

TERMOMECHANIKUS KEZELÉSEK HATÁSÁRA VÉGBEMENŐ TERMOELASZTIKUS ÉS NEM TERMOELASZTIKUS MARTENZITES ÁTALAKULÁSOK

OTKA K84065

ZÁRÓJELENTÉS 2011 04 01-2014 08 31

készítette: Dr Mertinger Valéria, egyetemi tanár, projektvezető

A témához kapcsolódó kutatások két helyszínen a Miskolci Egyetem Fémtani Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetében és a Debreceni Egyetem Szilárdtest Fizika Tanszékén zajlottak az előzetes munkatervnek megfelelő módon. Szintén a tervnek megfelelően 2 főállású kutató alkalmazására került sor egy predoc (Tarek El Rassasi) és egy postdoc (Dr. Benke Márton) státuszban. A predoc státuszú kolléga a project futamideje alatt, kutatási eredményei alapján megszerezte a PhD fokozatot. A személyi bérmegtakarításnak (a külföldi kolléga a fokozat megszerzését követően hazautazott, a magyar kolléga egy akadémiai ösztöndíj elnyerésével tört állásra került) köszönhetően 3 törtállású kutató (Pekker Péter, Mikó Tamás, Filep Ádám) alkalmazására is sor kerülhetett a speciális vizsgálótechnikákhoz kötődő kísérletek kapcsán.

A projekt időtartama alatt mindkét helyen kifejlesztésre került egy-egy unikális vizsgálóberendezés is. A miskolci laborban egy insitu vizsgálatokat lehetővé tevő hevítő mikroszkóp, mellyel készült video felvételeket a szakma elismert szaktekinétye, Harry Bhadeshia (University of Cambridge) a saját honlapjára is feltette. A debreceni laborban a termikus, a mágneses és az akusztikus zajok együttes mérésének a lehetőségét valósítottuk meg.

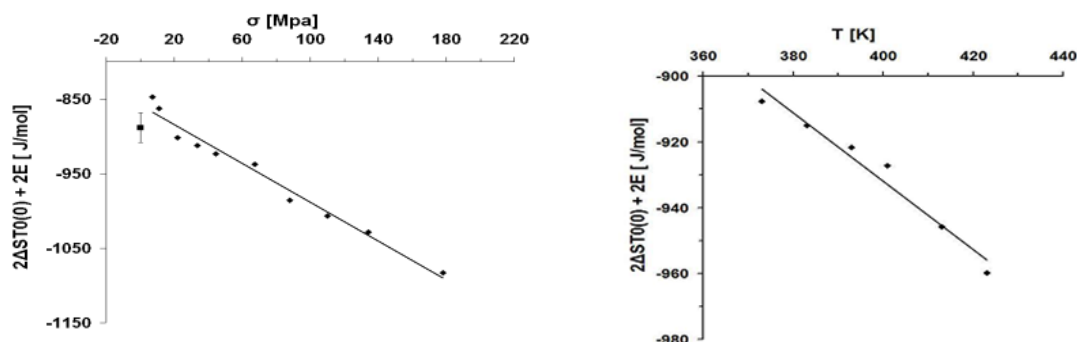
Kutatási eredményeinket folyamatosan bemutattuk hazai (VIII. és IX: Országos Anyagtudományi Konferencia, MicroCad, Hőkezelő és Anyagtudomány a Gépgyártásban) és a téma 3 legfontosabb nemzetközi konferenciáján is (ICOMAT2011, 2014, SMST2013, ESOMAT2012). Publikáltunk hazai, nemzetközi és impakt faktorral rendelkező folyóiratokban is. Eredményeink alapján egy PhD (Dr. Tarek El Rassasi) és egy habilitációs (Dr. Mertinger Valéria) fokozat született.

