

MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA

DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

A TERMOMECHANIKUS KEZELÉS HATÁSA
ALAKMEMÓRIA ÖTVÖZETBEN ÉS AUSZTENITES
ACÉLBAN VÉGBEMENŐ MARTENZITES ÁTALAKULÁSRA

Dr. Mertinger Valéria



Miskolci Egyetem

Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet

Miskolc

2016

BEVEZETÉS ÉS AZ ÉRTEKEZÉS CÉLKITŰZÉSEI

A martenzites átalakulás egy olyan fémtani jelenség, amelynek felismerése és alkalmazása nélkül az emberiség nem tudott volna a bronzkorból kilépni. Ugyanis a vaskor megjelenése óta ezt a jelenséget az ember tudatosan használja: többek között ez a jelenség az oka az acélok évszázadokon átívelő diadalútjának. A XX. században ismerték fel azt a tényt, hogy a martenzites átalakulás nemcsak nemesíthető acélokban, hanem számos más ötvözetben, sőt nemcsak fémekben, hanem polimerekben és kerámiákban is végbemehet. Nagy gyakorlati jelentősége alakmemória ötvözetben és ausztenites acélokban van. Ezen alapanyagok felhasználásával ma már számos szerkezeti, funkcionális alkatrész készül. A termékek előállításuk vagy alkalmazásuk közben rendszerint termomechanikus kezeléssel esnek át. A termomechanikus kezelés kezdetben az újrakristályosodás és képlékenyalakítás kombinációjával elért szemcsefinomítás (szilárdságnövelés) olcsó, de szigorú technológiai fegyelmet követelő eszköze volt például a HSLA¹ acélok esetében. Később az egyéb átalakulási folyamatokat kombinálták az alakítással, például a DUAL² és a „bake hardenable”³ acéloknál rendkívül jó szilárdságot és szívósságot biztosítva így az acélnak.

A termomechanikus folyamatokat a martenzites átalakulással kombinálva a TRIP⁴, TWIP⁵ acélok és az alakmemória ötvözetek fémtani problémáihoz jutunk. A kezelés ezen ötvözeteknél igen sokféle eredménnyel és célzattal történhet. A disszertáció keretében az általam elvégzett kutatások a következő kérdésekre keresték a választ:

1. Melyek azok a fémtani módszerek, amelyek alkalmazásával a Ni-Ti ötvözet szuperelasztikus viselkedésének hőmérséklet tartománya a legeredményesebben kiterjeszthető, és ez hogyan befolyásolja az ötvözet mechanikai tulajdonságait és átalakulási karakterisztikáját?
2. Az ausztenites és a martenzites állapotú termomechanikus kezelés hogyan befolyásolja a Ni-Ti ötvözet kiváltására aspiráló CuAlNi+ Mn, Fe, Ti ötvözetek átalakulási karakterisztikáját? Melyek az ötvözetcsalád lehetőségei a magas hőmérsékletű alkalmazásoknál?
3. Az ausztenites és martenzites állapotban végzett termomechanikus kezelés általában milyen hatással van a termoelasztikus és nem termoelasztikus martenzites átalakulásokra?
4. A TRIP és TWIP acéloknál a termomechanikus kezelés hatására kialakuló textúra és a kristálytanilag orientált fázisátalakulás kölcsönhatásának mi az eredménye és ez hogyan hat az alakíthatósági jellemzőkre?

¹ HSLA- Nagyszilárdságú, alacsony ötvözetű acélok.

² DUAL- Ferrit, martenzit fázisú acélok, interkritikus lágyítást követő edzéssel létrehozott szövettel.

³ bake-hardenable- Olyan acélok, melyekből jellemzően festett alkatrészek készülnek, és a festékszárítással járó hőeffektus a diszlokációk és az intersztíciósan oldott ötvözők vagy apró kiválások kölcsönhatásán alapuló szilárdságnövelő fémtani folyamatokat indít el.

⁴ TRIP- Fázisátalakulás miatt nagy képlékeny alakváltozásra képes acélok.

⁵ TWIP- Nagyszámú ikerképződéssel alakváltozó, nagy szilárdságú és nagy nyúlású acélok.

5. A TWIP hatást mutató ausztenites mangánacéloknak végbemenő martenzites átalakulásokra mi a Cr-nak mint ötvözőnek a szerepe.
6. Ausztenites saválló acél petrokémiai alkalmazása során fellépő termomechanikus igénybevételnek mi a szerepe a szerkezet tönkremenetelésében?

MARTENZITES ÁTALAKULÁS JELLEMZŐI ÉS FOGALMI DILEMMÁI

1898-ban Floris Osmond karbonacélok szövetszerkezetével foglalkozó cikkében használta először a martenzit elnevezést Adolf Martens munkássága előtt tisztelegve, annak ellenére, hogy Martens érdemeit nem ezen a területen végzett kutatásaival szerezte.

A martenzites átalakulás kifejezést acéloknak zajló folyamatokra használták először, azonban az átalakulás nemcsak a vasötvözetek sajátja. Az **1. Táblázat** néhány ötvözetet mutat a jellemző átalakulási hőmérséklettel és a martenzit fázis keménységével (Laughlin, 2014).

1. Táblázat (Laughlin, 2014)

Összetétel, m/m%	Martenzit start hőmérséklet, °C	Keménység, HV
ZrO ₂	926	1000
Fe-31Ni-0,23C	-190	300
Fe-34Ni-0,22C	-269	250
Fe-3Mn-2Si-0,4C	220	600
Cu-15Al	-20	200

Általánosan a martenzites átalakulás egy olyan deformációval járó folyamatot jelent, mely során megváltozik az anyag rácstípusa. Az átalakulásnak három jellemzője van:

1. Az átalakulást nem kíséri hosszú távú diffúziós folyamat. Az atomok együttes elmozdulásával jön létre az új szerkezet. „Falling one after another in succession” (Nishiyama, 1978).
2. A folyamatot mindig kíséri felületi domborzati (relief) változás.
3. Az átalakulás során a térfogatban számos rácshiba keletkezik.

A három jellemző számos – ötvözetektől függően vagy függetlenül – következménnyel jár, amelyek megtevesztők a folyamat általános leírására.

A dolgozatnak nem célja az átalakulás igen széles irodalmának összefoglalása, csak röviden szeretném tisztázni a leggyakoribb hibás definíciókat és a dilemmákat. Mivel kutatási területem a termomechanikus kezelések hatásának vizsgálata volt ezért az eredmények könnyebb interpretálása érdekében térek ki részletesebben ezen elméleti alapok összefoglalására.

1. DILEMMA: „A MARTENZIT FÁZIS KEMÉNY” - „LÁGY NIKKELMARTENZITEK”

Mivel az átalakulás diffúziótól mentes, ebből az következik, hogy a szülő, általános elnevezéssel az ausztenit, és a keletkező, más néven martenzit fázis között nincs koncentráció különbség. Ha az ausztenit fázis intersztíciós szilárdoldat, akkor a martenzit fázisban a

szilárdoldatos keményedés igen erőteljes is lehet. Ez az edzett acélok sajátja és az edzett acél évszázadokon átívelő diadalútjának magyarázata (Hosford, 2012). Az edzett acél martenzitje tehát nagy keménységű, de ez nem feltétlen jellemző, az acélokban előforduló bármely martenzitre, hiszen acélokban előforduló martenzitek lehetnek lágyak is, mint például a maraging acélok lágy, nikkel martenzitje. Ezekben az ötvözetekben nincs karbon, így az edzést követően a martenzit intersztíciós keményítése elmarad. A maraging acélok felhasználásakor jellemző nagy szilárdságot, keménységet, az edzést követő megeresztés során létrejött finom és diszperz eloszlású intermetallikus fázisok adják, de ez a folyamat a martenzit kialakulásától már független. A harmadik kitétel, a rácshibák, jellemzően diszlokációk számának a növekedése okozhat keménység növekedést, de az ötvözetek többségénél egyéb hatások fognak inkább érvényesülni. A nem vasalapú ötvözetekben előforduló martenzitek keménysége a szintén változatos egyéb fémtani folyamatoknak köszönhetően szélsőséges értékek között változhat, mint ahogy azt az **1. Táblázatban** is láttuk.

2. DILEMMA: „A MARTENZITES ÁTALAKULÁS NEM CSÍRAKÉPZŐDÉSEL JÁRÓ ÁTALAKULÁS”- „A MARTENZIT CSÍRA RÁCSHIBÁK KÖRNYEZETÉBEN ALAKUL KI”

Ha felírjuk a martenzit fázis létrejöttéhez szükséges teljes energiaváltozást ($\Delta G^{A \rightarrow M}$) akkor az (1) egyenlethez jutunk (Otsuka & Wayman, 1998):

$$\Delta G^{A \rightarrow M} = E_c + E_s + E_e + E_p + E_d, \quad (1)$$

ahol E_c a kémiai tag, a nem kémiai tagok: E_s az új felület létrehozásához szükséges energia, E_e a rugalmas torzulás okozta energia, E_p a martenzit fázisban létrejött képlékeny alakváltozás energiája és E_d a határfelület mozgásából járó súrlódási –disszipatív energia.

Az egyenletből csírakepződéses növekedéses folyamatok analógiájára meghatározható a kritikus méretű martenzit képződésének feltétele. Az ehhez tartozó $\Delta G^{A \rightarrow M}$ érték olyan magas, hogy a homogén csírakepződés biztosan nem tud végbemenni, vagyis a martenzit csírák heterogén csírakepződéssel, már meglévő embriók segítségével keletkeznek. A gyakorlati megfigyelések azt igazolják, hogy ezek az embriók a rácshibák, melyek feszültség, alakváltozás vagy termikus rezgés hatására metastabil atomi elrendezésekből stabil martenzites csírává alakulnak, csírakepző szerepüket megtartva akár több hűtési-fűtési ciklusban is (lásd majd alakmemória ötvözetek és TRIP acélok).

