

# **Intenzív képlékeny alakítással előállított ultra-finomszemcsés anyagok**

## **Krállics György**

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

## **Fodor Árpád**

Egyetemi hallgató, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Anyagtudomány és Technológia  
Tanszék

H-1111. Budapest, Bertalan L u.7. Tel: (1) 463 1234, e-mail: arpad.fodor@freemail.hu

## **1. Bevezetés**

A nanokristályos anyagok az utóbbi évtizedben az anyagtudománnyal foglalkozó kutatók érdeklődésének homlokterébe kerültek. A nagyon kis szemcsemérettel rendelkező anyag összes tulajdonsága lényegesen megváltozik a hagyományos szemcseszerkezetűekhez képest és ezzel a mérnöki alkalmazások új területei nyílnak meg.

A nanokristályos anyagok előállításának egyik módszere az intenzív képlékeny alakítás (IKA), amelynél alapvetően nyíró alakváltozások felhasználásával valósul meg az anyag szerkezetének transzformációja a kiinduló durvaszemcsés állapotból az alakítási folyamat előrehaladásával ultra-finomszemcséjűvé. Az IKA leggyakrabban alkalmazott módszerét a könyöksajtoltást – angol rövidítése ECAP – használtuk a kísérleteink elvégzéséhez..

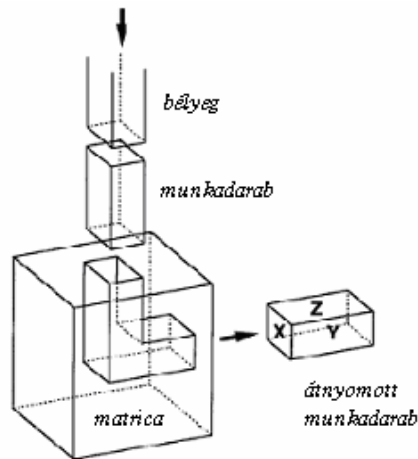
Az eljárás lényege abban áll, hogy az általunk vizsgált alumíniumötvözet (AlMgSi1) tömör rudak, egy olyan, egymásra merőleges csatornán kerülnek átnyomásra, amelyek metsződésénél a fémkristályok a nyírási sík mentén tiszta nyíró igénybevétel hatására elcsúsznak, így a szemcsék nano nagyságrendűre finomodnak. A szemcseméret nagysága szoros összefüggésben áll az anyag folyáshatárával, szilárdságával és alakváltozási képességével. A folyamat során nagymértékű szilárdságnövekedést lehet elérni – mintegy 2-3 szorost – és szabályozni lehet, olyan mechanikai tulajdonságokat is, mint például az anizotrópia.

## **2. A könyöksajtoltási technológia ismertetése**

Az ECAP (Equal Channel Angular Pressing) [1], amelyet 1972-ben Belorussziában találtak fel, egy olyan szemcseszerkezet finomító eljárást jelent, amellyel a térfogati kiterjedésű munkadarabok mechanikai tulajdonságait tudatosan, irányítottan lehet megváltoztatni. A gyártási eljárás leírásában ill. tanulmányozásában 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 nanoszemcse szerkezetűvé lehet alakítani anyagokat, pl. a gázkondenzáció, őrlés golyósmalomban. Ezen eljárások legnagyobb hátránya, a gyártás utáni porozitás ill. szennyező anyagok jelenlétében rejlik, ami az intenzív képlékeny alakításokban nem fordul elő. Az olyan hagyományos eljárásokkal – hengerlés, sajtoltás, húzás, amelyekkel szintén nagy alakváltozást ill. szemcsefinomodást lehet elérni – szembeni előnye abban mutatkozik meg, hogy a munkadarabok keresztirányú mérete nem fog megváltozni, ill. a feszültségek eloszlása valamint, az alakváltozás is közel egyenletes lesz a munkadarab teljes térfogatában.

