

Szilárdoldatú és túltelített  
alumíniumötvözetek  
képlékeny tulajdonságai,  
különös tekintettel az alakítási  
instabilitásokra

A doktori értekezés tézisei

Horváth Győző

Témavezető: Dr. Nguyen Quang Chinh, egyetemi docens  
fizikatudomány kandidátusa

ELTE TTK Fizika Doktori Iskola

Iskolavezető: Dr. Horváth Zalán, egyetemi tanár

Anyagtudomány és Szilárdtestfizika Program

Programvezető: Dr. Lendvai János, egyetemi tanár

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Természettudományi Kar

Fizikai Intézet

2008

## Bevezetés

A rohamosan fejlődő ipari ágazatok, főleg a járművek (repülőgép, gépkocsi) előállítása egyre újabb igényeket támaszt a felhasználandó anyagokkal szemben. Elsősorban a felhasznált fémek szilárdsági paramétereinek növekedését célozzák meg a gyártók. Ezzel együtt a gazdasági és környezetvédelmi szempontoknak megfelelően az alkalmazható alapanyagok skálájának szélesítését is elvárják. Ez az egyik fontos oka annak, hogy az utóbbi évtizedekben óriási kutatómunka folyik annak érdekében, hogy újabb és újabb, a kitűzött céloknak jobban megfelelő anyagokat állítsanak elő, valamint jobban és részletesebben megismerjük azokat a folyamatokat, amelyek a fémek szilárdságnövelő mechanizmusaival kapcsolatosak. Ez a két kutatási terület szorosan kapcsolódik egymáshoz és feltételezi egyik a másikat. Az ipari fejlesztések felhasználják és újabb igényeikkel ösztönzik az anyagtudományt, amely egyre mélyebbre hatol a mikroszkopikus folyamatok feltérképezésében. Ennek az aprólékos, részletekbe menő kutatásnak a célja az, hogy a belső folyamatok minél jobb megértésével az anyagok mechanikai tulajdonságait kedvező irányban tudják befolyásolni, úgy, hogy az az alkalmazások különböző területein szükséges.

Ebben a kutatási és felhasználási versenyben igen nagy a jelentősége a különböző alumíniumötvözeteknek. Maga a tiszta alumínium nem rendelkezik túlságosan jó mechanikai, szilárdsági tulajdonságokkal, de ötvözeiteinek nagyon nagy szerep jut az ipari felhasználás terén. Kétkomponensű Al-ötvözetek felhasználása majdnem egyidejű az alumínium felhasználásával, az Al-Zn-Mg ötvözeteket azonban csak a 20. század elején kezdték el használni, s kiváló mechanikai tulajdonságai miatt hamar megkezdődtek a vele kapcsolatos alapkutatások, amelyek még ma is folynak. Ezek elsősorban a mikroszerkezeti mechanizmusok feltérképezését tűzték ki célul. A mélyebb struktúrában lezajló folyamatok ismerete különösen fontos, ha az alkalmazások számára a legkedvezőbb mechanikai tulajdonságú ötvözeteket szeretnénk előállítani.

Ötvözőatomok jelenléte a mátrixban – a szilárdságnövelő hatás mellett – bizonyos körülmények között az alakítási folyamat makroszkopikus szinten jelentkező instabilitását vonhatja maga után. Ez a jelenség már közel egy évszázada ismert, mégis napjainkban is intenzív kutatások tárgyát képezi. Ipari felhasználások szempontjából ez a jelenség kerülendő, mivel az instabilitási folyamat a képlékeny

alakváltozás erőteljes lokalizációjával, ún. csúszási sávok megjelenésével jár, amely nem kívánt felületdurvulást eredményezhet fémlemezek előállításánál, ráadásul csökkenti az alakíthatóság határát. Az alakítási instabilitási jelenség megismerése azonban nemcsak ipari szempontból fontos, hanem különösen érdekes az alap kutatás számára is, hiszen a jelenség vizsgálata és magyarázata olyan alapvető mikroszerkezeti összefüggéseket tárhat fel, amelyek az anyagtudomány számos egyéb területére is kiterjedő következményekkel járhatnak.

## A dolgozat célkitűzései

Dolgozatom az ötvözőatomok hatásának vizsgálatát tűzte ki célul mind stabil szilárdoldatú, mind túltelített Al ötvözetekben. Szilárdoldatok esetében az Al-Mg modellötvözeteken keresztül a képlékeny alakváltozás során fellépő alakítási instabilitások ötvözőkoncentráció-függését tanulmányozom. Ilyen irányú szisztematikus tanulmányok a szakirodalomban eddig nem jelentek meg. Kísérleti adatok alapján újra áttekintem a jelenség leírására szolgáló modelleket. Célom továbbá, hogy többféle mérési módszerrel megvizsgáljam a jelenséget, és megtaláljam a megfelelő karakterisztikus paramétereket, melyekkel mikroszkopikus folyamatok is tanulmányozhatóak. A túltelített ötvözetek esetében azt vizsgálom, hogy Al-Zn-Mg szilárdoldatok szétesésekor megjelenő kiválások milyen kinetika szerint képződnek, illetve milyen hatással vannak ezek a kiválások az ötvözetek képlékeny alakváltozására.