3. DILEMMA: „A MARTENZITES ÁTALAKULÁS GYORS, MEGKÖZELÍTI A HANGSEBESSÉGET”- „A MARTENZIT NÖVEKEDÉSE FÉNYMIKROSKÓP ALATT MEGFIGYELHETŐ”

Az új fázis kialakulása az ausztenit és martenzit fázisok szabadenergia egyenlőségéhez tartozó T_0 hőmérséklethez képesti túlhűlés után indul meg M_s hőmérsékleten. Az adott hőmérséklethez tartozó martenzit fázis mennyisége ($V_{\alpha'}$) a (2) egyenlet szerint csak a hőmérséklettől függ, az időtől nem (természetesen a megfigyelő időskáláján belül).

$$1 + V_{\alpha'} = \exp\{b(M_s - T)\} \quad (2)$$

ahol $V_{\alpha'}$ a martenzit térfogathányada, b konstans, M_s a martenzit képződés kezdő hőmérséklete, T a hőmérséklet.

Ebből az következik, hogy ha a rendszert az M_s hőmérséklet alá nagy hőmérséklet különbséggel hűtjük, az átalakulás valóban nagyon gyors lesz. Ha a hűtési sebesség lassú, az átalakulás előrehaladása is lassú lesz. A kinetikai megfigyelések eredménye ötvözetektől függően eltérő is lehet. Az ötvözetek többségében, ha a martenzit kialakulását (hűtést) megszakítjuk, a martenzit kristályok növekedése megáll, a további hűtés során nem a meglévő martenzit kristályok növekednek, hanem ismét új martenzit csírák keletkeznek, ezek a nem termoelasztikus martenzitek. Izoterm körülmények között a martenzit hányad nem változik, ezek az atermikus martenzitek. Az elnevezés könnyen megtéveszti az olvasót, mert a kialakult martenzit mennyisége valójában függ az edzés hőmérsékletétől, ami ténylegesen hőmérséklet független, az az ausztenit/martenzit határfelület mozgási sebessége. Egyes ötvözeteknél a martenzit mennyiségének nagy része kialakul közvetlenül M_s hőmérséklet alatt (robbanásszerű kinetika) (Olson & Owen, 1992).

A kép teljessé tételéhez meg kell említeni, hogy néhány ötvözetnél termikus martenzites növekedés figyelhető meg, vagyis a térfogathányad növekszik izoterm körülmények között az idő múlásával. A növekedésre az Avrami-típusú átalakulásokhoz hasonló C görbe kinetika jellemző.

Ezen túl a kinetikát az is befolyásolja, hogy az átalakulás termoelasztikusan zajlik-e? (Lásd a reverzibilitásról szóló részt.) A termoelasztikus martenzitekre különösen jellemző, hogy az átalakulást gyakorlatilag a hőmérséklet változása szabályozza, vagyis lassú hűtési sebességnél elérhető lassú átalakulási sebesség is. Az adott egyensúlyi helyzethez tartozó martenzit hányad persze itt is közel hangsebességgel alakul ki.

4. DILEMMA: „A MARTENZITES ÁTALAKULÁS NEM REVERZIBILIS”- „AZ ALAKMEMÓRIA EFFEKTUS ALAPJA A REVERZIBILIS MARTENZITES ÁTALAKULÁS”

A martenzites átalakulás reverzibilis. Ha hűtés vagy mechanikai deformáció vagy mágneses tér változásának hatására létrejött martenzitet T_0 hőmérséklet fölé fűtjük, akkor egy adott A_s hőmérsékleten megkezdődik a martenzit vissza- vagyis az ausztenit kialakulása. Az átalakulási hiszterézis (A_s-M_s) nagysága ötvözet függő, lehet több száz és csak néhány fok is. A kis hiszterézissel átalakuló ötvözetek esetén a martenzit kialakulása kicsi mechanikai feszültséggel jár, a képlékeny alakváltozás elhanyagolhatóan kicsi a határfelületen (E_p), sőt a koherens martenzit/ausztenit határfelületnek köszönhetően az E_s is kicsi így az (1) egyenlet egyszerűsödik:

$$\Delta G^{A \rightarrow M} = E_c + E_e + E_d \quad (3)$$

Vagyis a martenzit növekedését, vagy hevítéskor a visszaalakulását a hőmérsékletre érzékeny szabadenergia, a rugalmas torzulási energia és a disszipatív energia egyensúlya szabályozza. Megszakított hűtés esetén a már kialakult martenzit kristályok a további hűtés során növekedésüket folytatják. Mivel a disszipatív energia az átalakulás mindkét irányában pozitív,

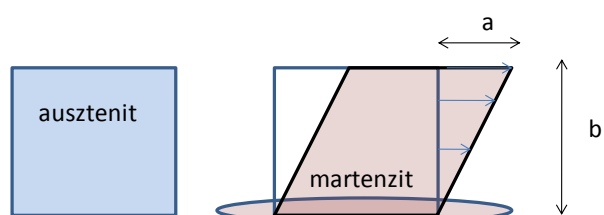
az átalakulást végső soron az entalpia és a rugalmas torzulási energia egyensúlya irányítja. Innen származik a „termoelasztikus” kifejezés. A termoelasztikus martenzites átalakulás az alakmemória effektus alapja.

A nem termoelasztikus martenzites átalakulások hiszterézise akár több száz fokot is elérheti. A martenzit létrejöttét kísérő mechanikus feszültség akár a folyáshatár értékét is meghaladhatja, így az átalakulás energiaszükségletének nagy hányada fordítódik a martenzit/ausztenit határon végbemenő képlékeny alakváltozásra (E_p). Ennek hatására a határfelület koherenciája drasztikusan lecsökken, ezáltal szintén emelve az átalakulásnak az új felület létrehozására fordítandó energia igényét (E_s). A kevésbé koherens határfelület mozgása a disszipatív járulékot is jelentősen megemeli, ezáltal a visszaalakulás (A_s) csak a T_0 -hoz képesti jelentős túlhevítés után történik meg.

Karbonacélok martenzites átalakulásának irreverzibilitását viszont, ahogy a nagy keménységet is, a karbon jelenléte okozza, melynek hatására a martenzit visszaalakulását megelőzi egy termikusan aktivált csíráképződéses- növekedéses folyamat, a karbidkiválás.

A martenzites átalakulás reverzibilitását ötvözetből függő fémtani folyamatok leronthatják, ezek a jelenségek az öregedési folyamatokhoz tartoznak. Ennek megfelelően a reverzibilitás ciklusszáma szintén ötvözetfüggő, 1-től akár a millióig is terjedhet.

5. DILEMMA: „A MARTENZIT FÁZIS TÚ ALAKÚ”- „LEMEZES ÉS LÉCES MARTENZITEK”



1. Ábra A martenzit alakja mindig vékony lemez, vagy lécs

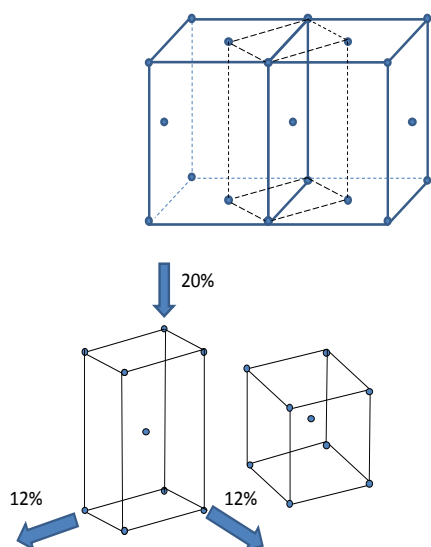
A martenzit létrejöttét egy erős rugalmas és képlékeny deformáció kíséri. Az **1. Ábra** mutatja a kiinduló ausztenit fázist majd a deformáció következtében létrejött martenzit fázist. A martenzit létrejöttét egy a/b értékű nyírási alakváltozás kíséri, mely a térfogatban állandó, ehhez egy b

irányú húzás is társulhat. A valós elmozdulás nagysága viszont a nyílak szerinti mértékben változik. Az alakváltozási energia akkor a legkisebb, ha a tényleges elmozdulás a legkisebb, ez pedig egy vékony, hegyes végű lemez esetén alakul ki. A tú morfológiáját cáfolja az is, hogy a mikroszkópi metszeteken soha nem látunk kör, vagy ellipszis alakú martenzit metszeteket. Ennek ellenére a magyar nyelvben a tú fogalom terjedt el, és valószínű nem is fog megváltozni, én magam is használom ezt a kifejezést.

