



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Doktori Tézisfüzetei

Írta:

Fodor Árpád
okleveles gépészmérnök

AlMgSi1 ötvözet intenzív képlékenyalakítása

című témakörből,

amellyel PhD fokozat elnyerésére pályázik

**Budapest
2004 - 2008**

- [5] Gyorgy Krallics, Arpad Fodor, Jenő Gubicza, Zsolt Fogarassy: *Mechanical and microstructural characterisation of Al6082 ultrafine-grained alloy manufactured by ECAP combined with traditional forming processes*, Materials Science Forum Vols. 589 (2008) pp. 111-116
- [6] Sandip Ghosh Chowdhury, Amit Mondal, Jenő Gubicza, Gyorgy Krallics, Arpad Fodor: *Evolution of microstructure and texture in an ultrafine-grained Al6082 alloy during severe plastic deformation*, Materials Science and Engineering A, Volume 490 Issues 1-2 (2008) pp. 335-342

Lektorált konferenciakiadványban idegen nyelven megjelent cikkek

- [7] Gyorgy Krallics, Arpad Fodor, Ahmed Agha: *Anisotropic mechanical properties of an ultrafine-grained aluminium alloy*, Ultrafine Grained Materials IV. TMS 2006, San Antonio, USA
- [8] Gyorgy Krallics, Arpad Fodor: *Manufacturing of ultrafine-grained sheet*, International Deep-drawing Research Group International Conference (2007) pp. 563-570

Magyar nyelvű folyóiratcikkek

- [9] Fodor Árpád, Krállics György: *Intenzív képlékenyalakítással előállított ultrafinomszemcsés anyagok*, Anyagok Világa, V. évfolyam 1. szám (2004)
- [10] Krállics György, Fodor Árpád: *Könyvsajtóval előállított ultrafinomszemcsés alumíniumötvözet mechanikai és mikroszerkezeti tulajdonságainak a vizsgálata*, Anyagvizsgálók Lapja 15. évfolyam (2005/1) pp. 21-24
- [11] Szirmai Georgina, Hegman Norbert, Krállics György, Fodor Árpád, Törköly Tamás: *Intenzív képlékenyalakítással előállított AlMgSi alapú ötvözetek szerkezeti finomodásának vizsgálata*, IX. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, pp. 140-144

Az eredmények alkalmazása

Eredményeim segítséget nyújtanak az AlMgSi1 anyagú rudak könyöksajtólási technológiájának megválasztásához: melyik alakítási úttal, hányszoros könyöksajtólást lehet alkalmazni egy adott mechanikai állapot elérésére érdekében. Technológusok számára további támpontot adhat, hogy a hagyományos képlékenyalakító műveletekkel a könyöksajtolt munkadarabok milyen mértékben alakíthatók tovább, és ezek a műveletek mekkora szilárdságnövekedést, illetve képlékenységcsökkenést okoznak. Lágyított állapotú AlMgSi1 anyagú rudak könyöksajtolásának végeselemes szimulációjához, valamint a könyöksajtolt darabok további alakítási technológiájának megtervezéséhez nagy segítséget nyújthat a többszörös könyöksajtólással gyártott anyag folyásgörbéje.

Szakirodalmi tevékenység

Idegen nyelvű lektorált cikkek

- [1] György Krállics, Mátyás Horváth, Árpád Fodor: *Influence of ECAP routes on mechanical properties of a nanocrystalline aluminium alloy*, Periodica Polytechnica ser. Mech. Eng. Vol. 48, No. 2, (2004) pp. 145-150
- [2] György Krállics, Dmitry Malgin, Arpad Fodor: *Experimental Investigations of the Al6082 Alloy Subjected to Equal-Channel Angular Pressing*, Materials Science Forum Vols. 473-474 (2005) pp. 129-134
- [3] Vladimir V. Latysh, György Krállics, Igor Alexandrov, Arpad Fodor: *Application of bulk nanostructured materials in medicine*, Current Applied Physics Volume 6, Issue 2, (February 2006), pp. 262-266
- [4] György Krállics, Arpad Fodor: *Determining the anisotropy coefficients of an ultrafine-grained Al6082 alloy subjected to ECAP*, Materials Science Forum Vols. 537-538 (2007) pp. 215-221