A PROJEKT SZAKMAI EREDMÉNYEINEK ÖSSZEFOGLALÁSA

Kutatásaink során a termomechanikus kezeléseknek a termoelasztikus és nem termoelasztikus martenzites átalakulásokra kifejtett hatását vizsgáltuk CuAlNi alapú egy- és polikristályos, Ni₂MnGa egykristályos alakmemória ötvözeteken és FeMnCr TWIP/TRIP hatást mutató acélokon. Kísérleteink során végeztünk izoterm egytengelyű húzó vizsgálatokat, termikus ciklizálást külső feszültség alkalmazása nélkül és állandó feszültség alatt is, valamint izoterm mechanikai ciklizálást. Vizsgálataink célja egyrészt elméleti, másrészt gyakorlati problémák tisztázása volt. Sikert ért a korábban kidolgozott lokális egyensúlyi modellünk továbbfejlesztésével a termoelasztikus átalakulások termodinamikai leírását bővíteni, a martenzites átalakulást kísérő termikus, mágneses és akusztikus zajelemzési technikákat nemzetközi szinten is elismert módon fejleszteni és a vizsgálatok eredményei alapján a mágneses alakmemória ötvözetekhez kapcsolódó elméleti ismereteket bővíteni. Megmutattuk a polikristályos CuAlNiFe, CuAlNiFeMn ötvözetekben lejátszódó öregedési folyamatokat és azok hatását az alakmemória effektusra. Összehasonlító vizsgálatokkal megmutattuk a rácshibák ellentmondásos szerepét a termoelasztikus és nem termoelasztikus átalakulások során. TRIP/TWIP acélokon a különböző genetikájú martenzitek megjelenését XRD makro- és TEM mikrotextúra eredményekre alapozva ki tudtuk mutatni. A különböző fázisok megjelenését a mérnöki mérőszámokkal korrelálni tudtuk.

A LOKÁLIS EGYENSÚLYI MODELLÜNK TOVÁBBFEJLESZTÉSE

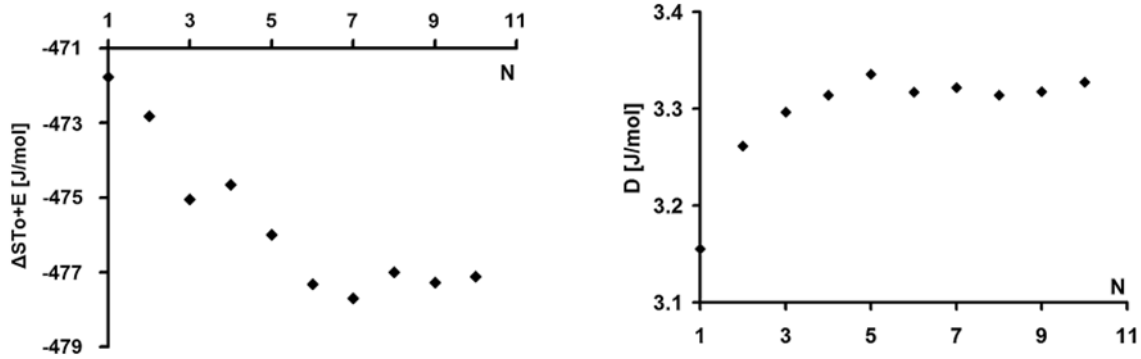
A korábban kidolgozott lokális egyensúlyi modellt [1][2] alkalmaztuk alakmemória anyagokra különböző kísérleti körülmények között. CuAl(11.5wt%)Ni(5.0wt%) egykristályokon állandó húzófeszültség mellett felvett hőmérséklet-deformáció (T - ϵ), valamint állandó hőmérsékleten felvett feszültség-deformáció (ϵ - σ) görbékéből meghatároztuk az átalakulást kísérő rugalmas szabadenergia járulék (az anyagban tárolt E rugalmas energia ξ átalakult anyaghányad szerinti deriváltja) értékét az átalakult anyaghányad függvényében [3]. Ezen $e(\xi)$ mennyiség abszolút értékének a kiszámítása csak a ΔsT_0 mennyiség (Δs az átalakulást kísérő entrópiaváltozás, T_0 az egyensúlyi hőmérséklet.) ismeretében történhet. T_0 általában pontosan nem ismert, mivel meghatározása csak nagyon speciális körülmények között lehetséges. Mivel a ΔsT_0 faktor az átalakult anyaghányadtól független, így a rugalmas energiajárulék átalakult anyaghányadtól való függése ($e(\xi)$) ennek pontos ismerete nélkül is vizsgálható. A különböző feszültség és hőmérséklet értékek mellett meghatározott $e(\xi)$ függvények integrálásával meghatározható az átalakulást kísérő teljes rugalmas energia feszültség és hőmérsékletfüggése is. (1. ábra)