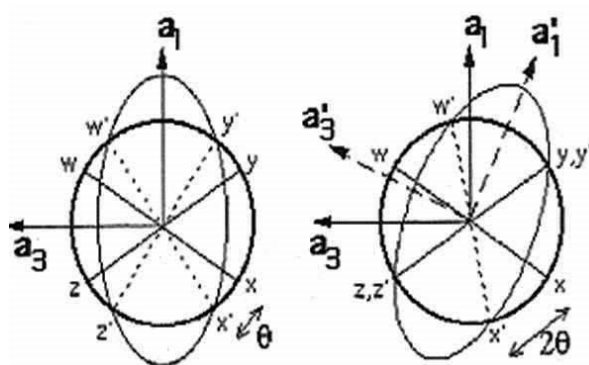
6. DILEMMA: „KARBONACÉLOKBAN AZ AUSZTENIT/MARTENZITES ÁTALAKULÁST KRISTÁLYTANILAG A BAIN MODELL ÍRJA LE”- „A BAIN MODELL NEM ELÉGSÉGES A MARTENZITES ÁTALAKULÁS LEÍRÁSÁHOZ”

Az átalakulás eddig leírt jellemzői csak bizonyos feltételek esetén tudnak teljesülni. Ezen feltételek közül a leg súlyosabb, hogy a határfelületnek koherens könnyen mozgó felületnek kell lennie. Bizonyított, hogy ez akkor lehetséges, ha van legalább egyetlen olyan vonal (ami

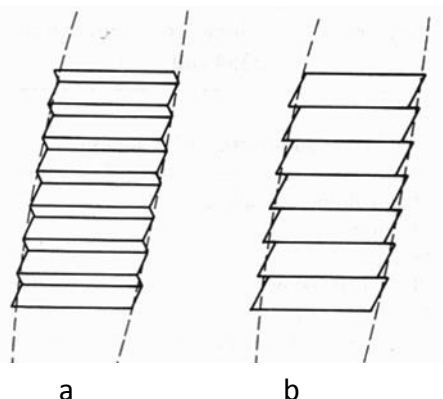
igazából egy sík) a határfelületen, amely az átalakulás során nem szenved változást, (invariant plain) nyomást, húzást és forgatást. A Bain modell leírja azt a legkisebb alakváltozást, amelyik a felületen középpontos ausztenitből térben középpontos martenzit fázist hoz létre.



2. Ábra A Bain féle alakváltozás (Cahn & Haasen, 1996)



3. Ábra A Bhadeshia Bain féle modelljének kiegészítése (Bhadeshia, 2001)



4. Ábra A martenzit tűk szubszerkezete. Ikerkristályok a) és csúszási síkok b) a martenzit tűn belül (Verhoeven, 1975)

A 2. Ábra szerint könnyen belátható, hogy a felületen középpontos rács (az ábrán nincs az elemi cellára jellemző minden atom feltüntetve) hiány nélkül leírható térben középpontos tetragonális elemi cellával is. Ha ezt az elemi cellát hossz tengelye irányából kb. 20% alakváltozást okozó nyomásnak, míg másik két tengelye irányából azonos értékű húzásnak tesszük ki, akkor megkapjuk a martenzitre jellemző térben középpontos kockarácsú elemi cellát. Ebből adódóan szoros kristálytani kapcsolatokat lehet felírni az ausztenit és martenzit fázis között, illetve a határfelületet reprezentáló ún. habitus sík is definiálható (Kurdjumov–Sachs, Nishiyama–Wasserman, Greninger–Troiano) (Cahn & Haasen, 1996).

Orientációs méréstechnikákat alkalmazva a gyakorlati mérések nem igazolják ezeket a feltételeket, a kapott Miller indexekre rendre irracionális számok adódnak (Verhoeven, 1975). A Bain modell további problémákat is felvet, melyet a 3. Ábra segítségével könnyen meg lehet érteni. Az ausztenit fázist reprezentálja egy $wx=yz$ átmérőjű gömb, melyet a Bain féle alakváltozás egy ellipszoiddá torzít. Azt tapasztaljuk, hogy egyedül a $wx=yz$ vonalak torzítás mentesek, viszont egy forgatással új pozícióba kerültek $w'x',y'z'$. Vagyis nem teljesül a minimumfeltétel az átalakulás során. A Bain modell akkor írja le a valóságot, ha a Bain féle alakváltozáson

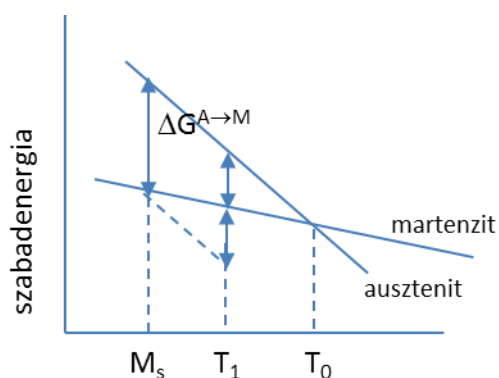
túl van egy merev test elforgatás is, ezáltal a zy vonal változatlan az átalakulás során. Ahhoz,

hogy változatlan sík is legyen, kell legalább kettő nem párhuzamos változatlan vonal, ami mint az ábrából is kitűnik, nincsen. Vagyis a felületen középpontos kocka $\leftrightarrow$ térben középpontos kocka átalakulás homogén deformációval nem tud végbemenni. A gyakorlati megfigyelések is ezt támasztják alá, hogy a martenzit képződése inhomogén alakváltozással, diszlokációs csúszással vagy ikerképződéssel megy végbe. Ezt a morfológiát mutatja a **4. Ábra**.

7. DILEMMA: „A MARTENZIT HÚTÉS HATÁSÁRA JÖN LÉTRE”- „MECHANIKUSAN INDUKÁLT MARTENZITEK”

A martenzit kialakulhat (mint láttuk) hűtés, vagy mechanikai igénybevétel hatására. Az igénybevétel segítheti, de akadályozhatja is a képlékeny alakváltozáshoz hasonló módon végbemenő folyamatot. Ha a külső igénybevétel segíti a rács átbillenést, akkor az átalakulás az M_s hőmérséklet fölött (de természetesen T_0 alatt) az ún. M_d hőmérsékleten is megindulhat (lásd következő fejezet részletesen). Ezek a feszültség és/vagy alakváltozás indukálta martenzites átalakulások, melyek kulcsszerepet játszanak az alakmemória ötvözetek, a TRIP és TWIP acélok felhasználása során. Az alakmemória ötvözetek egy része szuperelasztikus (vagy más néven pszeudoelasztikus) viselkedésre is képes. Ekkor a mechanikai igénybevétel hatására nemlineáris, nagymértékű, reverzibilis alakváltozás kíséri a martenzit át- és visszaalakulását. A külső feszültségtér alkalmazása nem csak az átalakulási, de a csíráképződési folyamatokra is hatással van. A teljesség kedvéért jegyzem meg, hogy mágneses ötvözetekben a mágneses domének mozgása, vagy polimereknél akár fény irritáció is kiválthatja az átalakulást.

TERMOMECHANIKUS KEZELÉS HATÁSA A MARTENZITES ÁTALAKULÁSRA



5. Ábra Az átalakulás kémiai szabadenergiájának hőmérséklet függése a mechanikai hajtóerő értelmezése

A martenzit létrejöttének jellege, illetve az azt kísérő mikroszkópikus/makroszkópikus deformáció miatt külső mechanikai feszültség alkalmazása az átalakulás létrejöttét segítheti. Ilyenkor a kémiai hajtóerőhöz (mely M_s alatt lineárisan növekszik a hőmérséklet csökkenésével- **5. Ábra**) egy mechanikai hajtóerő is adódik, ezáltal az átalakulás már egy M_s hőmérséklet felett, de M_d hőmérséklet alatt is végbemehet. A mechanikai hajtóerő nagysága a csúszósíkon meghatározható kritikus feszültség analógiájára meghatározható, függ a külső feszültségtől és martenzit kristálytani orientációjától (Cahn & Haasen, 1996).

Kísérletek során megfigyelték, hogy a martenzit kialakuláshoz szükséges kritikus feszültség hőmérséklet függése az M_s és M_s^σ hőmérsékletek között lineáris ahogyan a **6. Ábra** mutatja. M_s^σ hőmérsékleten az ausztenit fázis képlékeny alakváltozása megkezdődik (kék görbeszakasz). E feletti hőmérsékleteken egészen M_d hőmérsékletig a martenzit képződés (piros görbeszakasz) együtt jár az ausztenit képlékeny alakváltozásával. Ennek megfelelően az M_s^σ hőmérséklet alatti folyamatokat feszültség indukálta (fekete görbeszakasz), a felettieket pedig alakváltozás indukálta átalakulásoknak hívjuk, melynek felső határa az M_d hőmérséklet, ami felett a martenzit már mechanikai hajtóerő alkalmazása mellett sem jön létre. Az alakváltozás indukálta átalakulások feszültségének idő függése már nem lineáris (piros görbeszakasz). Értéke kezdetben az ausztenit folyáshatárához közeli, majd a hőmérséklet növekedésével egyre inkább meghaladja azt. A mechanizmus fémtani magyarázata még sok nyitott kérdést tartalmaz. A görbe növekvő jellegét nyilván az adja, hogy a hőmérséklet növekedésével a kémiai hajtóerő egyre kisebb, így a mechanikai hajtóerőnek egyre nagyobbak kell lenni. A mechanizmus legvalószínűbb magyarázata az, hogy az ausztenit képlékeny alakváltozása során létrejövő hibaszerkezet kedvező feltételeket teremt a martenzit csíra kialakulásához, illetve a rácshibák (tipikusan a diszlokációk) feszültség tere kedvez a feszültség indukálta mechanizmusnak (lásd TWIP hatást mutató acélok, és termoelasztikus alakmemória ötvözet eredményei). A termikusan létrejött martenzit folyásának feszültség függését a **6. Ábra** vonalain a zöld görbe reprezentálja, mely szintén lineárisan változik. A feszültség indukálta átalakulási szakaszra, egytengelyű igénybevétel esetén érvényes az ún. Clausius-Clapeyron összefüggés (Otsuka & Wayman, 1998):

