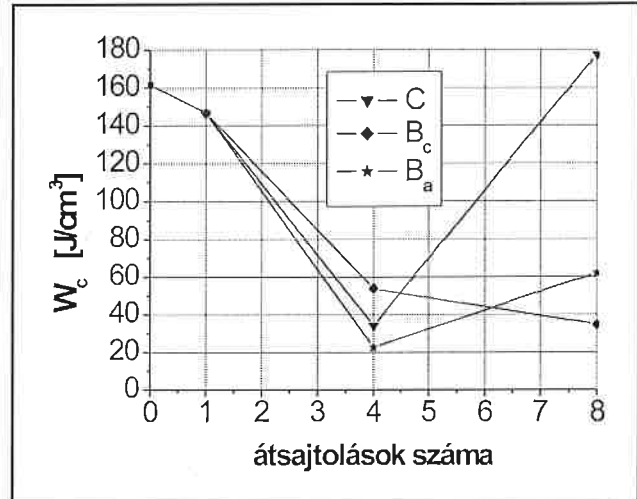
Az alkalmazott alakítási úttól függetlenül a folyáshatár ($R_{p0,2}$) és a szakítószilárdság (R_m) az átnyomások számának növekedésével emelkedik. A maximális szilárdságnövekedést az első átnyomás után mértük. A legnagyobb szilárdságnövekedést a B_C alakítási úttal lehet elérni, a legkisebb növekedést a C esetben tapasztaltuk.

A képlékenységi jellemzők alakulása (8. ábra) ellentétes volt a

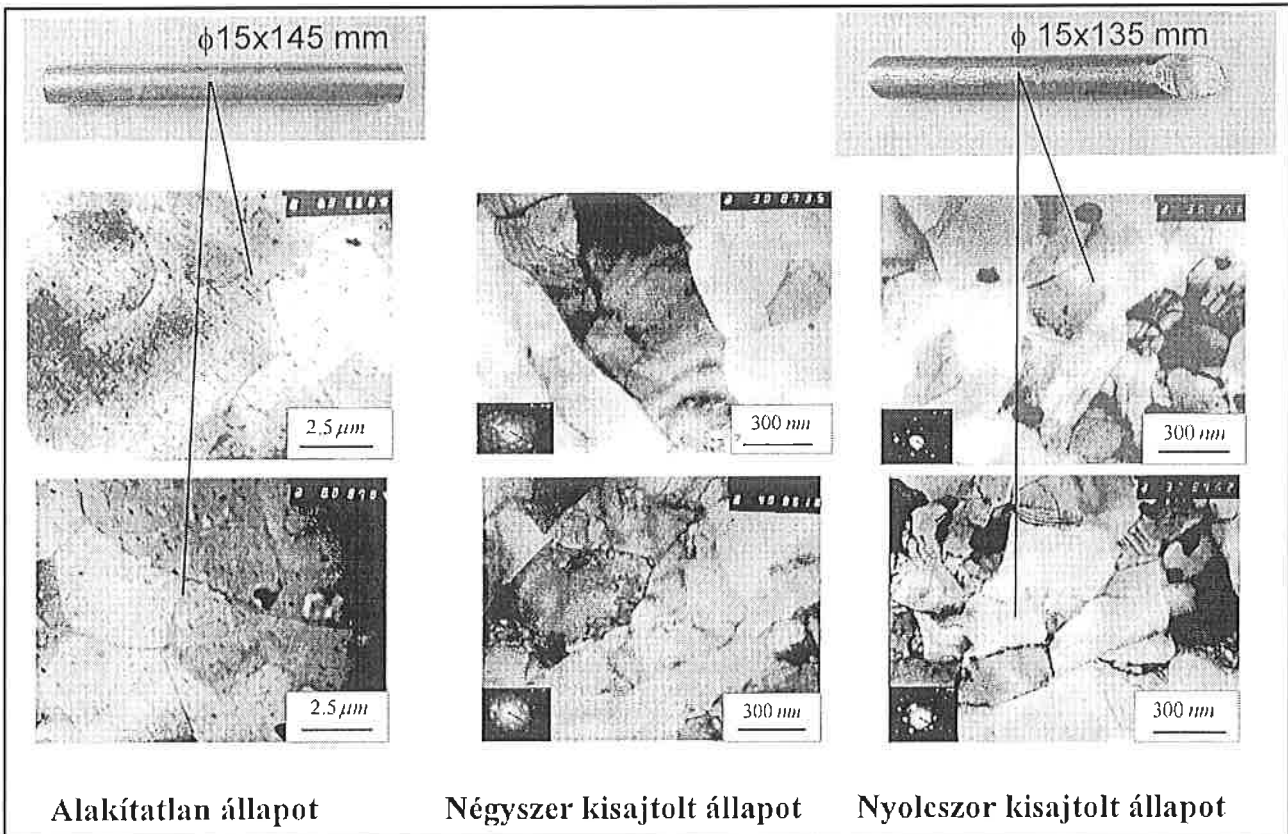
megszokott tendenciával. A fajlagos keresztmetszet-változás jelentősen lecsökkent a negyedik átnyomásra. Nagyon érdekes, hogy két alakítási út esetében – C és B_A – a csökkenést követően emelkedés volt megfigyelhető a további átnyomások hatására. C-nél a keresztmetszet-változás közel a kezdeti értékig nőtt, míg a B_C alakítási úttal legyártott daraboknál – az eddigi ismereteinknek megfelelően – végig a csökkenés volt jellemző. Ugyanezek a megállapítások igazak a fajlagos hosszváltozásra is. A fajlagos törési munka (9. ábra) változásában kísérhető figyelemmel legjobban az anyag szívóságának változása mindegyik alakítási út esetében.