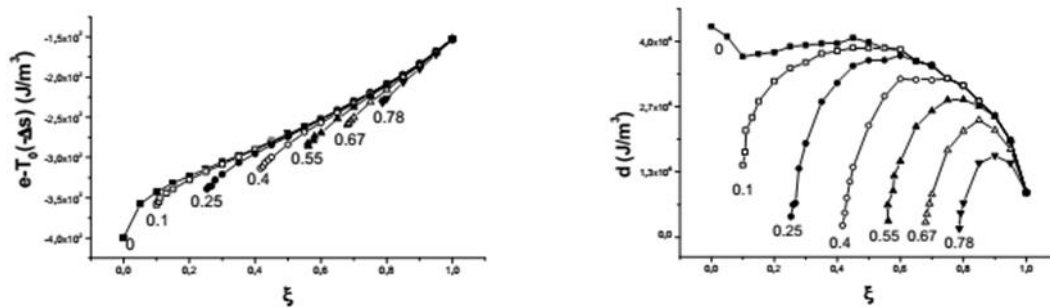
1. ÁBRA A RUGALMAS ENERGIA FESZÜLTÉG ÉS HŐMÉRSÉKLETFÜGGÉSE [3]

Megvizsgáltuk a termikus és mechanikai ciklizálás hatását CuAl(11.5wt%)Ni(5.0wt%) egykristályokon. [4]. A deformáció-feszültség (ϵ - σ) valamint az átalakult anyaghányad-hőmérséklet (ξ - T) kísérleti görbéket analizáltuk termikus és mechanikai ciklizálás során a ciklusszám függvényében. A (ξ - T) görbéket 0 külső mechanikai feszültség mellett a DSC (differenciális pásztázó kaloriméter) mérésekből számítottuk ki. A (ϵ - σ) görbéket állandó hőmérsékleten (373K) szakítógéppel alkalmazásával mértük. A fenti kísérleti görbékéből a már hivatkozott [1][2] eljárás alkalmazásával kiszámítottuk a disszipatív és rugalmas szabadenergia járulékokat mint az átalakult anyaghányad függvényét. Ezekből az adatokból meghatároztuk az egy transzformációs ciklusra eső teljes rugalmas és disszipatív energiákat a ciklusszám függvényében. A termikus ciklizálás során az egy ciklusra eső rugalmas energia 12 J/mol körüli értékkel növekedett, míg a disszipatív energia 6 J/mol körüli értékkel csökkent. A mechanikai ciklizálás ellentétes értelmű változást eredményezett, a rugalmas energia csökkent 6 J/mol értékkel, míg a disszipatív energia esetében 0.2 J/mol növekedést figyeltünk meg. (2. ábra)

Termodinamikai modellünk lehetővé teszi az átalakulás vizsgálatát abban az esetben is, ha az átalakulás nem teljes. Állandó húzófeszültség mellett felvett hőmérséklet-megnyúlás illetve hőmérséklet-ellenállás görbéket vettünk fel oly módon, hogy teljesen martenzites állapotból kiindulva különböző maximális átalakult hányaddal jellemezhető hőmérsékleti ciklusokat valósítottunk meg [5]. Hasonló méréseket végeztünk teljesen ausztenites állapotból kiindulva, különböző maximális martenzit hányadok eléréséig vezetve az átalakulást. Olyan ciklizálást is végeztünk, ahol az átalakulás egyik irányban sem volt teljes. A leírt módon mért részleges histerézis görbék kiértékelésével megvizsgáltuk a nem teljes ciklizálás hatását az átalakulást jellemző rugalmas $e(\xi)$ és disszipatív $d(\xi)$ szabadenergia deriváltakra. (3. ábra)



2. ÁBRA AZ ELASZTIKUS ÉS DISSZIPATÍV ENERGIÁK CIKLUSSZÁMFÜGGÉSE MECHANIKAI CIKLIZÁLÁS HATÁSÁRA[4]



3. ÁBRA A RUGALMAS ÉS DISSZIPATÍV SZABADENERGIA JÁRULÉKOK FÜGGÉSE AZ ÁTALAKULT ANYAGHÁNYADTÓL KÜLÖNBÖZŐ ξ_{MIN} MIN MINIMÁLIS MARTENZITHÁNYADDAL JELLEMZETT RÉSZCIKLUSOK ESETÉBEN[5]

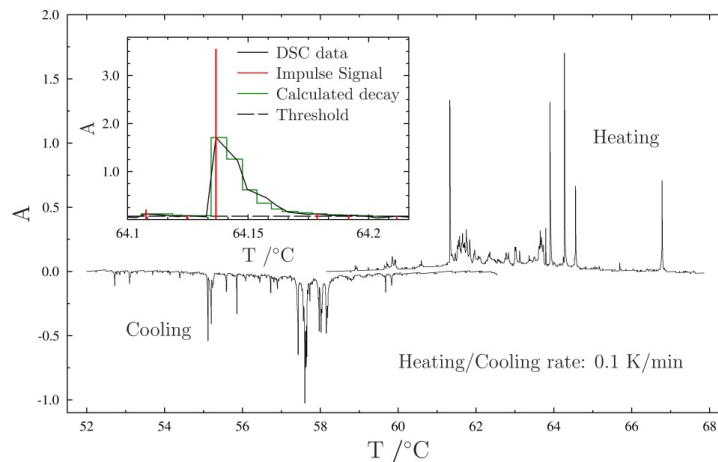
A termoelasztikus átalakulások termodinamikai leírásával kapcsolatos eredményeinket egy könyvfejezet formájában is publikáltuk [6].