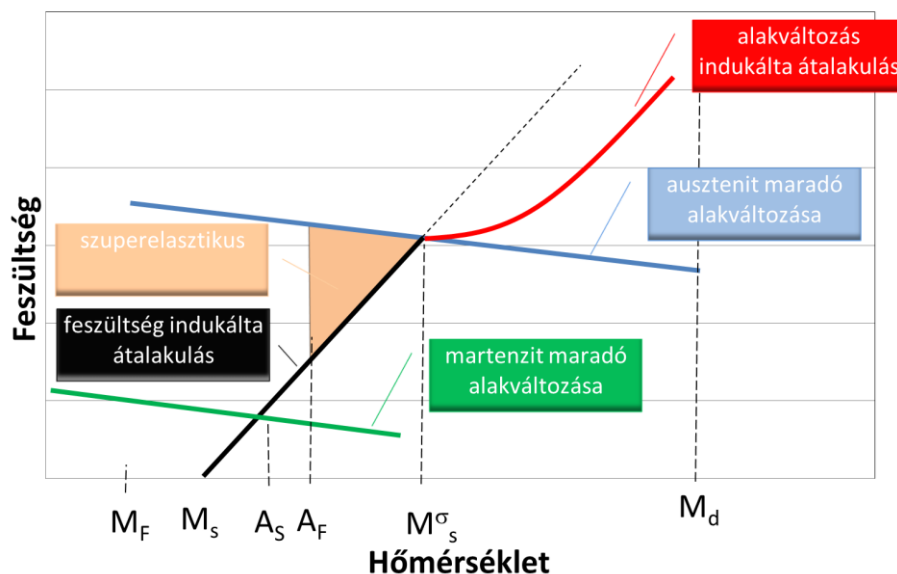
$$\frac{d\sigma}{dT} = -\frac{\Delta S}{\varepsilon} = -\frac{\Delta H}{\varepsilon T} \quad (4)$$

Ahol σ - az egytengelyű feszültség, ε - az átalakulási alakváltozás, ΔS térfogategységenkénti entrópia változás, ΔH a térfogategységenkénti entalpiaváltozás az átalakulás során.

Az ábrának még egy nagyon fontos tartománya van, hevítés közben az ausztenit kialakulásának kezdő (A_s), illetve befejező hőmérséklete (A_f) felett, de az ausztenit képlékeny alakváltozásának megindulása előtt, bizonyos ötvözetek ún. szuperelasztikus viselkedésre is bírhatók. A viselkedés hőmérséklet-feszültség technológiai ablak mérete különösen fontos bizonyos alkalmazások során.

Az itt bemutatott jelenségek mindegyikéhez kötődik az értekezésben leírt kutatási eredmény. Az alakváltozás indukálta átalakulás a TRIP/TWIP acélok fémtani problémáinál, a feszültség indukálta effektus a CuAlNi alapú alakmemória ötvözetnél, míg a szuperelasztikus viselkedés a Ni-Ti ötvözetcsaláddal kapcsolatos kutatási eredményeknél játszik fontos szerepet. A martenzites átalakulás általában már egy jól leírt, ismert folyamat ezeknél az ötvözeteknél. A kutatások általában nem az átalakulásra, hanem az ötvözetspecifikus, az átalakulást befolyásoló tényezők vizsgálatára irányulnak. Ezek jellemzően az öregedési folyamatok, a termomechanikus kezelések, a ciklusszám, vagy például a sugárkárosodás hatása. Ezek a

tényezők felléphetnek magának az ötvözetnek vagy a szerkezeti-funkcionális elemnek az előállítására, de a működési folyamata során is.



6. Ábra Termomechanikus kezelések hatására végbemenő folyamatok (Otsuka & Wayman, 1998) után)

ELVÉGZETT VIZSGÁLATOK

A termomechanikus kezelés hatását a termoelasztikus és nem termoelasztikus martenzites átalakulásokra Ni-Ti, Cu-Al-Ni(Mn,Ti,Fe) alakmemória ötvözeteken és TRIP/TWIP hatást mutató ausztenites acélokon vizsgáltam.

NI-TI ÖTVÖZET

A Ni-Ti ötvözetben végzett saját kísérletek során a szuperelasztikus viselkedést befolyásoló tényezőket elemeztük, kerestük azt a technológiai ablakot, amivel a szuperelasztikus viselkedés tartománya kiszélesíthető. Ha a 6. Ábra szerint megvizsgáljuk a szuperelasztikus tartomány határát, akkor azt látjuk, hogy a szuperelasztikus terület akkor növelhető, ha:

- ☹ csökken a Clausius-Clapeyron egyenes meredeksége,
- ☹ nő az ausztenit folyáshatára (M^{σ}_s),
- ☹ csökken az A_F hőmérséklet.

Ezért azon technológiai paramétereket változtattuk, amelyek ezekre a tényezőkre hatással lehetnek. Konkrétan a következő kérdésekre kerestük a választ:

- ☹ A Ni tartalom hatása. Ehhez 54,5, 55,2 és 55,6 w% nikkel tartalmú ötvözeteket választottunk.

- ⊗ A martenzites állapotban megnövelt rácshibák számának a hatása. Ehhez a minták egy részét cseppfolyós nitrogén hőmérsékletére hűtöttük és hengereltük (marform-MF) 41% és 63% mértékben.
- ⊗ Öregítő hőkezelés hatása. 350 és 550°C-os, rövidebb és hosszabb idejű hőkezeléseket alkalmaztunk mind a hengerelt, mind az attól mentes darabokon.

A vizsgált *Ni-Ti* ötvözetek összetételét a **2. Táblázat** mutatja, jellemzően a Ni tartalomban van eltérés. A tesztkezeléseket pedig a **3. Táblázat** foglalja össze.

Az ötvözeteket a tesztkezelések előtt ún. homogenizáló hőkezelésnek vetettük alá (SHT), mely az egyenletes homogén ausztenit (β) kialakulását eredményezi, majd az ezt követő gyors hűtés (a diffúziós folyamatokat eliminálva) az ausztenites állapotú koncentráció eloszlást rögzíti szobahőmérsékleten is.

2. Táblázat m/m%

Ni	Cu	Fe	C	O	Ti
55,2	<0,03	<0,05	0,076	0,05	maradék
55,6	<0,03	<0,05	0,055	0,08	maradék

A kezelt minták átalakulási hőmérsékleteit és karakterisztikáját DSC vizsgálattal (A_s -ausztenit kezdő, A_f -ausztenit befejező, M_s -martenzit kezdő, M_f -martenzit befejező hőmérsékletek, csúcshőmérsékletek, entrópia), a szövetszerkezetét fény- és átvilágítós elektronmikroszkópiával (hibaszerkezet, szemcseszerkezet, második fázis megjelenése), a szuperelasztikus viselkedést és a konvencionális folyáshatárt széles hőmérséklet tartományban végzett szakítóvizsgálattal jellemeztük. Az ausztenit folyáshatárát minden esetben a közel 200°C-on törésig végzett vizsgálatból határoztuk meg, a martenzitét pedig az adott állapotra jellemző hőmérsékleten vettük fel. A feszültség hiszterézis vizsgálatokat 4-6 db izotermán végeztük el, a 200°C-on felvett görbe adatai alapján kiválasztott hőmérsékleteken, úgy, hogy a teszt hőmérséklet az M_s és az A_f hőmérséklet közé essen.

3. Táblázat

Mintajel	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ni, m/m%	54,5	55,2	55,6	55,6	55,6	55,6	55,6	55,6	55,6	55,2
Marform, %								41	41	63
Öregítés hőmérséklet, °C				350	550	550	550	550	550	550
Öregítés idő, perc				60	6	60	6000	6	60	6
Szemcseméret, μm	-	45	45	45	45	45	45	0,07	0,01	0,06
Ni_4Ti_3 mérete, nm	-	-	-	19,6	79	298	2092			

A témában végzett kutatásokat a bochumi egyetemen (Institut für Werkstoffe-Werkstoffwissenschaft, Ruhr Universität Bochum, Universitätsstrasse 150, D-44780 Bochum, Németország) végeztem Prof.em. Dr.-Ing. Erhard Hornbogen kutatócsoportjában 1999 októberében, mikor is második alkalommal nyertem el a Volkswagen Alapítvány ösztöndíját.

Az eredményekről a következő sorszámú saját publikációk számolnak be: [5,6].

Cu-AL-NI ALAPÚ ALAKMEMÓRIA ÖTVÖZETEK

A Cu alapú alakmemória ötvözetek sok tekintetben nem vehetik fel a versenyt a Ni-Ti ötvözetekkel, kivétel az ár, hiszen a rézalapú ötvözetek lényegesen olcsóbbak. Bizonyos alkalmazásoknál szintén előnyt élvez a magas átalakulási hőmérséklet is, de szilárdsági paramétereik alul maradnak a Ni-Ti ötvözeteknek, ezért az ötvözetfejlesztések is ebbe az irányba mutatnak. Kutatásaim során két ötvözet típussal foglalkoztam a Cu-Al-Ni családból. Az egyik ötvözet (CuAlNiMnTi) esetében az Al tartalom határozza meg az átalakulási hőmérsékletet, a mátrixban oldódó Mn és Ni a hőmérsékletre szintén hatással van és a szilárdságot növeli, míg a Ti finom (Al-Ni-Ti) kiválásokkal a szemcsefinomítást biztosítja. A másik ötvözet (CuAlNiMn illetve a CuAlNiMnFe) esetében a Mn és Fe az ötvözet szívósságát növelendő került alkalmazásra.

Vizsgálatainkkal a martenzites és ausztenites állapotú termomechanikus kezelések hatását kutattuk. A vizsgált ötvözetek összetételét a **4. Táblázat** mutatja. Az elvégzett legjellemzőbb kísérleteket pedig az **5. Táblázat** foglalja össze.

A minták szerkezetvizsgálata fénymikroszkóppal, in situ hevítőmikroszkóppal, pásztázó és átvilágítós elektronmikroszkóppal és röntgendiffrakciós technikával történt. Az átalakulási hőmérsékletek meghatározása DSC vizsgálattal, a mechanikai jellemzőké keménység méréssel történt.