8. ábra. Képlékenységi tulajdonságok függése az alakítás mértékétől
Fig. 8 Elongation (A_{20}) and area reduction (Z) via the number of passes for different routes



9. ábra. A fajlagos törési munka változása az alakítás mértékének függvényében
Fig. 9 Absorbed Specific Energy till fracture via the number of passes for different routes

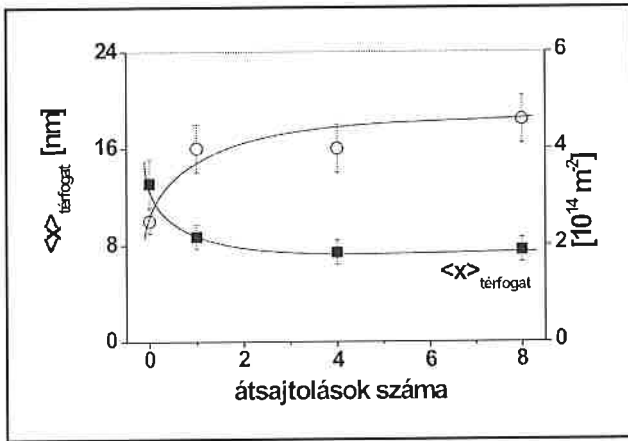


10. ábra. TEM felvételek: a felső sor a kereszt-, az alsó a hosszanti irányú metszetekről
Fig. 10 TEM micrographs: upper row is the cross and lower row is the longitudinal sections of the specimens

A mikroszerkezet változása

A mikroszerkezet megismerése céljából transzmissziós elektronmikroszkopi (TEM) felvételeket készítettünk. A mikroszkópi felvételeken (10. ábra) határozottan nyomon követhető a szemcseszerkezet alakítások közbeni finomodása.

A C alakítási úttal gyártott próbatestek keresztirányú metszetein elvégzett röntgendiffrakciós vonalprofil analízis [4] kimutatta, hogy az első átnyomás után elért átlagos kristallitméret 80 nm és a diszlokáció-sűrűség $3 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$. A röntgendiffrakciós vizsgálatok érzékenyebben kimutatják a szemcsék közötti orientáció eltéréseket, így a szubszemcsék-re jobban fókuszálva kisebb értéket adnak az átlagos szemcseméretre, mint a transzmissziós elektronmikroszkópi felvételekről meghatározott érték. A mikrostruktúra a további alakítások során szerényebb mértékben finomodott, ezzel egy időben növekedett a diszlokáció-sűrűség egészen a negyedik átsajtolásig.