TERMIKUS, MÁGNESES ÉS AKUSZTIKUS ZAJELEMZÉSEK

A termoelasztikus martenzites átalakulások az ausztenit és martenzit fázisokat elválasztó habitussíkok mozgásával mennek végbe. Az átalakulás és így ezen belső határfelületek mozgása is szakaszos folyamat, amit többek között az átalakulás kísérő akusztikus emissziós jelenségek is bizonyítanak. Igen lassan vezetve az átalakulási folyamatot ez a szakaszos, statisztikus jelleg a DSC méréseknél is megnyilvánul. Megfelelően alacsony fűtési/hűtési sebességeket alkalmazva a DSC görbe diszkrét csúcsokra esik szét lehetővé téve a statisztikus analízis módszereinek az alkalmazását a folyamat vizsgálatára. A DSC csúcsok amplitúdójának, energiájának és egyéb paramétereinek a statisztikus eloszlása hatványfüggvényekkel jellemezhető. Az eloszlásfüggvények kitevői az átalakulási folyamatra jellemzők és kielégítik a statisztikus fizikából ismert skálázási szabályokat is, amint azt Ni_2MnGa egykristály mintákon végzett méréseink is alátámasztják [7] (4. ábra).

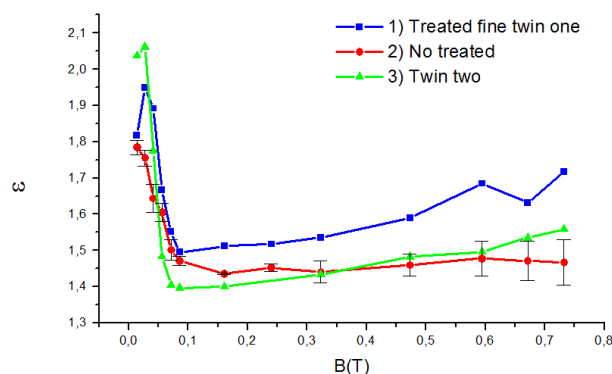
Ugyanolyan összetételű de martenzites állapotban különböző mikroszerkezetű Ni_2MnGa egykristályokon végzett szimultán DSC és akusztikus emissziós vizsgálataink [8] ugyancsak azt mutatják, hogy mindkét jel energia- és amplitúdó-eloszlása hatványfüggést mutat. A DSC jelből kiértékelhető energia kitevő a mikroszerkezetre nem érzékeny, minden esetben $\epsilon=1.7\pm 0.2$ értékű. Az akusztikus emissziós jel (egyezésben más kutatócsoportok tapasztalataival) a fűtés és hűtés során eltérően viselkedik, hűtés során következetesen nagyobb akusztikus aktivitást tapasztalunk és az eloszlásfüggvények kitevői is kismértékben eltérnek: $\epsilon=1.8\pm 0.1$, $\alpha=2.6\pm 0.1$ fűtésnél, $\epsilon=1.5\pm 0.1$, $\alpha=2.1\pm 0.1$ hűtésnél. A mikroszerkezeti változások itt sem eredményeznek jelentős változásokat a

hatványkitevők értékében, de a mintafelület durvulása az akusztikus aktivitás növekedését eredményezi.