4. Táblázat, m/m%

Al	Ni	Mn	Ti	Fe	Cu
11,87	5,07	2,01	1,01	-	maradék
10,2	4,92	4,12	-	-	maradék
9,9	4,85	4,16	-	1,92	maradék

A CuAlNiMnTi ötvözetben végzett kutatások egy részét a bochumi egyetemen (Institut für Werkstoffe-Werkstoffwissenschaft, Ruhr Universität Bochum, Universitätsstrasse 150, D-44780 Bochum, Németország) végeztem Prof.em. Dr.-Ing. Erhard Hornbogen kutatócsoportjában 1998 május-november időszakban, mikor is első ízben nyertem el a Volkswagen alapítvány ösztöndíját. Az izoterm hőkezelési vizsgálatokat az Anyagtudományi

Intézetben az ösztöndíj lejártával végeztem el. Mészöly Zsófia mérnökfizikus hallgató 1999-ben készített a témavezetésemmel diploma dolgozatot a témában.

A CuAlNi, CuAlNiMn és CuAlNiMnFe ötvözetekre vonatkozó vizsgálatokat, az *in situ* hevítőmikroszkópos vizsgálatokat Dr. Benke Mártonnal végeztük, aki a témavezetésemmel a témában PhD fokozatot szerzett 2010-ben. TEM és nagyfelbontású SEM vizsgálatok a Bay Nano Intézetben történtek.

A hazai kutatásokat a következő projektek támogatták:

- ⊕ Rugalmas és veszteségi szabadenergia járulékok valamint a termodinamikai egyensúlyi hőmérséklet meghatározása martenzites átalakulásokban- OTKA 49513,
- ⊕ Fémes anyagok fázisátalakulásainak modellezése és kísérleti vizsgálata OTKA 68129,
- ⊕ Termomechanikus kezelések hatására végbemenő termoelasztikus és nem termoelasztikus martenzites átalakulások OTKA 84065.

Az eredményekről a következő sorszámú saját publikációk számolnak be: [1,2,10,11,13,14,16,18,19,21,22,23,25,26,27,30,33,36].

5. Táblázat

Ötvözet	Termomechanikus kezelés
CuAlNiMnTi	Martenzit sajtolás: 1,3,7,18 kN-os sajtón
	Auszténit hengerlés: T=190,400,450,500,550,600,650,700,850,950°C-on, mindegyik hőmérsékleten 40%-os alakítás (vastagságcsökkenés: $\ln(d_0/d_1)=0,4$)
	Auszténit hengerlés: T=700°C-on 20,30,40,50,80 %-os alakítás
	Auszténit alakítás + hőkezelés (öregítés): 60°C 1 nap, 300°C, 30 sec
	Izoterm hőkezelés (öregítés): ⊕ 100-950 °C, 50°C-onként, 5 perc ⊕ 300, 200°C- 2 óra ⊕ 400°C-on 15,30,60,120 perc
CuAlNi	⊕ Izoterm hőkezelés: 300°C-on 1,2,4,8,16,32,64 perc
CuAlNiMn	⊕ DSC ciklizálás
CuAlNiMnFe	⊕ In situ hevítőmikroszkópos ciklizálás

AUSZTENITES TRIP/TWIP ACÉLOK

Auszténites acélokban is létrejöhet a martenzites átalakulás hőmérsékletváltozás (T_0 -hoz képesti túlhűtés), feszültség és alakváltozás hatására, viszont az alakmemória ötvözetekkel szemben nemcsak az átalakulás közbeni effektust használjuk ki, hanem az átalakulási termék megjelenése okozta változást is, leginkább a mechanikai tulajdonságokban. A felületen

középpontos kockarácsú ausztenites acélokban az átalakulási termék a térben középpontos kocka rácsú α' martenzit vagy a nem ferromágneses hexagonális ϵ martenzit. Az alakváltozás hőmérsékletétől, mértékétől, és az acél összetételétől függően az ϵ martenzit továbbalakulhat α' martenzitté is. A három fázis eltérő rács típusának, a rétegződési hiba energiájának köszönhetően a térfogatarányok (amit szintén a technológiai paraméterek határoznak meg) függvényében, igen változatos mechanikai tulajdonságok érhetők el. Ezen alapul az ún. TRIP és TWIP hatás. A TRIP hatást 1.4301 (AISI104) minőségű míg a TWIP hatást saját fejlesztésű acélon vizsgáltuk.

A vizsgált TRIP acél összetételét a **6. Táblázat** mutatja, mely szobahőmérsékleten tisztán ausztenites, nem a klasszikus TRIP acél. Az új, főleg a járműipar számára fejlesztett TRIP acélok általában ferrit, bénit és karbondús maradék ausztenitet tartalmaznak, magasabb Si és C tartalmuk van, interkritikus izzítást követő szabályozott véghőmérsékletű hengerléssel állítják őket elő. Mivel a kutatómunka célja nem acélfejlesztés volt, hanem az adott fémtani folyamatok jobb megértése, ezért választottuk ezt az egyszerűbb ötvözetet modellanyagnak. A vizsgálat során $-196^{\circ}\text{C} \dots +160^{\circ}\text{C}$ -os hőmérséklet tartományban, 14 izotermán végeztünk húzóvizsgálatot, mindegyik izotermán a maximális egyenletes nyúlás határáig illetve két kisebb mértékkel húzva a hengeres mintatesteket. A termikus martenzit ezekben az ötvözetekben nem jelenik meg. A keményedési hajlamot a valódi feszültség-természetes nyúlás görbékből határoztuk meg. Az ilyen módon terhelt mintákat szobahőmérsékletre hűtöttük, szövetszerkezet vizsgálatot, röntgendiffrakciós fázismennyiség és anizotrópia (textúra) vizsgálatot végeztünk.

6. Táblázat, m/m %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti	Mo
0,04	0,45	1,42	0,042	0,01	18,93	10,77	0,16	0,18

A vizsgálataink újszerűségét az adta, hogy nemcsak a képlékenyalakítás hatására bekövetkező fázisátalakulások tényét és milyenségét vizsgáltuk, hanem figyelembe vettük azt a tényt is, hogy a kristálytanilag orientált fázisátalakulás mellett egyéb folyamatok, jelen esetünkben az alakítási textúra kialakulása is zajlik. Feltételeztük, hogy a kétfajta folyamat egymásra hatással van, ezért nemcsak a térfogatarányok változását, hanem az ausztenitnek és az α' martenzitnek az alakítás és a közben zajló átalakulásnak a textúrában kifejtett változását is vizsgáltuk.

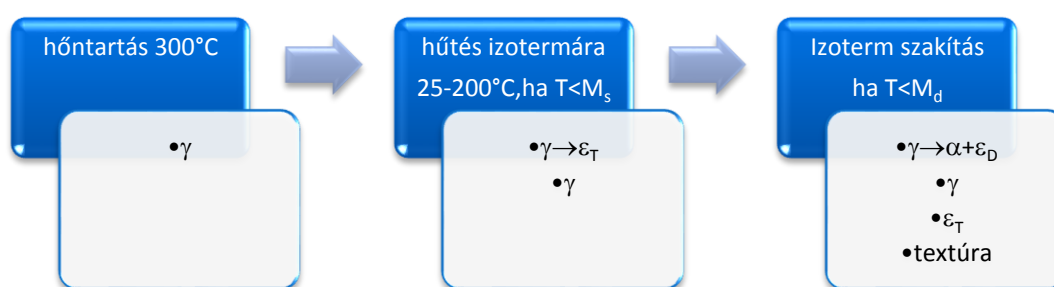
A TWIP hatást mutató ötvözetnek összetétele alapján jellemzően alacsonyabb a rétegződési hiba energiája, ezért ezekben az acélokban a parciális diszlokáció, az ikerképződés, a hexagonális martenzit (ϵ martenzit) könnyen kialakulhat akár hűtés, akár mechanikai igénybevétel hatására is. A térben középpontos rácsú (α') martenzit viszont hűtéssel csak szobahőmérséklet alatt, a fölött csak mechanikus igénybevétel hatására jöhet létre.

A vizsgált, jellemzően különböző króm tartalmú ötvözetek összetételét a **7. Táblázat** tartalmazza.

7. Táblázat m/m%

	C	Mn	Cr	Si	P	S
acél 1	0,026	17,7	2,26	0,1	0,0051	0,029
acél 2	0,028	18	0,07	0,03	0,0081	0,025
acél 3	0,08	17,7	6,12	0,06	<0,003	0,025
acél 1R	0,016	18,25	0,13	0,05	0,04	0,03
acél 3R	0,079	21,03	6,53	0,07	0,03	0,025

Az acélokból szabványos hengeres próbatestek készültek melyeket 1000°C-on argon atmoszférában homogenizáltuk, vízben edzettük. A termomechanikus kezelést különböző hőmérsékletű klímakamrában történő törésig végzett egytengelyű húzó igénybevétellel valósítottuk meg. A választott izotermák 200,180,160,140,125,110 és 40°C voltak. Az adott izotermát minden esetben egy 300°C-os hőntartás előzött meg, majd a kamrát az adott hőmérsékletre hűtöttük vissza. Ezáltal mindig A_f hőmérséklet fölött indult a kísérlet. Miután a rendszer felvette az izoterma hőmérsékletét, elszakítottuk a mintát és törés után szabadlevegőn hűlt. A választott izotermának megfelelően változatos, kellően komplex szövetszerkezet alakulhat ki a folyamat végén. Egy lehetséges végkimenetet mutat a **7. Ábra**: ha az izoterma az M_s alatt van, akkor a hűtés közben még a szakítás megkezdése előtt kialakulhat valamennyi ε martenzit. A szakítás során pedig mechanikusan indukált ε martenzit, illetve α' martenzit is létrejöhet, miközben a meglévő szövetelemek alakváltoznak, ezért alakítási textúra szintén felépülhet.