11. ábra. Térfogattal súlyozott szemcseméret és a diszlokáció-sűrűség változása az átnyomások számának függvényében

Fig. 11 The area-weighted mean crystallite size, and the dislocation density as a function of passes

A diszlokáció dimenziómentes deformációs energiaparaméter az alakítatlan, előzetes lágyításnak alávetett darabokra; $M = 4.0 \pm 0.5$ értékre adódott, és a paraméter a nyolcadik kisajtolás után 2.2 ± 0.3 értékre csökkent. Ez azt jelenti, hogy diszlokációs struktúra dipól jellege erősödött az alakítások során. Az eredményeket az 1. táblázat szemlélteti.

1. táblázat. A kiszámított anyagszerkezeti paraméterek változása az átsajtolások számának függvényében

Tabl. 1 Variation of the material characteristics as a function of passes

Sajtolások száma	$\langle x \rangle_{\text{terf}}$ (nm)	ρ , $10^{14} \text{ (m}^{-2}\text{)}$	M
Alakítatlan	131±15	2.3±0.3	4.0±0.5
1. átsajtolás	87±9	4.0±0.5	4.4±0.5
4. átsajtolás	74±9	3.9±0.5	2.2±0.3
8. átsajtolás	76±9	4.6±0.5	2.2±0.3

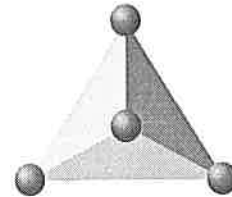
Összefoglalás

Könyöksajtólással, különböző alakítási utakkal gyártottunk próbadarabokat. Megvizsgáltuk, milyen mértékben változtak meg a mechanikai tulajdonságok és a mikrostruktúra az átsajtolások során. A szilárdsági tulajdonságok egyértelmű növekedést tapasztaltuk. Az

anyag képlékenysége kezdetben csökkenést mutatott, majd a negyedik átnyomástól kezdődően igen jelentős mértékben növekedésnek indult a C alakítási út esetében. A hagyományos képlékeny alakítási technológiáktól eltérően, a szilárdság és a képlékenység egyidejű emelkedését lehet a könyöksajtólási eljárás segítségével megvalósítani, amely ellentmondásban áll az eddigi ismereteinkkel. A jelenség tisztázása további vizsgálatokat igényel. Elsődlegesen a mikroszerkezet megismerésére irányuló kutatásokat kell tovább bővíteni, ugyanis a különös jelenség magyarázata a szemcseszerkezet mikroszkópi szintű megváltozásaiban keresendő. A szemcseszerkezet igen nagymértékben finomodott az első átsajtolás közben, további alakításoknál a finomodás már csak kis mértékű volt, míg a negyedik lépés után megállt. A szemcséfinomodással együtt a diszlokáció-sűrűség változása is egyértelműen növekvő tendenciát mutatott egészen a negyedik átsajtolásig, majd ezt követve kisebb mértékű növekedést mértünk.

Irodalom

[1] V. M. Segal: 'Materials processing by simple shear', Materials Science and Engineering A197 (1995) 157-164
 [2] V. M. Segal: 'Equal channel angular extrusion: from macromechanics to structure formation', Materials Science and Engineering A271 (1999) 322-333
 [3] M. Furukawa, Z. Horita, M. Nemoto, T. G. Langdon: 'Review: Processing of metals by equal-channel angular pressing', Journal of Materials Science 36 (2001) 2835-2843
 [4] G. Ribárik, T. Ungár, J. Gubicza: 'MWP-fit: a program for multiple whole-profile fitting of diffraction peak profiles by ab initio theoretical functions', Journal of Applied Crystallography 34 (2001) 669-676
 [5] Fodor Árpád: 'Ultra-finomszemcsés alumíniumötvözet gyártása és tulajdonságainak a vizsgálata', Tudományos Diákköri Konferencia, Anyagtudományi Szekció, Budapest, 2003



**V. Országos
Anyagtudományi,
Anyagvizsgálati és
Anyaginformatikai
Konferencia és Kiállítás**

Balatonfüred, 2005. október 9-11.

Bővebb információ és regisztráció
a www.oaaakk.hu honlapon.