4. ÁBRA DISZKRÉT EXOTERM/ENDOTERM DSC CSÚCSOK LASSÚ HŰTÉSI/FŰTÉSI SEBESSÉGEKNÉL [7]

A Ni_2MnGa esetében mind a martenzit mind az ausztenit fázis ferromágneses, így az átalakulást mágneses emisszió is kíséri. A mágneses zajok a termikus és akusztikus jelekhez hasonlóan statisztikailag hatványfüggvényekkel jellemezhetők. A martenzites állapotú anyag szuperplasztikus deformációja során a martenzit variánsok átrendeződnek. Ez a kristályszerkezeti változás a nagy magnetokristályos anizotrópia miatt fellépő erős manetoelasztikus csatolás révén a mágneses doménszerkezetet is átrendezi. Abban az esetben, ha ez az átrendeződés ugrásszerű doménfal mozgásokkal megy végbe, akkor mágneses zaj keletkezik. A vizsgálatokhoz nélkülözhetetlen mágneses mérés és kiértékelési technika fejlesztését nagy zajaktivitást mutató fémüvegszalagokon folytattuk. A fejlesztések során elért alapvetési eredményeinket megjelentettük. Kísérleteinkkel igazoltuk, hogy az átrendeződés szakaszos jellegű és jól mérhető mágneses emisszió detektálható [10][11]. Az energia és amplitúdó-eloszlások hatványfüggvényekkel jellemezhetők és a kitevők a skálaszabályokat is kielégítik. A vizsgálatokhoz kifejlesztett berendezésünk lehetővé tette a martenzites állapotú anyag mágneses térben történő deformálását, így a zaj-eloszlásfüggvények kitevőinek külső mágneses tértől való függését is meg tudtuk határozni. Méréseinket különböző martenzites mikroszerkezetű mintákon végeztük. Az energia és amplitúdó eloszlások mindegyik mintában hasonló térfüggést mutattak: kis tereknél a kitevők értéke gyorsan csökken a tér növekedésével, azaz a növekvő mágneses tér hatására ebben a tartományban a nagy lavinák relatív száma gyorsan nő. Nagyobb tereknél (0.1T fölött) az eloszlásfüggvények meredeksége közel állandó (5. ábra)

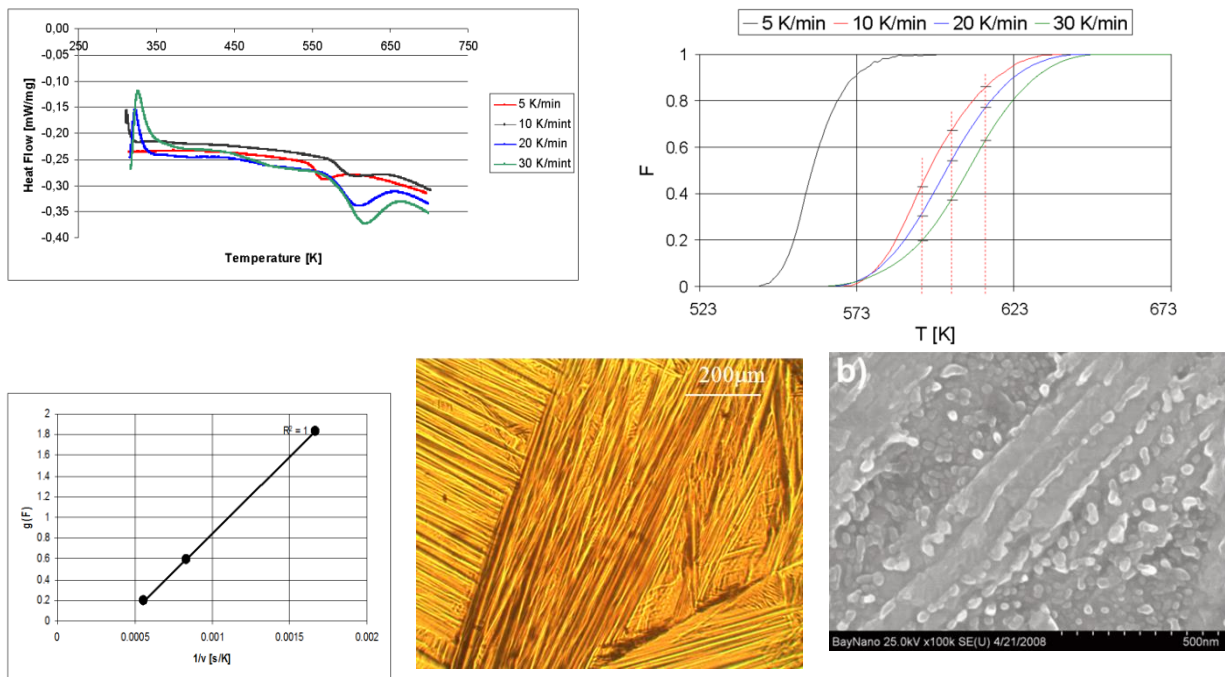


5. ÁBRA AZ ENERGIA ELOSZLÁSFÜGGVÉNYEK KITEVŐINEK TÉRFÜGGÉSE KÜLÖNBÖZŐ MIKROSZERKEZETŰ Ni_2MnGa MINTÁK ESETÉBEN [12]