7. Ábra TWIP acélok termomechanikus kezelése

A különböző módon kezelt mintákon fény és átvilágítós elektronmikroszkópos vizsgálatot, röntgendiffrakciós fázismennyiség és textúra vizsgálatot, TEM orientációs vizsgálatot, DSC ciklizálást és bomlásvizsgálatot, in situ hevítőmikroszkópos ciklizálást végeztünk a Miskolci Egyetemen és a Bay Nano Intézetben. Az ötvözeteket a Freibergi Egyetemen készítették. A témában Dr. Nagy Erzsébet szerzet PhD fokozatot a témavezetésemmel 2007-ben.

A hazai kutatásokat a következő projektek támogatták:

- ☹ Mikro-, makroszerkezet és a feszültség állapot hatásának vizsgálata martenzites átalakulásnál alakmemória ötvözetben és TRIP acélokban, FKFP 0096/2001.,
- ☹ Bolyai János kutatói ösztöndíj,
- ☹ Rugalmas és veszteségi szabadenergia járulékok valamint a termodinamikai egyensúlyi hőmérséklet meghatározása martenzites átalakulásokban- OTKA 49513.
- ☹ Termomechanikus kezelések hatására végbemenő termoelasztikus és nem termoelasztikus martenzites átalakulások- OTKA 84065

Az eredményekről a következő saját publikációk számolnak be: [3,4,7,8,9,12,15,17,20,28,29,32,34,35,37,38,39].

AUSZTENITES SAVÁLLÓ ACÉL KÁROSODÁSVIZSGÁLATA

Az ausztenites saválló acélok fő ötvözője az ausztenitképző nikkelt és a savállóságot biztosító ferritképző króm. E mellett mangánt, szilíciumot, molibdént, titánt, korbont és az acélok szokásos szennyezőit tartalmazhatják. A króm és nikkelt ekvivalens ötvöztartalom függvényében ezek az acélok ausztenit, martenzit, ferrit (külön-külön vagy együttesen) szövetűek lehetnek. A karbon és karbidképző tartalom függvényében a karbidkiválás szintén végbemehet ezekben az ötvözetekben, mely közül a króm karbid kiválása kerülendő. Ezért a krómtól erősebb karbidképzők adagolása gyakori, tipikus a titán. A legelterjedtebb saválló acélok ausztenitesek. A savállóságot kétféle mechanizmus, az alaplátrixban oldódó króm és a felületi króm-oxid biztosítja. Termomechanikus kezelések, igénybevételek során ezekben az ötvözetekben a martenzit fázis megjelenése illetve a fent említett kiválási folyamatok fordulhatnak elő. Kutatásaink során pirolízis kemence ausztenites saválló acél csőrendszerének üzem közbeni tönkremenetelésének (lyukadásának) körülményeit vizsgáltuk. A tézisben megfogalmazott eredményekhez kapcsolódó vizsgálatok fény- és pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok, röntgendiffrakciós fázisazonosítás, mikrokeménység mérések a Miskolci Egyetemen történtek.

8. Táblázat m/m%

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	V
0,054	1,83	0,32	0,017	0,030	17,5	10,66	0,14	0,45	0,41	0,086

A kutatást a Nemzeti Kutatási és Technológiai Hivatal támogatta a Mechatronikai és Anyagtudományi Kooperációs Kutatási Központon keresztül. Konzorciumi tag volt a MOL csoport tag TVK NyRt. A projektnek témavezetője voltam, résztvevő intézmény volt még az

Áramlás és Hőtechnikai Gépek Tanszéke akik a kemence hőtechnikai modelljét készítették, a Kémia Tanszék, ahol a kémiai elemzéseket Dr. Bánhidi Olivér készítette

Az eredményekről a következő saját publikációk számolnak be: [24,31,40].

TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK TÉZISEI

A bevezetőben megfogalmazott kérdésekre a válaszokat a következő tézisekben foglalom össze:

1. NI-TI SZUPERELASZTIKUS VISELKEDÉSE

Kísérletileg igazoltam, hogy Ni-Ti ötvözet (54,5; 55,2; 55,6 m/m% Ni) szuperelasztikus viselkedésének hőmérséklet-mechanikai feszültség tartománya termomechanikus kezeléssel kiterjeszthető, akkor, ha a martenzites állapotú alakítás eredményeként megnövekedett folyáshatárú ausztenitben nikkelen gazdag, finom, koherens kiválások jönnek létre. Ekkor a mátrix nikkeltartalmának csökkenését az ausztenit folyáshatárának növekedése, a Clausius-Clapeyron egyenesek meredekségének csökkenése kompenzálja, így a szuperelasztikus tartomány szélesedik.

2. CU-AL-NI+ ALAKMEMÓRIA ÖTVÖZET MAGASHŐMÉRSÉKLETŰ ALKALMAZÁSA

- 2.1. Cu-Al-Ni alapú alakmemória ötvözeteken végzett nagyszámú kísérlet alapján igazoltam, hogy létezik olyan ausztenites állapotú termomechanikus kezelés melynek alkalmazásával az átalakulási hőmérsékletek széles tartományban változtathatók. Az alakítási mérték adott határig történő növelésével – a hiszterízis érték megtartása mellett – az átalakulási hőmérsékletek csökkennek. Túl magas alakítási mérték esetén megújulási folyamatok mennek végbe, ami az átalakulási hőmérsékleteket növeli, míg alacsony alakítási hőmérséklet esetén az átalakítási hajlam teljes elvesztése következik be.
- 2.2. Bizonyítottam, hogy a magashőmérsékletű alkalmazás szempontjából kiemelt fontosságú ciklusállóság legkisebb az alakított minta esetében az öregített mintához képest. Igazoltam, hogy a legnagyobb magas hőmérsékletű ciklusállósággal a CuAlNiMnTi és a CuAlNiMnFe ötvözetek rendelkeznek, legkisebbel a CuAlNi, míg köztes értékkel az ausztenites állapotban 40%-kal alakított CuAlNiMnTi ötvözet.
- 2.3. Igazoltam, hogy a nem megfelelő ciklusállóság oka: a vizsgált CuAlNiMnTi, CuAlNiMn, CuAlNiMnFe ötvözetekben Avrami kinetika szerint végbemenő bénites átalakulás, jellemzően a 250-500°C-os tartományban, mind hevítés, mind hűtés, mind izoterm körülmények között. A bénites átalakulás vezető fázisa az intermetallikus fázis, amelynek megjelenése az alakmemória effektust tönkreteszi. Ennek a folyamatnak a szempontjából a három ötvözet közül a Ti

ötvöztetés a legellenállóbb, vagyis alakmemória alkalmazás tekintetében kevésbé korlátozott a felhasználása, mint a másik két ötvözetnek.

3. TERMOMECHANIKUS KEZELÉSEK ÉS A TERMOELASZTIKUS ÉS NEM TERMOELASZTIKUS MARTENZITES ÁTALAKULÁSOK

- 3.1. Kísérletekkel bizonyítottam, hogy az alakmemória ötvözetek felhasználása szempontjából rendkívül fontos paraméternek, a hiszterézisnek az értéke termomechanikus kezeléssel jelentősen változtatható. Cu-Al-Ni-Mn-Ti ötvözetben megmutattam, hogy kétféle ún. „első ciklus” hatás lehetséges: a martenzites állapotú alakítás a termoelasztikus martenzitet stabilizálja, így a visszaalakulás hőmérsékletét és ezzel együtt a hiszterézis értékét is növeli (I. típusú „első ciklus” hatás); míg az ausztenites állapotban történő alakítás, vagy edző hatású hűtés, mely a martenzit irányítottságát illetve vakancia koncentrációját növeli, ezzel annak visszaalakulását elősegíti (II. típusú „első ciklus” hatás).
- 3.2. TWIP acélon végzett kísérletekkel igazoltam: ha a nem termoelasztikus martenzit egy erősen alakított ausztenitből jön létre, akkor a hűtés közben, létrejövő (orientált, könnyebben visszaalakuló) ε martenzit mennyisége csökken, vagyis az alakítás az ausztenitet stabilizálja. Ez az effektus megegyezik a Cu-Al-Ni ötvözet II. típusú „első ciklus” hatásával.
- 3.3. Kísérletekkel igazoltam, amennyiben a nem termoelasztikus martenzitképződés képlékenyalakítás közben történik, annyiban az alakítás a martenzitet stabilizálja, így annak visszaalakulása nehezebb. Ez a Cu-Al-Ni ötvözetnél tapasztalt I. típusú „első ciklus” hatással egyezik meg.
- 3.4. In situ hevítőmikroszkópos és DSC ciklizálással kísérletileg igazoltam, hogy termoelasztikus fázisátalakuláskor az ausztenitben tárolódó rugalmas energia, illetve a nem termoelasztikus martenzites átalakulást kísérő képlékeny deformációval létrejövő hibahelyek (diszlokációk) feszültségtete, további martenzitek létrejöttét segíti. A nem termoelasztikus fázisátalakulás csíráképző helyei változatlanok, és a fázisátalakulást kísérő képlékeny alakváltozás ellenére növekszik az átalakult térfogathányad az első néhány ciklusban. Viszont a tárolt rugalmas energia hiánya miatt a visszaalakulás egyre nehezebben megy végbe (A_s nő, M_s csökken), így ezen ciklusokban nő a hiszterézis értéke. A termikus ciklizálás mintegy termomechanikus kezelésként működik.

4. TEXTÚRA KÖLCSÖNHATÁSOK

Kísérletileg igazoltam, hogy TRIP/TWIP acélok termomechanikus kezelése során a textúra és a fázismennyiség változásának együttes monitorozása alkalmas a fázisátalakulások alakváltozás és hőmérséklet függésének leírására, továbbá a

makrotextúra vizsgálat, fázismennyiség mérés, bomlásvizsgálat eredményei alapján a különböző genezisű martenzitek szétválaszthatók.

