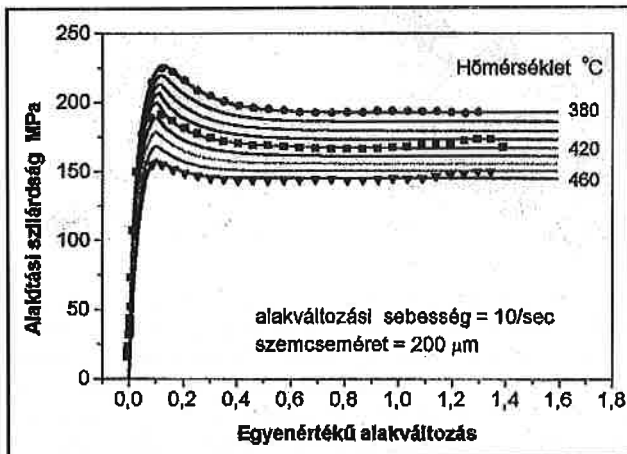


10. ábra. A 200 µm-es szemcseméretű anyag mért és számított alakítási szilárdság értékei 0.001/s alakváltozási sebességnél



11. ábra. A 200 µm-es szemcseméretű anyag mért és számított alakítási szilárdság értékei 10/s alakváltozási sebességnél

Következtetések

Hipereutektikus Al-Si-Ni ötvözet alakítási szilárdságának mérési adatai alapján matematikai modellt állítottunk össze az aktuális folyási feszültség meghatározására. Az állandó hőmérsékleten és alakváltozási sebességen végzett vizsgálatok kiértékelésére olyan függvény-paramétereket vezetünk be, amelyek egy része közvetlen fizikai tartalommal rendelkezik, a többiek a választott függvények menetét befolyásoló paraméterek. Az állandó hőmérsékleten egyváltozós, az alakváltozási sebesség logaritmusától függő elsőrendű spline közelítést alkalmaztunk. Állandó alakváltozási sebességnél szintén lineáris közelítést használtunk, ebben az esetben a független változó a mennyiség volt. Általános esetben a paramétereket bilineárisan közelítettük a fentiekben említett független változók tartományában.

A mérési eredményekkel való összehasonlítás a matematikai modell megbízhatóságáról tanúskodik.

Irodalom

1. *Stefániay, V., Török, É.*: Res. & Dev. Report, Aluterv-FKI, Hungalu Eng.-Dev. Centre, Budapest, 1993.
2. *Griger, Á.; Ipacs, L., Stefániay, V. and Turmezey, T.*: LIMAT-93, Int. Symp. on Light Mat. for Transportation Systems, June 20-23, 1993, Pohang, Korea, Proc. of LIMAT-93, Ed.: Nack J. Kim, p. 681.
3. *Griger, Á.; Stefániay, V.*: J. Mat. Sci. 31 (1996) p.6645.
4. *Krallics Gy., Zlaja Gy., Malgyn D.*: FE Simulation of connecting rods manufacturing, Proceeding of the IASTED International Conference on Modelling and Simulation, May 13-16, 1998. Pittsburgh, p.288.
5. MicroAlu-Formability Modelling of Aluminium Base PM Alloys. First Year Progress Report
6. Microcal Origin. Version 5.0 Microcal Software Inc.
7. *Jonas, J.J., Sellars, C. M., and McG Tegart, W.J.*: Strength and Structure Under Hot Working Conditions, Metall Review, 14, p.1. 1969.
8. *Press W.H, Flannery B.P., Teukolsky S.A., Vetterling W.T.*: Numerical Recipes, Cambridge University Press, 1988.

Alakemlékező ötvözetek viselkedésének vizsgálata

Pethő Árpád*

Bevezetés

Az alakemlékező ötvözetek vizsgálata manapság az igen intenzíven kutatott területek közé tartozik. Ennek oka a megszokottól erősen eltérő anyagi viselkedésükből ered, ami a kristályszerkezetben végbemenő változásokra vezethető vissza. A jelenségek leírásánál ezért a mikrostruktúrából adódó változók (fázis mennyiségek) használata is szükséges. A probléma megoldását tovább bonyolítja a folyamatok mechanikai és termikus terheléstől való erős függése. A bemutatásra kerülő modell az alakemlékező jelenségek és a képlékeny folyamatok makroszkopikus hasonlóságát használja ki.

A jelenségek három csoportba sorolhatók [2][5].