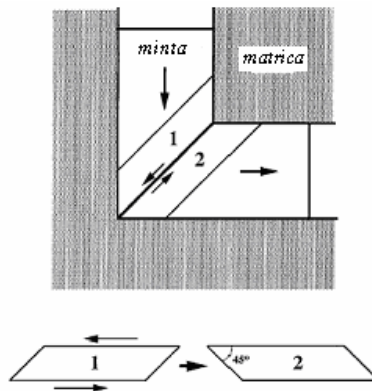
A könyöksajtoltás lényegét a következő ábra szemlélteti:



**1 ábra** A könyöksajtolás sematikus bemutatása

A matricában két, egymást derékszögben metsző csatorna található, amelyek keresztmetszete megegyezik és állandó. A munkadarabot, az egyik csatornából a másikba egy belyeg mozgatásával juttatjuk.

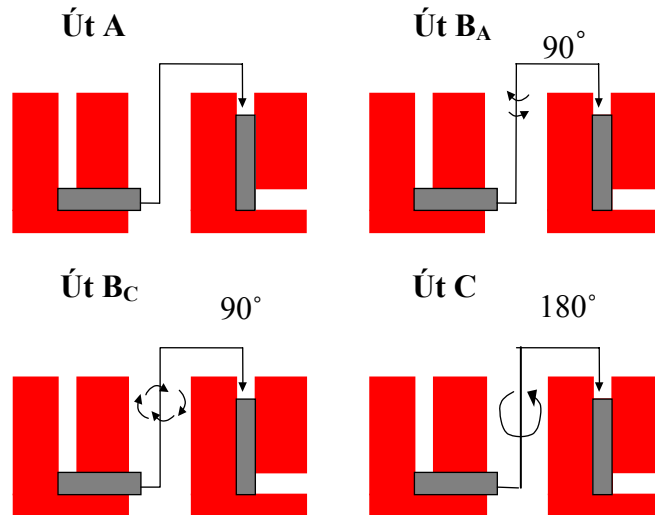
A csatornák találkozásánál a munkadarab keresztmetszetének vékony rétegében az anyag egyszerű nyírást szenved [2].



**2. ábra** Az elnyíródás elve az 1-es és a 2-es elem között

Alakítás közben a szemcsék nemcsak finomodnak, hanem nagy szemcseszögű határokkal fognak egymáshoz kapcsolódni. A szerszámcsatornában kialakuló, közel hidrosztatikus feszültség állapot következtében, az anyag nem fog károsodást, törést szenvedni.

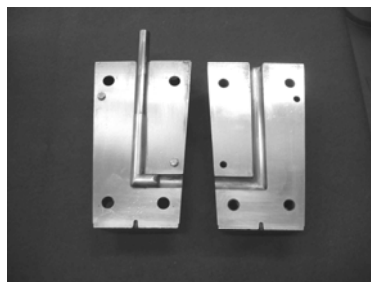
A könyöksajtolás számos előnye a munkadarabok többszöri átnyomásával, alakításával mutatkozik meg, mely lehetővé teszi a különböző struktúrák kialakítását a nyírási síkok ill. irányok modifikálása által [3]. Ezeket a forgatásokat – alakítási utakat – a szakirodalom 'route'-oknak nevezi, amelyek az alábbi ábrán kerül bemutatásra:



3. ábra Az alakítási utak megvalósítása

### 3. A mechanikai tulajdonságjellemzők megváltozásának vizsgálata

Alapvetően AlMgSi1, vagy a kereskedelmi forgalomban az Al 6082 néven kapható alumíniumötvözetet használtuk a kísérleteinkhez. A kiindulási munkadarabok 145 mm hosszú,  $\varnothing 15$  mm rudak voltak. A darabokat előzetesen hőkezeltük  $420^{\circ}\text{C}$ -on, 40 percen keresztül. Három különböző úttal – C,  $B_C$ ,  $B_A$  – gyártottunk le 4-szer illetve 8-szor kisajtolt munkadarabokat. A szemcsefinomodás tekintetében az A út szolgáltatja a legrosszabb eredményt, ezért ezzel az alakítási úttal nem gyártottunk darabokat. Az alakító berendezés az alábbi ábra mutatja. A baloldali ábrán a két félből álló szerszámcsatornájában egy részlegesen alakított munkadarab látható.