CuAlNi ALAPÚ ALAKMEMÓRIA ÖTVÖZET ÖREGEDÉSI FOLYAMATAI

CuAlNi alapú Fe, Mn ötvözesű polikristályos alakmemória ötvözet átalakulási kinetikájának vizsgálatát végeztük el. Az ötvözetben hevítés hatására lezajló bénites átalakulás megjelenését, mint az alakmemória effektust kiiktató folyamatot írtuk le. A folyamat leírására, DSC ciklizálást, in situ hevítő mikroszkópos, SEM, TEM vizsgálatokat végeztünk el. Bebizonyítottuk, hogy hevítés hatására diffúzió szabályozta kiválási folyamatok és hevítés hatására létrejövő martenzites átalakulás kombinálódik, vagyis az ötvözetben hevítés hatására bénites reakció megy végbe. Ezzel az ötvözet, mint alakmemória alapanyag használhatósági tartományát térképeztük fel. A DSC vizsgálatok eredményeiből számított átalakult hányad-hőmérséklet eredményeket vizsgáltuk 10 különböző típusú kinetikai függvényvel. Kimutattuk, hogy a bénites reakció a csíráképződés-növekedéses folyamatokat jellemző Avrami kinetikával írható le (6. ábra). Eredményeinket korábbi CuAlNiMnTi mintákon tapasztalt méréseinkkel is összevetettük.

Eredményeinket konferenciákon és szakcikkekben is bemutattuk [12][13][14][15][16].



6. ÁBRA BÉNITES ÁTALAKULÁS CUALNI ALAPÚ ÖTVÖZETBEN

RÁCSHIBÁK SZEREPE A TERMOELASZTIKUS ÉS NEM TERMOELASZTIKUS MARTENZITES ÁTALAKULÁSOK SORÁN

Termoelasztikus (CuAlNi polikristályos) és nem termoelasztikus (FeMnCr) martenzites ötvözetek termikus ciklizálást végeztük el in situ hevítőmikroszkópos és DSC vizsgálatokkal. Az in situ vizsgálatok során készített videofelvételek egyben nagyban megkönnyítik a téma átadását az egyetemi oktatás során, másrészt a DSC eredményekkel kiegészítve egyértelmű bizonyítékát adják az elméleti leírásoknak.

A termoelasztikus átalakulások során egyrészt megmutattuk a martenzit variánsok kialakulásának véletlen voltát, másrészt kísérleti bizonyítékát adtuk a mikroszkópikus léptékben fellépő rugalmas feszültségtér átalakulást indukáló hatásának. Megmutattuk, hogy a nem termoelasztikus átalakulás során fellépő jelentős képlékeny alakváltozás, és a vele járó diszlokáció sűrűség

növekedés gátja a jellemzően TWIP hatással képződő martenzit kialakulásának. A hatásnak köszönhetően az ötvözet hiszterézise (Ausztenit start hőmérséklet – Martenzit start hőmérséklet) a ciklusszám növekedésével nő. A martenzit variánsok ciklusonként állandóak, mely a rétegződési hibák csíráképző helyben betöltött szerepét mutatja. A ciklus növelése során az átalakult térfogathányad a kezdeti ciklusokban folyamatosan nő, egyre finomodó relief jelenség mellett, mely arra utal, hogy a diszlokációk okozta rugalmas feszültségtér újabb térfogatrészekben segíti a martenzit képződést. [17][18][19][20]