5. CR HATÁSA A TWIP FOLYAMATOKRA

Termomechanikus kezelésekkel igazoltam, hogy TWIP acélban a néhány százalék Cr ötvözés az α' martenzitek megjelenését az alacsonyabb hőmérsékletek felé tolja el, a martenzites átalakulást nehezíti, vagyis a rétegződési hibaenergiát növeli. Ezzel összhangban DSC ciklizálási vizsgálatok eredményei alapján is megállapítottam, hogy a néhány százalék króm jelenléte az ε martenzit bomlását segíti, a martenzit stabilitása ellen hat, vagyis ez a tény is a rétegződési hibaenergia növelését bizonyítja.

6. TERMOMECHANIKUS IGÉNYBEVÉTEL ÉS TÖNKREMENTEL KAPCSOLATA

Bizonyítottam, hogy etilén bontókemence konvekciós zónájában az ausztenites saválló acél falazatnak a tönkremenetelét az acél króm-oxid védőréteg képzési hajlama okozza. A termomechanikus igénybevétel hatására erodálódó króm-oxid védőréteg folyamatos pótlása során a falazat krómtartalmát elveszíti, minek következtében az ausztenit martenzit, ferrit fázisokká alakul. A heterogén szerkezetben az eróziós folyamat felgyorsul, a falazat elvékonyodik, majd bekövetkezik a tönkremenetel. Ebben az esetben a termomechanikus igénybevétel hatására fázisátalakulás történik, de azt közvetlenül nem az igénybevétel, hanem a koncentráció változás indukálja.

A TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK HASZNOSULÁSA

Jelen tudományos kutatási eredmények hasznosulása a Ni-Ti, mint a mai napig a legnépszerűbb alakmemória ötvözetből készült termék, (pl. orvosi eszköz vagy szenzor) előállítása során megtörténhet. Ugyancsak a Cu-Al-Ni alapú ötvözetek a legnépszerűbb magas hőmérsékletű alakmemória ötvözetek, jellemzően funkcionális szenzor, kapcsoló elem készül belőlük. Az előállítással kapcsolatos termomechanikus kezelés hatásának ismerete rendkívül fontos ezen elemek esetében, hisz, ahogy az eredmények is mutatják, drasztikusan befolyásolhatják a funkcionális tulajdonságokat. A funkcionális elemek élettartam becslése szempontjából is fontosak az eredmények, hisz ezen anyagok tönkremenetele, vagy funkció vesztese, nem a mérnöki gyakorlatban szokásos méretezés alapján becsülhető. Alakmemória ötvözetek alkalmazásánál esetenként jellemző az is, hogy csak egyszer kell az illető funkcionális elemnek működnie (tipikus pl. az úripar), de akkor rendkívül magabiztosan. Az általam végzett vizsgálatok eredményei nagyban segítik a funkcionális elemek üzembiztos működtetésének tervezését. A TRIP/TWIP acélok, mint az új generációs acélok, alkalmazásában nyithatnak új távlatot azon vizsgálati eredményeim, ami a termomechanikus kezelés, mely ez acél típus esetén kötődhet az előállításhoz vagy az igénybevételhez is,

hatására világítanak rá. Kísérleti eredményeimet természetesen beépítem az anyagmérnök hallgatók oktatási anyagába is.

IDÉZETT FORRÁSMUNKÁK

- Cahn, R. W., & Haasen, P. (1996). *Physical Metallurgy*. Amsterdam: Elsevier.
- Hosford, W. F. (2012). *Iron and Steel*. USA: Cambridge University Press.
- Laughlin, D. E. (2014). *Physical Metallurgy*. Oxford: Elsevier.
- Nishiyama, Z. (1978). *Martensitic transformation*. New York: Academic Press.
- Olson, G. B., & Owen, W. S. (1992). *Martensite*. USA: ASM International.
- Otsuka, K., & Wayman, C. M. (1998). *Shape Memory Materials*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Verhoeven, D. J. (1975). *Fundamentals of Physical Metallurgy*. New York: John Wiley & Sons Inc. .

A DOLGOZATBAN HIVATKOZOTT SAJÁT PUBLIKÁCIÓK ÉS FÜGGETLEN HIVATKOZÁSOK JEGYZÉKE

Ssz. Publikációk és a független hivatkozások jegyzéke az MTMT adatbázisból

- 1 Hornbogen E, Mertinger V, Spielfeld J
Two types of the first cycle effects in copper based shape memory alloys
SCRIPTA MATERIALIA 40:(12) pp. 1371-1375. (1999)
IF: 0.955
Független idéző: 6 Független idéző: 1 Összesen: 7
- 2 Hornbogen E, Mertinger V, Spielfeld J
Ausageing and ausforming of a copper based shape memory alloy with high transformation temperature
ZEITSCHRIFT FUR METALLKUNDE / MATERIALS RESEARCH AND ADVANCED TECHNIQUES 90:(5) pp. 318-322. (1999)
IF: 0.704
Független idéző: 3 Független idéző: 4 Összesen: 7
- 3 Erzsébet Nagy, Valéria Mertinger, Ferenc Tranta, Jenő Sólyom
Strain Induced Martensitic Transformation in Austenitic Steel
In: Lehoczy László, Kalmár László (szerk.)
microCAD 2000, B szekció: International Computer Science Conference. 235 p.
Konferencia helye, ideje: Miskolc, Magyarország, 2000.02.24-2000.02.25. Miskolc: ME ITTC, 2000. pp. 199-205. Anyagtechnológia ; Fémes és nemfémes technológiák ; Egyéb anyagok (ISBN: [963 661 415 6](#))
- 4 Erzsébet Nagy, Valéria Mertinger, Ferenc Tranta, Jenő Sólyom
Hidegen alakított saválló acélok fázisainak röntgendiffrakciós vizsgálata: &
In: Tóth (szerk.)

- XIX. Hőkezelő és Anyagtudomány a Gépgyártásban Országos Konferencia. Konferencia helye, ideje: Székesfehérvár, Magyarország, 2000.10.10-2000.10.12. Dunaújváros: Dunaújvárosi Főiskola (DF), 2000. pp. 47-52.(ISBN:[963-00-5727-1](#))
- 5 Hornbogen E, Mertinger V, Wurzel D
Microstructure and tensile properties of two binary NiTi-alloys
SCRIPTA MATERIALIA 44:(1) pp. 171-178. (2001)
IF: 1.130
Független idéző: 65 Függő idéző: 2 Összesen: 67
 - 6 Mertinger V, Wurzel D, Hornbogen E
Microstructural effect on pseudoelastic behaviour of binary Ni-Ti alloys
JOURNAL DE PHYSIQUE IV 11: pp. 107-112. (2001)
IF: 0.401
Független idéző: 1 Összesen: 1
 - 7 Nagy Erzsébet, Mertinger Valéria, Tranta Ferenc, Sólyom Jenő
Az alakítási textúra hatása a saválló acélokban végbement fázisátalakulásokra
In: Doktoranduszok Fóruma. Konferencia helye, ideje: Miskolc, Magyarország, 2001.10.06 Miskolci Egyetem Innovációs és Technológia Transzfer Centrum, pp. 34-39.
 - 8 Erzsébet Nagy, Valéria Mertinger, Ferenc Tranta, Jenő Sólyom
Mechanikai igénybevétel hatására bekövetkező átalakulás Ko36-os acélban
In: Tóth T (szerk.)
XX. Hőkezelő és anyagtudomány a gépgyártásban országos konferencia: Eloadások. Konferencia helye, ideje: Kecskemét, Magyarország, 2002.10.16-2002.10.18. Dunaújváros: Dunaújvárosi Főiskola (DF), pp. 160-166.
 - 9 Nagy E, Mertinger V, Tranta F, Solyom J
Deforming texture effect on phase transformation in stainless steels
MATERIALS SCIENCE FORUM 414-4: pp. 281-287. (2003)
IF: 0.602
Független idéző: 5 Függő idéző: 3 Összesen: 8
 - 10 Benke Márton, Nagy Erzsébet, Mertinger Valéria, Humbeek J van
Öregítő hőkezelés hatásának vizsgálata rézalapú alakemlékező ötvözeteknél
In: Tóth T (szerk.)XXI. Országos Hőkezelő és Anyagtudomány a Gépgyártásban Országos Konferencia = 21st Heat Treatment and Materials Science for Mechanical Engineering National Conference with foreign participants: előadások. 223 p. Konferencia helye, ideje: Dunaújváros, Magyarország, 2004.10.13-2004.10.15. Dunaújváros: Dunaújvárosi Főiskola (DF), 2004. pp. 175-181.(ISBN:[963-86533-2-9](#))
 - 11 Benke Márton, Humbeek J van, Mertinger Valéria, Nagy Erzsébet
Investigation of Ageing Effect on Cu-base SMA
In: LEHOCZKY L, KALMÁR L (szerk.)microCAD 2004, C szekció: International Scientific Conference. Konferencia helye, ideje: Miskolc, Magyarország, 2004.03.18-2004.03.19. Miskolc: Miskolci Egyetem Innovációs és Technológia Transzfer Centrum, 2004. pp. C1-C6.Anyagtudomány(ISBN:[963-661-611-6](#))
 - 12 Nagy E, Mertinger V, Tranta F, Sólyom J
Deformation induced martensitic transformation in stainless steels
MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING A-STRUCTURAL MATERIALS PROPERTIES MICROSTRUCTURE AND PROCESSING 378: pp. 308-313. (2004)
IF: 1.445
Független idéző: 94 Függő idéző: 1 Összesen: 95