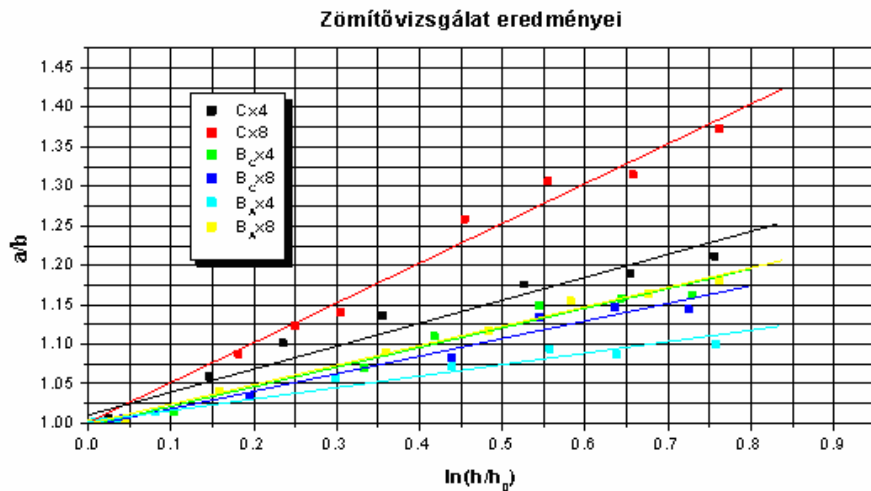
4. ábra Az alakító berendezés és a szerszám

A sajtolás során a matricát egy szorítógyűrű fogja össze. Az alakítást szobahőmérsékleten történt 8 mm/perc sebességgel. A sajtolás maximális erőszükséglete nem érte el a 160 000 N-t.

A próbatesteken zömítő-, és szakítóvizsgálatokat végeztünk, hogy meghatározzuk a sajtolások közben kialakuló tulajdonságjellemzőket. A vizsgálatokhoz szükséges szabványos méretű próbatesteket a munkadarabok hosszanti tengelyének középső szakaszából munkáltuk ki, ahol még az alakváltozás közel egyenletesnek vehető. A vizsgálatokat alakítatlan, egyszer-, négyszer illetve nyolcszor kisajtolat darabokon végeztük el.

### 3.1. Zömítővizsgálat

A zömítési kísérlet [5] során a próbadarabok magasságát, az ellipszis kis-, és nagy tengelyeinek hosszát mértük meg. A tengelyek hányadosát, a fajlagos magasságcsökkenés logaritmikus függvényében ábrázoltuk (1. diagram).