Bevezetés

Az ultrafinomszemcsés anyagok az utóbbi évtizedben az anyagtudománnyal foglalkozó kutatók érdeklődésének homlokterébe kerültek. A tömbi anyagok rendkívüli kis szemcseméretét az úgynevezett intenzív képlékenyalakítással (SPD) lehet elérni. Az eljárás lényege, hogy az anyag szerkezetének transzformációja alapvetően nyíró alakváltozás felhasználásával valósul meg. A létrejövő szemcseszerkezet az alakítás mértékétől függően – az átlagos szemcsemérettel jellemezve –, lehet ultrafinomszemcsés (~100-1000 nm) vagy nanoszemcsés (<100 nm).

Az egyik legismertebb intenzív képlékenyalakítási módszer a könyöksajtolás, amelyet az angolszász szakirodalom Equal Channel Angular Pressing-nek (ECAP) nevez. A nagyon kis szemcseméretű anyag összes tulajdonsága lényegesen megváltozik a hagyományos szemcseszerkezetűekhez képest, és ezzel a mérnöki alkalmazások új területei nyílnak meg. Az ultrafinomszemcsés anyagok közös jellemzői a nagy szilárdság, a viszonylag jelentős szívósság, a nagy kifáradási határ, a szuperképlékeny alakíthatóság és a forgácsolás utáni finom felület. Néhány anyagnál, például a réznél és a titánnál egy paradox jelenséget figyeltek meg. Nevezetesen, hogy az intenzív képlékenyalakítás hatására a szilárdság növekedésével párhuzamosan az anyag képlékenysége is növekszik.

Napjainkban az intenzív képlékenyalakítások területén folyó kutatások nemzetközileg is kiemelt jelentőségűek. A tömbi ultrafinomszemcsés anyagok felhasználási lehetőségei közül elsősorban az orvostechikai alkalmazásokat, a titánból készült kitűnő biokompatibilitású csontcsavarokat, csontlemezeket és protéziseket emelem ki. Új perspektívák nyílhatnak meg a repülőtechnikai, informatikai, gépészeti és villamosipari alkalmazásuk terén is.

A kutatás előzményei és célja

A doktori értekezés a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Anyagtudomány és Technológia Tanszékén futó kutatási téma része, amely a könyöksajtolás technológiájának, és az így gyártott munkadarabok tulajdonságainak tanulmányozását tűzte ki célul.

A doktori értekezés célja a könyöksajtolások, és az azt követő hagyományos alakítások anyagszerkezetre és a mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatásának feltárása AlMgSi1 anyagú munkadarabokon, valamint kontinuummechanikai számítások alkalmazása a mechanikai anizotrópia és a különleges szemcseszerkezet kialakulási feltételeinek leírására.

Az értekezés négy fő egységre tagolódik, és a tudományos kutatás eszköztárának felhasználásával az alábbi kérdésekre keresi a választ:

- A különböző alakítási utak mekkora és milyen mechanikai és mikroszerkezeti változásokat eredményeznek az előzetesen lágyított állapotú AlMgSi1 ötvözet könyöksajtolásánál? Az egyenlőtlenül alakváltozott munkadarabok melyik részéből célszerű az anyagvizsgálatokhoz szükséges próbatesteket kimunkálni?
- Lehet-e a hagyományos alakításokkal előzetesen könyöksajtoltt munkadarabokat károsodásmentesen tovább alakítani? Ha igen, akkor mekkora szilárdságnövekedés érhető el? Milyen mértékben csökken az alakított anyag képlékenysége? Egy adott mechanikai tulajdonság elérése érdekében melyik úttal és hányszorosan könyöksajtoltt anyagot érdemes tovább alakítani?
- Létezik-e olyan mérőszám, amellyel analitikusan le lehet írni az intenzív képlékenyalakítás során kialakuló speciális mikroszerkezet kialakulásának feltételeit? Lehet-e a mérőszámmal különbséget tenni a hagyományos és az intenzív képlékenyalakítások között?
- Lehetséges-e a könyöksajtolás során kapott erősen texturált anyag mechanikai anizotrópiájának leírása az anyagtörvénnyel? Kiszámíthatóak-e az eltérő alakítási utakkal többszörösen könyöksajtoltt anyagok folyásgörbéi?

következik be az ötvözet lágyított állapotához képest. A további átsajtolások során a mikroszerkezeti paraméterek közelítőleg állandó nagyságúak maradnak, a statikus mechanikai tulajdonságok azonban jelentősen megváltoznak.