TERMOMECHANIKUS KEZELÉS SZEREPE TRIP/TWIP HATÁST MUATATÓ ACÉLOK MARTENZITES ÁTALAKULÁSAIRA

Vizsgálatainkban különböző króm tartalmú ausztenites (FeMn(Cr)) célokban, termomechanikus kezelés hatására végbemenő TWIP (Twinning Induced Plasticity) és TRIP (Transformation Induced Plasticity) hatást okozó martenzites átalakulásokat vizsgáltuk. A modellötvözeteket homogenizáltuk, majd szakító vizsgálatokat végeztünk. A vizsgálatok során lépcsős hőkezelést alkalmaztunk: 300°C-on történő izoterm hőkezelést követően visszahűtöttük a mintákat különböző hőmérsékletekre és izoterm körülmények között szakadásig terheljük. Meghatároztuk a jellemző mérnöki mérőszámokat (Folyáshatár, szakító szilárdság, nyúlás). Az elszakított mintákon röntgendiffrakciós minőségi és mennyiségi elemzést valamint fénymikroszkópos vizsgálatokat végeztünk. Az alkalmazott kezelésnek köszönhetően a mintákban különböző a jelenlévő fázisok (ausztenit, α' , ϵ martenzitek) mennyisége. A vizsgálatok eredményeként megmutattuk, hogy az ötvözet viselkedése a vizsgált hőmérséklet tartományban (40-200°C) jellemzően 3 szakaszra osztható. A magasabb hőmérsékleteken az igénybevételnek köszönhetően ausztenit mellett az ϵ martenzit található, mely utóbbi mennyisége a hőmérséklet csökkenésével csökken, minek köszönhetően nő a szilárdság és a nyúlás. A köztes hőmérséklet tartományban 3 fázis van jelen, a feszültség és a nyúlás eléri a maximális értéket. A legalacsonyabb hőmérséklet tartományban az ausztenit mennyisége az α' martenzit rovására csökken, minek köszönhetően a feszültség kis mértékben, a nyúlás pedig radikálisan csökken. Kimutattuk, hogy a három tartomány abszolút hőmérséklete a Cr tartalommal korrelál. A DSC ciklizációs vizsgálatok eredményét is figyelembe véve kijelenthetjük, hogy az általunk vizsgált ötvözetekben, a Cr a rétegződési hibaenergiát növeli, a TWIP hatás kialakulásának gátja. Kimutattuk, hogy a több szerző által is vitatott Parvein Le Chatelier effektus (jerky karakter a folyási görbén) az α' martenzit megjelenéséhez köthető.

Röntgendiffrakciós (makroszkópikus) textúra vizsgálatokkal (inverz pólusábrák) megmutattuk, hogy a magasabb hőmérsékleten (160, 180, 200°C) végzett komplex termomechanikus hőkezelésnek köszönhetően, különböző genetikájú (termikusan és mechanikusan indukált) ϵ martenzitek képződtek. A különböző genetikára a DSC vizsgálatokkal meghatározott martenzitek elbomlásának eltérő jellege is közvetett bizonyítékul szolgál.

Komplex kialakulási és elbomlási folyamatok vizsgálatával (XRD, Dilatométer, DSC, EBSD) megállapítottuk, hogy a $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ átalakulás martenzitesen megy végbe hűtés és hevítés hatására, míg a $\alpha' \rightarrow \gamma$ átalakulás diffúzió kontrolált.

Mikrotextúra (TEM) vizsgálatokkal megerősítettük a fázismennyiségi eredményeket, meghatároztuk a γ/ϵ és ϵ/ϵ jellegzetes határorientációs kapcsolatokat.

[21][22][23][24][25]