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



6. ábra A zömítések során kapott próbadarabok 'körte jelleű alakja

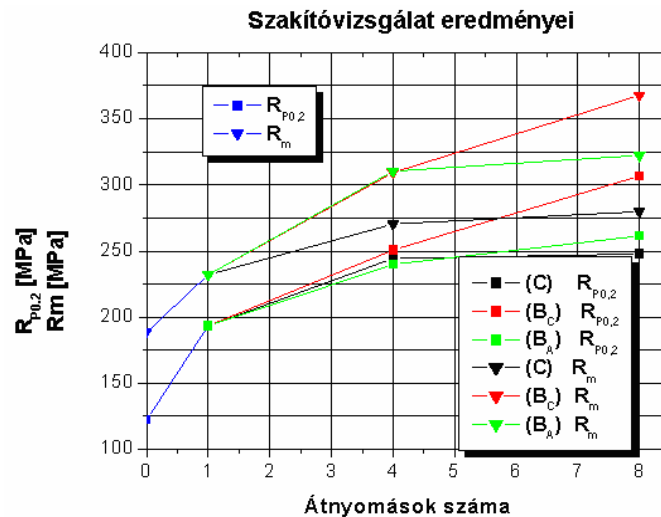
A 6. ábra mutatja, hogy a kezdeti kör alakú próbatetek a zömítő kísérletek során ellipszis formájúvá deformálódtak. Az 5. ábra is azt bizonyítja, hogy az alakítási utak hatással vannak az anyag anizotrópiájára. A zömítő próbadarabokat ugyanazon orientációban lettek kimunkálva a munkadarabokból, úgy, hogy azok hosszanti tengelye egyazon irányba esett. A kezdeti tengelyszimmetrikus anizotrópia az alakítások során átalakult. A kísérleteinkben, tehát, mindig egy irányhoz tartozó anizotrópikus viselkedést tanulmányoztuk, ami nem nyújt teljes körű információt az anyagszerkezet többi irányhoz tartozó anizotrópiájára vonatkozóan.

### 3.2. Szakítóvizsgálat

A szakítóvizsgálatok [5] után először a szakítószilárdság és a folyáshatár változását ábrázoltuk (7. ábra) a sajtolások számának függvényében. A fentiekben már említésre került darabokon végeztük a szakítóvizsgálatokat, így a mérési pontokat egyenesekkel kötöttük össze a görbék folytonossága végett.

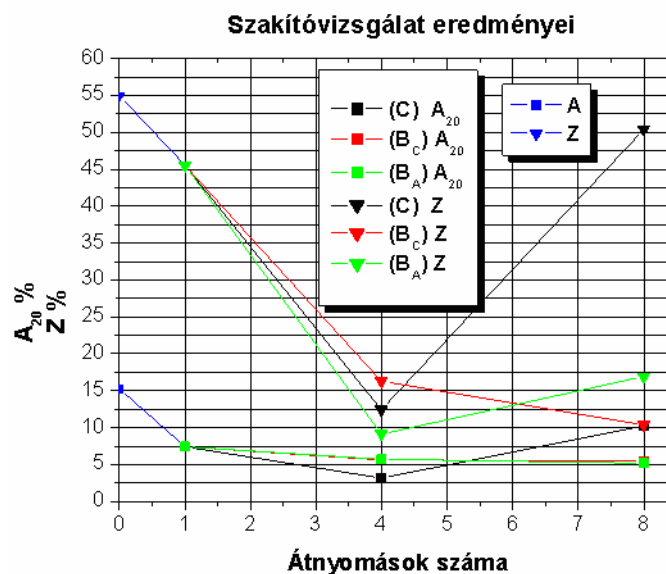
A folyáshatár ( $R_{p0,2}$ ) és a szakítószilárdság ( $R_m$ ) az átnyomások számának

növekedésével emelkedtek minden út esetében. A maximális szilárdságnövekedést az átnyomások számának viszonyában az első alakítással kaptuk. Legnagyobb szilárdságnövekedést a  $B_C$  úttal lehet elérni, a legkisebb növekedést a  $C$  esetben tapasztaltuk.