## Alkalmazott módszerek

Stabil szilárdoldatoknál vizsgálataimat különböző Mg-koncentrációjú Al-Mg ötvözeteken végeztem kétféle mérési módszerrel, mélységérzékeny dinamikus mikroeménység-méréssel és egytengelyű összenyomással.

Túlteltett szilárdoldatok szételésének a képlékeny alakváltozásra gyakorolt hatását az Al-Zn-Mg ötvözetcsaládon tanulmányoztam. A méréseket három különböző összetételű Al-Zn-Mg(Cu,Zr) ötvözetben végeztem el. A mechanikai tulajdonságokat mélységérzékeny dinamikus mikroeménység-méréssel, a kiválási kinetikát pedig szinkrotronforrás melletti kisszögű röntgenszórással vizsgáltam.

A minták előkészítéskor a belső inhomogenitások elkerülése, illetve a szilárdolat állapot elérése érdekében oldó hőkezelést végeztem, majd ezt követően szobahőmérsékletű vízbe ejtve edzettem a mintákat. Dinamikus mikroeménység-mérések előtt a minta előkészítése és hőkezelése során kialakult felületi réteget elektropolírozással távolítottam el.

A dinamikus mikroeménység-mérésekhez egy Shimadzu DUH 202 típusú mélységérzékeny mikroeménység-mérőt használtam Vickers-gyémántfejvel. A mérések során egy számítógép rögzítette a benyomódási mélységet ( $h$ ) és az alkalmazott erőt ( $F$ ) az idő ( $t$ ) függvényében.

Az egytengelyű összenyomásokat egy MTS 810 márkajelzésű szervohidraulikus mérőberendezésen végeztem szobahőmérsékleten, különböző állandó erősebességet alkalmazva. Ebben az esetben is számítógép segítségével rögzítettem az alkalmazott erőt ( $F$ ) és a mintahossz változását ( $\Delta l$ ) az idő ( $t$ ) függvényében.

A kisszögű röntgenszóráshoz 16 keV-os ( $\lambda = 0.77 \text{ \AA}$ ) fotonok nagy fluxusú fókuszált nyalábját használtam. A kisszögű szórás intenzitáseloszlását egy gázzal töltött lineáris pozícióérzékeny detektorral mértem.

## Tézisek

1. Meghatároztam a stabil szilárdoldatokban fellépő Portevin–Le Châtelier típusú alakítási instabilitások vizsgálata alapján a jelenség leírásához szükséges, különböző mérési módszerekre jellemző makroszkopikus paramétereket, amelyek irodalmi modellek alapján mikroszkopikus folyamatok jellemzőihez társíthatók. Megállapítottam, hogy a lokális viselkedésként jelentkező instabilitási effektus jellemző paraméterei – az egytengelyű alakváltozásra jellemző  $\Delta\sigma$  feszültségnövekmény és a dinamikus benyomódásra jellemző  $\Delta HV$  mikrokeménység-növekmény – között is egyenes arányosság írható fel, az anyag globális szilárdságát kifejező folyásfeszültség és mikrokeménység közötti Tabor-féle kapcsolathoz hasonlóan.
2. Kimutattam, hogy az Al–Mg ötvözetekben fellépő alakítási instabilitások jellemző paraméterei erősen függenek a magnéziumkoncentrációtól. Azt találtam, hogy mind az anyag globális szilárdsága, mind a lokális felkeményedések nagysága a magnéziumtartalom hatványfüggvényével vált ozik. Továbbá, az alakítási instabilitások csak egy  $C_{kr}$  kritikus koncentrációérték fölött jelennek meg. A kísérleti adatok koncentrációfüggésének értelmezéséhez az instabilitási jelenség leírására jelenleg széles körben használt elméleti modell módosítását javasoltam, miszerint a dinamikus alakváltozási öregedés hatását leíró tag a diszlokáció mentén kialakuló helyi ötvözőkoncentrációtól gyökösen függ.
3. Megállapítottam az Al–Mg ötvözetek képlékeny alakváltozásával kapcsolatban szilárdságnövelés globális és az instabilitási jelenség közben fellépő lokális folyamatának mechanizmusát. Azt találtam, hogy míg az anyag globális szilárdságát főleg a diszlokációk és a körülöttük kialakuló ötvözőfelhő kölcsönhatása határozza meg, az instabilitásért felelős dinamikus alakváltozási öregedés a diszlokációk és csak a hozzájuk legközelebb lévő ötvözők vonalmenti diffúzió által vezérelt kölcsönhatásából fakad.
4. Megmutattam, hogy Al–Mg ötvözetek állandó feszültségsebességű egytengelyű összenyomásainál fellépő alakítási instabilitások jellemző paraméteréből, a lokális feszültségnövekményekből, valamint a globális feszültség–deformációs görbéből meghatározható a képlékeny deformáció folyamatára jellemző diszlokáció