HIVATKOZÁSOK

- [1] L. Daróczy, Z. Palánki, S. Szabó, D. L. Beke, *Material Sci. and Eng.* A378, 274, 2004
- [2] D.L. Beke, L. Daróczy, Z. Palánki, C. Lexcelent, *Proc. of Int. Conf. on Shape memory and Superelastic Technologies*, 2007 Tsukuba, Japan, edited by S. Miyazaki (ASM International, Materials Park, Ohio) p. 607, 2008
- [3] T.Y. Elrasasi, L. Daróczy, D.L. Beke, *Mat. Sci. Forum* 729 (2013) 37-42
- [4] T.Y. Elrasasi, M.M. Dobróka, L. Daróczy, D.L. Beke, *Journal of Alloys and Compounds* 577 (SUPPL. 1), pp. S517-S520 (2013)
- [5] [Daróczy, L.](#), [El Rasasi, T.](#), [Beke, D.L.](#) *Mat. Sci. Forum* 738-739, pp. 38-45 (2013)
- [6] D.L. Beke, L. Daróczy, T.Y. Elrasasi, 'Shape Memory Alloys-Processing, Characterisation and Applications', book edited by F.M.B. Fernandes, ISBN 978-953-51-1084-2 (2013)
- [7] T.Y. Elrasasi, L. Daróczy, L.Z. Tóth, D.L. Beke, Z. Halász, *Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies May 20-24 2013, Prague, Czech Republic*
- [8] L.Z. Tóth, S. Szabó, L. Daróczy and D.L. Beke (Submitted to *Phys. Rev. B*)
- [9] L. Daróczy, G. Eszenyi, Zs. Molnár, D.L. Beke, A. Bükki-Deme, F. Zámorszky, *Materials Transactions* 55, 8, (2014) pp. 1237-1242
- [10] L. Daróczy, Sz. Gyöngyösi, D.L. Beke Poster presentation on ICOMAT 2014 conference 6-11 July Bilbao Spain
- [11] L. Daróczy, Sz. Gyöngyösi, D.L. Beke Oral presentation on SMART 2014 conference 19-20 September 2014 Debrecen, Hungary
- [12] Benke Márton, Mertinger Valéria, CuAlNiMn és CuAlNiMnFe alaklélező ötvözetek bainites átalakulásának vizsgálata, *ANYAGOK VILÁGA X:(1)* p. &. 7 p. (2012)
- [13] Mertinger Valéria, Termomechanikus kezelések hatása alakmemóriaötvözetben és ausztenites acélban végbemenő martenzites átalakulásra, 74 p. Habilitációs téziszűzet, Benyújtás éve: 2012. Védés éve: 2013.
- [14] Marton Benke, Valéria Mertinger, Péter Barkóczy, Investigation of the Kinetic of a Bainitic Reaction upon Heating in a CuAlNiMn and a CuAlNiMnFe Shape Memory Alloy, *MATERIALS SCIENCE FORUM* 752: pp. 4-9. (2013)
- [15] Benke Márton, Mertinger Valéria, BAINITES ÁTALAKULÁS CUALNI ÖTVÖZETEKEBEN, *MISKOLCI EGYETEM KÖZLEMÉNYEI : ANYAGMÉRNÖKI TUDOMÁNYOK* 38:(1) pp. 19-28. (2013)
- [16] M Benke, V Mertinger, P Pekker, Investigation of the bainitic reaction in CuAlNiMnFe shape memory alloy, *JOURNAL OF MINING AND METALLURGY SECTION B-METALLURGY* 49 (1):(B) pp. 43-47. (2013)
- [17] Márton Benke, Valéria Mertinger, Ferenc Tranta, In situ optical microscope examinations of the $\epsilon \leftrightarrow \gamma$ transformations in FeMn(Cr) austenitic steels during thermal cycling, *MATERIALS SCIENCE FORUM* 738-739: pp. 257-261. (2013)
- [18] Marton Benke, Valéria Mertinger, In situ Optical Microscopic Examination Techniques of Thermally Induced Displacive Transformation, közlésre elfogadva, *MATERIALS SCIENCE FORUM*
- [19] Mertinger V, Benke M, Nagy E, Pataki T, Reversible Characteristics and Cycling Effects of the $\epsilon \leftrightarrow \gamma$ Martensitic Transformations in Fe-Mn-Cr Twip/Trip Steels, *JOURNAL OF MATERIALS ENGINEERING AND PERFORMANCE* 23: pp. 2347-2350. (2014), Prága, Csehország: 2013.05.21 -2013.05.25.
- [20] Benke M, Mertinger V, In Situ Optical Microscope Study of the Thermally Induced Displacive Transformations in Cualni-Based Shape-Memory Alloys, *JOURNAL OF MATERIALS ENGINEERING AND PERFORMANCE* 23: pp. 2333-2338. (2014), Csehország: 2013.05.21 -2013.05.25.
- [21] Nagy Erzsébet, [Mertinger Valéria](#), Benke Márton, Tranta Ferenc, Martenzites átalakulás vizsgálata FeMnCr TWIP acélokban, XXVIII. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, Magyarország, 2014.04.10-2014.04.11. 2014. pp. B1-6-1-B1-6-8.(ISBN:[978-963-358-051-6](#))
- [22] Valeria Mertinger, Erzsébet Nagy, Marton Bneke, Ferenc Tranta, Characteristic of Martensitic Transformations induced by uni-axial tensile tests in a FeMnCr steel, közlésre elfogadva, *MATERIALS SCIENCE FORUM*
- [23] Erzsébet Nagy, [Valéria Mertinger](#), Márton Benke, Ferenc Tranta, TWIP effect in FeMnCr alloys, microCAD 2013, Magyarország, 2013.03.21-2013.03.22.. pp. D9-1-D9-6.(ISBN:[978-963-358-018-9](#))
- [24] F. Tranta, A. Weiss: The effects of heat treatment and deformation on the martensitic transformation of FeMn(Cr) steels, *Materials Science Forum Vol.729*, pp. 132-137., 2013
- [25] V. Mertinger, M. Benke, E. Nagy, Effect of Chromium Content on the TWIP Behavior in Fe-Mn-Cr Steels, *Materials Today: Proceedings* (2014) bírálólat alatt