2. Szobahőmérsékleten "B_c" alakítási úttal kétszeres és négyszeres könyöksajtolással gyártott AlMgSi1 anyagú próbák további alakításával (kaliberhengerléssel vagy körkóvácsolással), az ultrafinomszemcsés mikroszerkezet megtartásával és a képlékenység számottevő csökkenése nélkül, még érdemi (15-30%) folyáshatár és szakítószilárdság növekedést lehet elérni.
A "B_c" úttal többszörösen könyöksajtoltt munkadarabok a jelentősen megnövekedett szilárdságuk ellenére sem veszítették el alakíthatóságukat a szobahőmérsékleten végrehajtott kétszeres átmérőviszonyú körkóvácsolás, vagy kaliberhengerlés során.
3. A dolgozatban bevezetett monotonitás paraméter alkalmas annak minősítésére, hogy adott képlékenyalakító eljárással lehet-e ultrafinomszemcsés anyagot gyártani. Az intenzív képlékenyalakító eljárások mechanikai elemzéséből megállapítottam, hogy az ultrafinomszemcsés anyagok előállításakor az alakváltozás nem-monoton. Egytengelyű húzás vagy nyomás, redukálás vagy előrefolytatás esetén a paraméter értéke nulla, vagy ahhoz nagyon közeli szám. Az alapvetően nyíró alakváltozásokkal jellemezhető alakítási folyamatoknál az alakváltozás mértékétől függően a paraméter értéke jelentősen eltér nullától.
4. Bebizonyítottam, hogy a lemezanyagokra kidolgozott elméletek közül a Weilong Hu anizotróp anyagtörvénye terjeszthető ki a tömbi anyagok leírására. Az anyagtörvény és az anizotrópia főirányibaiban elvégzett egytengelyű zömítési kísérletek értelmezésével leírtam az AlMgSi1 ötvözetből könyöksajtolással "C" és "B_c" alakítási úttal gyártott ultrafinomszemcsés anyag mechanikai anizotrópiáját.

matematikai rendszert használtam. Az intenzív képlékenyalakító eljárások mechanikai elemzéséből megállapítottam, hogy az ultrafinomszemcsés anyagok előállításakor az alakváltozás nem-monoton. Interpretációm alapján definiáltam, hogy ha a monotonitás paraméter zérus, tehát az alakítási folyamat monoton, akkor az alakított anyag szemcseszerkezetében nem következik be jelentős változás, vagyis a speciális szemcseszerkezet képződésének feltételei nem adóttak.

Könyöksajtólással gyártott munkadarabokból hengeres próbatesteket munkáltam ki. Az egytengelyű zömítések során a próbatestek keresztmetszete ellipszissé deformálódott. Felismertem, hogy az anyag ortotróp anizotrópiát mutat, azaz van három egymásra merőleges, anizotróp viselkedés szempontjából kitüntetett főirány. Megvizsgáltam a lemezanyagokra kidolgozott anizotrópia elméleteket, hogy alkalmasak-e a könyöksajtoló anyag anizotrópiájának leírására. Azt találtam, hogy a Weilong Hu által kidolgozott folyási feltétel matematikailag egyszerű kezelhetősége mellett kilégítően leírja az anyag anizotrópiáját. Az elméletet leíró egyenlet ismeretlenjeit (az anizotrópia paramétereit) az anizotrópia három főirányában elvégzett zömítőkísérletekre felírt egyenletrendszerek megoldásából nyertem. További összefüggéseket felhasználva meghatároztam az anizotróp anyagra jellemző egyenértékű feszültség-egyenértékű alakváltozás görbét, a folyásgörbét.