- 13 Benke Márton, Mertinger Valéria, Nagy Erzsébet, Humbeeck J van
Az öregedés hatása martenzites átalakulásokra rézalapú alakemlékező ötvözetben
In: Bitay Enikő (szerk.) Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka X.: Nemzetközi Tudományos Konferencia. 396 p. Konferencia helye, ideje: Kolozsvár, Románia, 2005.03.18-2005.03.19. Kolozsvár: Erdélyi Múzeum-Egyesület (EME), 2005. pp. 85-88.(Műszaki Tudományos Füzetek - FMTÜ; X.)(ISBN:[973-8231-44-2](#))
- 14 Benke Márton, Mertinger Valéria, Nagy Erzsébet, Humbeeck J van
Investigation of thermoelastic martensitic transformation in Cu-base shape memory alloys
In: Lehoczky László, Kalmár László (szerk.) microCAD 2005 International Scientific Conference. Konferencia helye, ideje: Miskolc, Magyarország, 2005.03.10-2005.03.11. Miskolc: Miskolci Egyetem Innovációs és Technológia Transzfer Centrum, 2005. pp. 1-6.(ISBN:[963-661-646-9](#); [963 661 653 1](#))
- 15 Nagy E, Mertinger V, Tranta F, Solyom J
Investigation of Thermomechanical Treated Austenitic Stainless Steel
MATERIALS SCIENCE FORUM 473-474: pp. 237-242. (2005)
IF: 0.399
Független idéző: 1 Függő idéző: 1 Összesen: 2
- 16 Benke M, Nagy E, Mertinger V, van Humbeeck J
Investigation of Ageing Phenomena in CuAlNi Based Shape Memory Alloys
MATERIALS SCIENCE FORUM 537-538: pp. 129-136. (2007)
- 17 Nagy Erzsébet, Mertinger Valéria
Alakváltozás indukálta martenzites átalakulás ausztenites Cr-Ni acélokban
MISKOLCI EGYETEM KÖZLEMÉNYEI. 2. SOROZAT ANYAGMÉRNÖKI TUDOMÁNYOK 33:(2) pp. 5-17.
(2007)(ISBN [1588-3981](#))
- 18 Benke M, Tranta F, Barkóczy P, Mertinger V, Daróczy L
Effects of heat flux features on the differential scanning calorimetry curve of a thermoelastic martensitic transformation
MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING A-STRUCTURAL MATERIALS PROPERTIES MICROSTRUCTURE AND PROCESSING 481: pp. 522-525. (2008)
IF: 1.806
Független idéző: 10 Függő idéző: 2 Összesen: 12
- 19 Benke M, Mertinger V, Daróczy L
Alakemlékező ötvözet hőkezelésekor bekövetkező változások
In: Tóth T (szerk.) XXIII. Hőkezelő és Anyagtudomány a Gépgyártásban Országos Konferencia és Szakkiállítás. 273 p. Konferencia helye, ideje: Balatonfüred, Magyarország, 2008.10.01-2008.10.03. Dunaújváros, Gépipari Tudományos Egyesület, Hőkezelő Szakosztály, 2008. pp. 71-75.(ISBN:[963-86533-2-9](#))
- 20 Mertinger V, Nagy E, Tranta F, Solyom J
Strain induced martensitic transformation in textured austenitic stainless steels
MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING A-STRUCTURAL MATERIALS PROPERTIES MICROSTRUCTURE AND PROCESSING 481-482: pp. 718-722. (2008)
IF: 1.806
Független idéző: 32 Összesen: 32
- 21 M Benke, V Mertinger, L Daróczy
High-Temperature Transformation Processes in Cu-13.4Al-5Ni Shape Memory Alloy Single Crystals
JOURNAL OF MATERIALS ENGINEERING AND PERFORMANCE 18:(5-6) pp. 496-499. (2009)
IF: 0.592
Független idéző: 4 Függő idéző: 2 Összesen: 6

- 22 M Benke, V Mertinger, L Daróczy
Investigations of Solid Phase Processes in CuAlNi Base Shape Memory Alloys
In: ESOMAT, The 8th European Symposium on Martensitic Transformations. Konferencia helye, ideje:
Prague, Csehszlovákia, 2009.09.07-2009.09.11. EDP Sciences, pp. p.1-p.8.
Független idéző: 2 Összesen: 2
- 23 Benke M, Mertinger V, Tranta F, Barkóczy P, Daróczy L
Supplement on "Effects of heat-flux features on the differential scanning calorimetry curve of a thermoelastic martensitic transformation"
MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING A-STRUCTURAL MATERIALS PROPERTIES MICROSTRUCTURE AND PROCESSING 527:(9) pp. 2441-2443. (2010)
IF: 2.090
Független idéző: 1 Függő idéző: 2 Összesen: 3
- 24 V Mertinger, M Benke, Sz Szabó, O Bánhidi, B Bolló, Á Kovács
Examination of a failure detected in the convection zone of a cracking furnace
ENGINEERING FAILURE ANALYSIS 18: pp. 1675-1682. (2011)
IF: 0.765
Független idéző: 2 Függő idéző: 1 Összesen: 3
- 25 Benke Márton, Mertinger Valéria
CuAlNiMn és CuAlNiMnFe alakemlékező ötvözetek bainites átalakulásának vizsgálata
ANYAGOK VILÁGA X:(1) p. & 7 p. (2012)
- 26 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)
IF: 1.14
Független idéző: 1 Függő idéző: 2 Összesen: 3
- 27 Benke Márton, Mertinger Valéria
BAINITES ÁTALAKULÁS CUALNI ÖTVÖZETEKEBEN
MISKOLCI EGYETEM KÖZLEMÉNYEI: ANYAGMÉRNÖKI TUDOMÁNYOK 38:(1) pp. 19-28. (2013)
- 28 Erzsébet Nagy, Valéria Mertinger, Márton Benke, Ferenc Tranta
TWIP effect in FeMnCr alloys
In: & (szerk.) microCAD 2013, D: Alkalmazott anyagtudomány és -technológiák: XXVII. MicroCAD International Scientific Conference D: Applied Materials Science and Technologies. Konferencia helye, ideje: Miskolc-Egyetemváros, Magyarország, 2013.03.21-2013.03.22. Miskolc: Miskolci Egyetem, 2013. pp. D9-1-D9-6.(ISBN:[978-963-358-018-9](#))
- 29 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)
Független idéző: 1 Függő idéző: 4 Összesen: 5
- 30 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)
Függő idéző: 1 Összesen: 1
- 31 Mertinger V, Benke M, Kiss G, Réti F

Degradation of a corrosion and heat resistant steel pipe
ENGINEERING FAILURE ANALYSIS 29: pp. 38-44. (2013)

IF: 1.13

Független idéző: 1 Összesen: 1

- 32 Nagy Erzsébet, Mertinger Valéria, Benke Márton, Tranta Ferenc
Fe-Mn-Cr acélok vizsgálata
BÁNYÁSZATI KOHÁSZATI LAPOK-KOHÁSZAT 146:(2) pp. 42-45. (2013)
- 33 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.
IF: 0.98
Független idéző: 1 Összesen: 1
- 34 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)
IF: 0.98
Prága, Csehország: 2013.05.21 -2013.05.25.
- 35 Nagy Erzsébet, Mertinger Valéria, Benke Mártom, Tranta Ferenc
martenzites átalakulás vizsgálata FeMnCr TWIP acélokban
In: Kékesi Tamás (szerk.) microCAD 2014, B1 section, Applied Materials Science and Nanotechnologies: XXVIII.. Konferencia helye, ideje: Miskolc, Magyarország, 2014.04.10-2014.04.11. Miskolc: University of Miskolc, 2014. pp. B1-6-1-B1-6-8.(ISBN:[978-963-358-051-6](#))
- 36 Marton Benke, Valeria Mertinger
In situ Optical Microscopic Examination Techniques of Thermally Induced Displacive Transformations
MATERIALS SCIENCE FORUM 812: pp. 279-284. (2015)
Materials Science, Testing and Informatics VII. Balatonkenese, Magyarország: 2013.10.13 -2013.10.15.
(ISBN [978-3-03835-389-8](#))
- 37 Mertinger V, Benke M, Nagy E
Effect of Cr Content on the TWIP Behavior in Fe-Mn-Cr Steels
MATERIALS TODAY: PROCEEDINGS 2:(Supplement 3) pp. S673-S676. (2015)
- 38 Nagy Erzsébet, Benke Márton, Kovács Árpád, Mertinger Valéria
MARTENZITES ÁTALAKULÁSOK ORIENTÁCIÓS VISZONYAI FEMNCR ACÉLOKBAN
In: Szabó Péter János (szerk.) X. Országos Anyagtudományi, Anyagvizsgálati és Anyaginformatikai Konferencia és Kiállítás. Konferencia helye, ideje: Balatonalmádi, Magyarország, 2015.10.11-2015.10.13. Balatonalmádi: Diamond Congress Kft., 2015. p. 130.(ISBN:[978-615-5270-20-8](#))
- 39 Valeria Mertinger, Erzsébet Nagy, Marton Benke, Ferenc Tranta
Characteristics of Martensitic Transformations Induced by Uni-axial Tensile Tests in a FeMnCr Steel
MATERIALS SCIENCE FORUM 812: pp. 161-166. (2015)Materials Science, Testing and Informatics VII. Balatonkenese, Magyarország: 2013.10.13 -2013.10.15. (ISBN [978-3-03835-389-8](#))
- 40 Mertinger Valéria, Sólyom Jenő, Benke Márton
MONOCAP OPTIKA ALKALMAZÁSA RÖNTGENDIFFRAKCIÓS VIZSGÁLATOKNÁL
ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA 2012:(1) pp. 60-64. (2012)