sűrűségek fejlődése. Megállapítottam, hogy a magnéziumtartalom növelése szilárdoldatos Al-Mg ötvözetekben egyrészt erősen fokozza a mozgó diszlokációk sokszorozódását, másrészt csökkenti a diszlokációk amihilációját. Ez a magnézium hozzáadásával együtt járó erős szilárdságnövelő hatáshoz vezet.

5. Azt találtam, hogy túlteltett szilárdoldatú Al-Zn-Mg és Al-Zn-Mg-Cu ötvözetekben fellépő benyomódási instabilitásokat az oldott ötvözőatomokon kívül a Guinier-Preston- (GP-) zónák képződése is nagymértékben befolyásolja. Megállapítottam, hogy ezen ötvözetek képlékeny viselkedése statisztikai módon jellemezhető a mikrokéménység-növekmények átlagával és szórásával, valamint a nyomófejnek a globális viselkedés körüli sebességével. Az elemzések alapján kvantitatív módon is nyomon követhető az ötvözetekben lezajló szétesési folyamatok korai szakasza.
6. Megmutattam, hogy Al-Zn-Mg és Al-Zn-Mg-Cu(-Zr) ötvözetek túlteltett szilárdoldatának szétesésekor a kiválási kinetikában három különböző tartomány nyúl írható le. Az első szakasz a nukleáció időszaka, amely során a klaszterek száma csökken. A második szakaszban rögzített számú GP-zóna gyors növekedése megy végbe. A növekvő GP-zónák körül egyre nagyobb ötvözőszegény tartományok alakulnak ki, amelyek átfedésekor a növekedés mértéke visszaesik, és a harmadik szakasz kezdődik sokkal lassabb növekedési ütemmel. A három szakaszt egymástól két karakterisztikus idő választja el, melyeket jelentősen megnövel a rézadalék. Ez alapján kimutattam azt is, hogy a réz hozzáadása lelassítja a szétesési kinetikát szobahőmérsékleten.

## A tézisek alapjául szolgáló publikációk

- [S1] Nguyen Q. Chinh, Győző Horváth, Zsolt Kovács, János Lendvai. Characterization of plastic instability steps occurring in depth-sensing indentation tests. *Mater. Sci. Eng. A*, 324(1–2):219–224, 2002.
- [S2] Nguyen Q. Chinh, Győző Horváth, Zenji Horita, Terence G. Langdon. A new constitutive relationship for the homogeneous deformation of metals over a wide range of strain. *Acta Mater.*, 52(12):3555–3563, 2004.
- [S3] Győző Horváth, Nguyen Q. Chinh, J. Lendvai. Solute concentration dependence of strength and plastic instabilities in Al–Mg alloys. *J. Mater. Res.*, 20(2):331–337, 2005.
- [S4] Nguyen Q. Chinh, Győző Horváth, Zsolt Kovács, András Juhász, György Bérces, János Lendvai. Kinematic and dynamic characterization of plastic instabilities occurring in nano- and microindentation tests. *Mater. Sci. Eng. A*, 409(1–2):100–107, 2005.
- [S5] Péter Kenesei, Győző Horváth, Sigrid Bernstorff, Tamás Ungár, János Lendvai. Early stages of nucleation and growth of Guinier–Preston zones in Al–Zn–Mg and Al–Zn–Mg–Cu alloys. *Z. Metallk.*, 97(3):315–320, 2006.
- [S6] Győző Horváth, Nguyen Q. Chinh, Jenő Gubicza, János Lendvai. Plastic instabilities and dislocation densities during plastic deformation in Al–Mg alloys. *Mater. Sci. Eng. A*, 445:186–192, 2007.

## A tézisek témájában megjelent konferenciatickek

- [S7] Nguyen Q. Chinh, Győző Horváth, János Lendvai. Plastic instabilities in Al–Mg alloys. *Conference Proceedings of EUROMAT 2001*, Rimini, Italy, 2001.
- [S8] Zsolt Kovács, Nguyen Q. Chinh, Károly Süvegh, Tamás Marek, Győző Horváth, János Lendvai, DeHai Ping, Kazuhiro Hono. The effect of Cu on precipitation in Al–Zn–Mg alloys. *9th International Conferences on Aluminium Alloys (ICAA9)*, Brisbane, Australia, 2004.