Új tudományos eredmények

1. Lágymított állapotú AlMgSi1 ötvözetben "B_c" alakítási úttal elvégzett nyolcszoros könyöksajtólással megközelítőleg 250% folyáshatár és 150% szakítászilárdság növekedés érhető el. Ez a szilárdságnövekedés megközelíti az ötvözetben mesterséges öregítéssel elérhető szilárdságot. Megállapítható, hogy nyolcszoros könyöksajtólásra a "B_c" alakítási út a "C" útnál másfélszer nagyobb szilárdságnövekedést eredményez, de az alakítási utak hatására bekövetkező képlékenység csökkenés közel azonos nagyságú. Az első átsajtolás hatására négyszeres szemcsefinomodás és 38-szoros diszlokációsűrűség növekedés

A vizsgált anyagok és vizsgálati módszerek

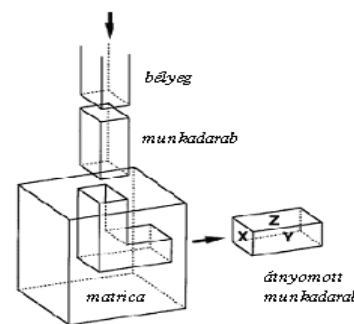
Kutatásaimhoz az iparban széles körben elterjedt, mesterségesen öregíthető AlMgSi1 alumíniumötvözetet használtam. Az ötvözet kitűnő mechanikai tulajdonságokkal és korrózióállósággal rendelkezik, ezenfelül könnyű forgácsolhatósága, hegeszthetősége, hidegalakíthatósága és mélyhúzóhatósága is nagyon előnyös a szerteágazó ipari felhasználás szempontjából. Az ötvözet vegyi összetétele az 1. táblázatban olvasható. Az alumínium mátrixban főként Mg₂Si és Mn₁₂Si₇Al₅ kiválások találhatók.

Al	Mg	Si	Mn	Cr	Ti	Cu	Fe	Zn
95,2-98,3%	0,6-1,2%	0,7-1,3%	0,4-1%	max. 0,25%	max. 0,1%	max. 0,1%	max. 0,5%	max. 0,2%

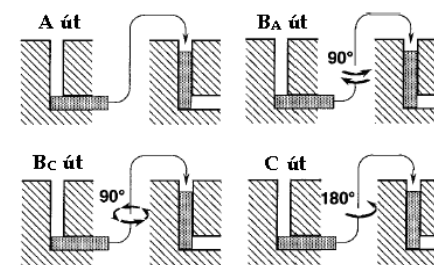
1. táblázat. Az AlMgSi1 ötvözet vegyi összetétele tömegszázalékban

A kísérleteimet alapvetően könyöksajtólással végeztem. A könyöksajtoló szerszámban két, egymást derékszögben metsző csatorna van, amelyek keresztmetszete megegyezik és állandó. A munkarab az egyik csatornából a másikba egy alakítóbélyeg – tűske – mozgatásával jut át (1. ábra). A csatornák találkozásánál a munkadarab keresztmetszetének vékony rétegében egyszerű nyírás lép fel.

A könyöksajtolás számos előnye a munkadarabok többszöri alakításával mutatkozik meg, amely a nyírési síkok változtatásával különböző szemcseszerkezetek kialakítását teszi lehetővé.



1. ábra. Szerszámgeometria



2. ábra. Az alakítási utak értelmezése

A nyírási síkok helyzetének és irányának változtatását a munkadarab hosszanti tengelye körüli – az átsajtolások között elvégzett – elforgatásával lehet elérni, amivel alakítási utakat valósítunk meg (2. ábra).

Az AlMgSi1 anyagú, lágyított állapotú, 16 mm átmérőjű rúdanyagokat könyöksajtólással szobahőmérsékleten B_c és C alakítási utakkal alakítottam. Ezen utak megvalósítása az átsajtolások között mindig azonos irányú forgatással történt, az előbbinél 90°-kal, az utóbbinál 180°-kal. Az ötvözet lágyító hőkezelésének adatai: 420 °C-on 1 óra időtartamú hőtartás, lehűtés szabad levegőn.