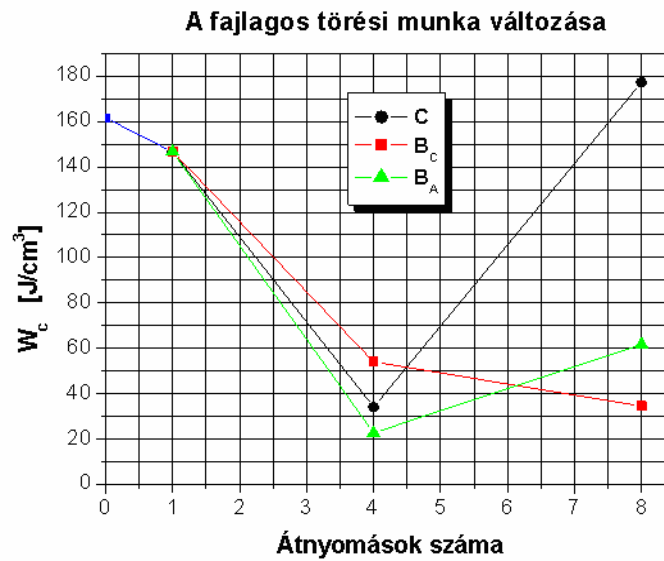


7. ábra A szilárdsági tulajdonságok függése az alakítás mértékének függvényében

A képlékenységi jellemzők alakulása (8.ábra) ellentétes volt a megszokott tendenciával. A fajlagos keresztmetszet csökkenés jelentősen lecsökken a negyedik átnyomásra. Nagyon érdekes, hogy a két út esetében –  $C$  és  $B_A$  – is emelkedést figyelhetünk meg a fajlagos keresztmetszet csökkenés tekintetében,  $C$ -nél majdnem a kezdeti értékig nő.  $B_C$  alakítási úttal legyártott daraboknál az eddigi anyagtudományi ismereteinknek megfelelően végig csökkenés volt jellemző az alakítások során. Ugyanezek a megállapítások igazak a fajlagos nyúlásnál is. A fajlagos törési munka (9.ábra) változásában kísérhető figyelemmel legjobban az anyag szívóságának növekedése  $C$  és  $B_A$  esetében.



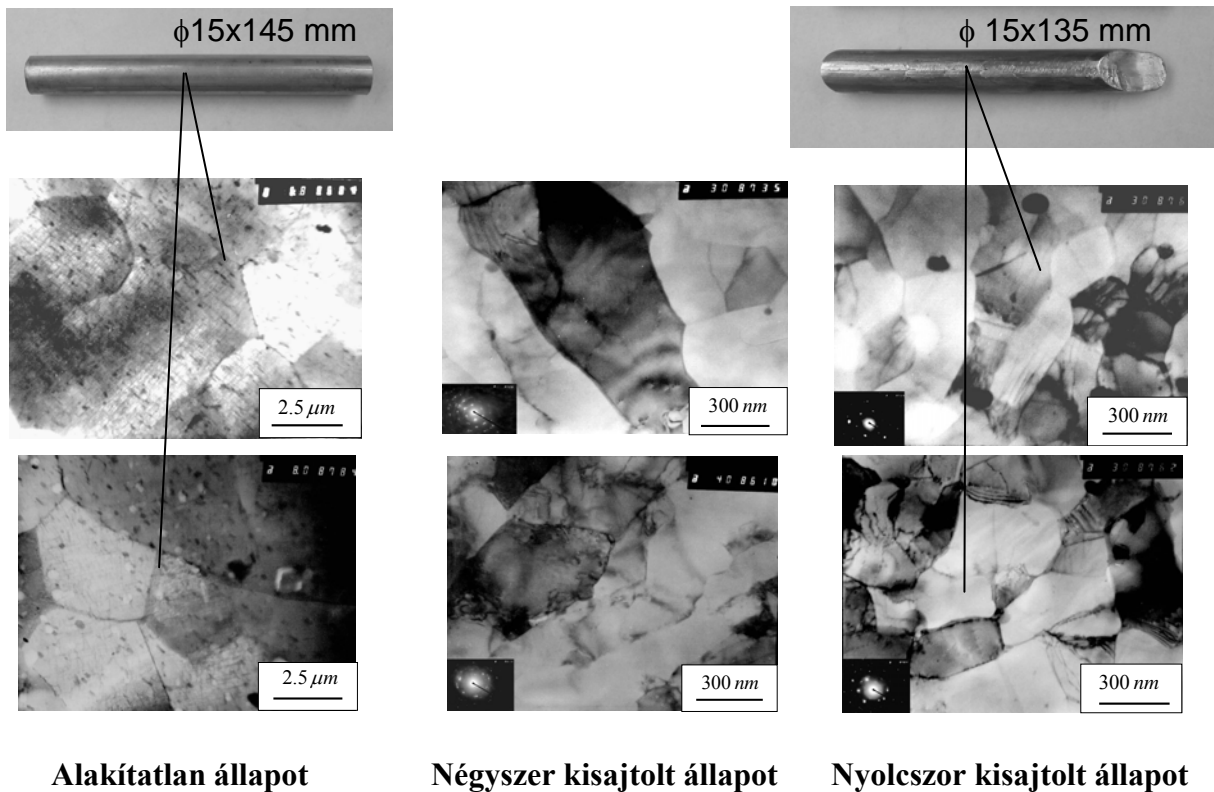
8. ábra A képlékenységi paraméterek függése az alakítás mértékének függvényében