A szakítópróbatestek kimunkálási helyeit végeelem analízissel, többszöri átsajtolást szimulálva határoztam meg a Qfrom 3D végeelemes rendszerben. A szilárdsági analízis során a munkadarabok hossz- és keresztirányú metszetein vizsgáltam az átsajtolások hatását az alakváltozéloszlás homogenitására. MSC Superform programban elvégzett hőtani szimulációkkal tanulmányoztam, hogy a könyöksajtolás során az alakítási és a súrlódási munka hővé alakuló része mekkora hőmérséklet növekedést okoz a munkadarabban.

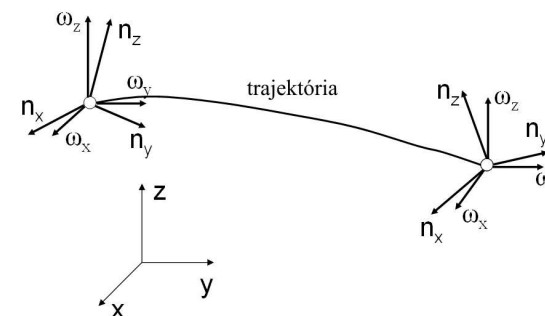
Mindkét úttal, egyszeri átnyomástól a nyolcszori átnyomásig bezárólag minden lépéshez gyártottam munkadarabokat. A szakítóvizsgálatot arányos próbatesteken MTS 810-es típusú szakítógépen 1,8 mm/min szakítósebességgel végeztem, amelyhez 1,2 mm méréstartományú finomnyúlásmérőt és 50 kN-os erőmérő cellát alkalmaztam. Méréseim során a gépészeti anyagvizsgálatban gyakran használt mérőszámokat határozottam meg: a szakítószilárdságot, az egyezményes folyáshatárt, a kontrakciót, a szakadási nyúlást és a fajlagos törési munkát. Finomnyúlásmérőt az egyezményes folyáshatár pontosabb mérése érdekében használtam.

A mikroszerkezeti vizsgálatokat az ELTE Anyagfizikai Tanszékének segítségével végeztem. Vizsgálataimhoz a röntgendiffrakciós vonalprofil analízis módszerét, valamint transzmissziós elektronmikroszkópi méréseket használtam fel. A csúcsprofilokat a minták keresztirányú metszetein nagyfelbontású diffraktométeren (Nonius, FR 591) vizsgáltam, ennek folyamán meghatároztam az átlagos szemcseméretet és a diszlokációsűrűséget. Transzmissziós elektronmikroszkópi felvételek

készültek egy 200 kV gyorsítófeszültségű Jeol 200CX típusú berendezésen annak érdekében, hogy vizsgálhatók legyenek a kiválások és a minták szemcseszerkezete.

Az ipari gyárhatóságot szem előtt tartva nagyon fontos, hogy az előgyártmányból megfelelő készterméket lehessen gyártani. A könyöksajtólással gyártott rúdszerű ötvözetekből bizonyos esetekben igen nehezen lehet készterméket gazdaságosan kimunkálni, ezért elkerülhetetlen az előgyártmány további alakítása. Ez legegyszerűbben hagyományos alakító eljárásokkal történhet, például hengerléssel, redukálással, húzással, vagy körkovácsolással. Továbbiakban megvizsgáltam, hogy a körkovácsolás és a kaliberhengerlés mekkora változást okoz az előzetesen könyöksajtolásnak kitett AlMgSi1 anyagú darabok statikus mechanikai tulajdonságaiban.

Felismertem, hogy a Szmirnov-Aljajev által definiált monotonitás fogalom értelmezésével jellemezhető a képlékenyalakító technológiák szemcseszerkezetre gyakorolt hatása. A szerző monoton alakváltozáson olyan folyamatot értett, amelyben az alakváltozási sebességtenzor főirányai ugyanazon anyagi szálakkal esnek egybe a teljes folyamat alatt, és a Lode-paraméter konstans (3. ábra).



3. ábra. Az alakváltozási sebességtenzor főirányainak (n_x, n_y, n_z) és az anyagi szálak elfordulását reprezentáló rotációs vektorok ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$) trajektória menti elmozdulásai Descartes-féle koordinátarendszerben

Bevezettem a monotonitás paramétert, amelyet alapvető kontinuummechanikai mennyiségekkel határoztam meg hagyományos, illetve intenzív képlékenyalakító technológiákra. A számításokhoz a Maple