9. ábra A fajlagos törési munka változása az alakítás mértékének függvényében

#### 4. Mikroszerkezet változása

A mikroszerkezet pontos megismerése céljából transzmissziós elektronmikroszkópos felvételeket készítettünk. A mikroszkópi felvételeken határozottan nyomon követhető a szemcseszerkezet alakítások közbeni finomodása.



10. ábra Elektronmikroszkópos felvételek, felső sor a kereszt-, felső a hosszanti irányú metszetekről

A *C* alakítási úttal gyártott próbatestek kereszt irányú metszetein elvégzett röntgendiffrakciós vonalprofil analízis [4] kimutatta, hogy az első átnyomás után elért átlagos kristallitméret 80 nm és a diszlokációsűrűség  $3 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ . A röntgendiffrakciós vizsgálatok érzékenyebben kimutatják a szemcsék közötti orientáció eltéréseit, így a szubszemcsékre jobban fókuszálva kisebb értéket adnak az átlagos szemcseméretre, mint a transzmissziós elektronmikroszkópi felvételekről meghatározott érték. A mikrostruktúra a további alakítások során kisebb mértékben finomodott, ezzel egy időben növekedett a diszlokáció sűrűség egészen a negyedik átnyomásig. A dimenziótlan diszlokáció deformációs energiaparaméterének,  $M$ , értéke  $4.0 \pm 0.4$ -ra adódott az alakítatlan, előzetes lágyításnak alávetett darabokra és  $2.2 \pm 0.3$ -ra csökkent a nyolcadik kisajtolás után. Ez azt jelenti, hogy diszlokációs struktúra dipól jellege erősödött az alakítások során.

Könyöksajtolással különböző utakkal megvalósított próbadarabokat gyártottunk. Megvizsgáltuk, milyen mértékben változtak meg a mechanikai tulajdonságjellemzők a sajtolások során. Egyértelmű növekedést tapasztaltunk a szilárdsági tulajdonságok változásában. 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 könyöksajtolási eljárás segítségével megvalósítani, amely ellentmondásban áll az eddigi anyagismereteinkkel. A jelenség tisztázása további vizsgálatokat igényel. Elsődlegesen, az elkezdett mikrostruktúra megismerésére irányuló kutatásokat kell tovább bővíteni, ugyanis a különös jelenség magyarázata a szemcseszerkezet mikroszkópi szintű megváltozásaiban keresendő.

## 5. A könyöksajtolással előállított anyagok lehetséges alkalmazási területei

Az ultra-finomszemcsés anyagok kedvező tulajdonságai révén sokrétű alkalmazásuk lehet az orvosbiológia-, sport-, közlekedés-, vegyipar-, elektronika és a gépészet területén.



## 6. Irodalomjegyzék

- [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-finomszemelés alumíniumötvözet gyártása és tulajdonságainak a vizsgálata', Tudományos Diákköri Konferencia, Anyagtudományi Szekció, Budapest, 2003