Egyirányú jelenség

A testet alapállapotban egy anyagjellemző hőmérséklet (ϑ_{A1}) alatt terhelés éri, amely nagyobb a rugalmas terhelés határánál. Ennek

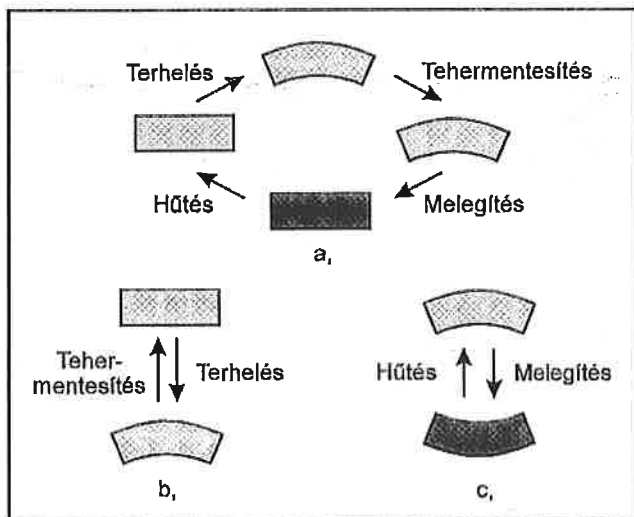
hatására a test deformációt szenved el, ami tehermentesítéskor, többé-kevésbé (a kezdő hőmérséklettől függően) megmarad. Ekkor felmelegítve a darabot a már említett (ϑ_{A1}) fölé, az visszanyeri eredeti formáját, amit a kezdeti hőmérsékletre való visszahűtéskor is megtart. Így vissza-kerülünk az eredeti állapotba, mind feszültség, mind hőmérséklet szempontjából, és ezzel visszakaptuk az eredeti formát is. Próbatestünk emlékezett az alakjára! (1. (a) ábra)

Egyszerű szavakkal: a mechanikai terhelés okozta maradó alakváltozást hőmérséklet növelésével eltüntetjük. A jelenség azért egyirányú, mert csak a kezdő formát tudjuk tökéletesen visszakapni, a másik alak a terhelés mértékétől függ.

Pszudoelaszticitás

Ha a terhelést az előbb említett (ϑ_{A1}) fölért végezzük, akkor a test ismét deformációt szenved el, ám tehermentesítéskor ez teljes mértékben eltűnik (1. (b) ábra). A jelenség valójában nem rugalmas alakváltozás, hanem kristályszerkezetben történő változás (pszudoelasztikus). Ám kívülről nézve rugalmas viselkedésnek tűnik, csak a megszokottnál sokkal nagyobb alakváltozással, ezért nevezik szuperelasztikus viselkedésnek is.

* Ph.D. hallgató, Budapesti Műszaki Egyetem, Műszaki Mechanikai Tanszék H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5. Tel.: (1) 463-1332 e-mail: petho@galliei.mm.bme.hu



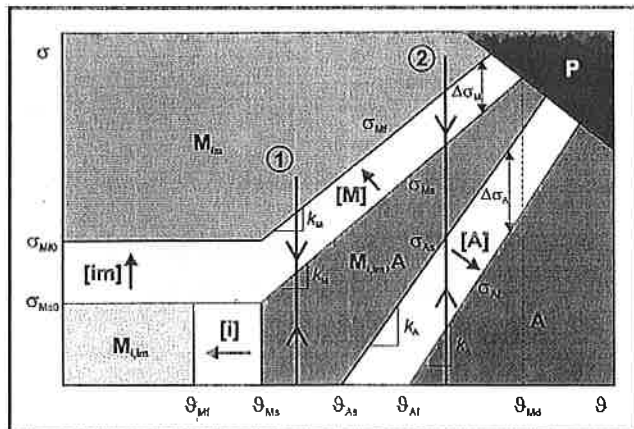
1. ábra. Alakemlékező jelenségek: egyirányú jelenség (a), pszeudoelaszticitás (b), kétirányú jelenség (c)

Kétirányú jelenség

Ezen jelenség eltér az előző kettőtől abban, hogy előállításához a próbatestet előzetes kezelésnek kell alávetni, mondhatjuk azt, hogy „be kell tanítani”. Ezután már két különböző stabil forma létrehozása lehetséges a testen, külső erő behatása nélkül, csupán a hőmérsékletének változtatásával. Ha a test hőmérséklete egy másik anyagjellemző hőmérséklet (ϑ_{M1}) alatt van, akkor az egyik alakot, míg ha a magasabb ϑ_{A1} felett van, akkor a másik alakot ölti magára (1. (c) ábra). Kétirányú a jelenség, mivel mind a két forma stabil, egyértelműen előállítható a hőmérséklet megfelelő beállításával.

Kristályszerkezeti változás

A jelenségek mögött a martenzites átalakulás áll. Ez egy nemegyensúlyi fázisváltozás, amelyet eleinte a vasötvözeteknél kutattak, de manapság igen sok más ötvözetnél is fontos szerepet játszik. Legfőbb tulajdonsága, hogy diffúziómentes, reverzibilis, kezdő és végső fázisai közt egyértelmű kristálytani megfeleltetés van és az átalakulás tulajdonságai erősen ötvözőanyag függöek [1][4][6]. Fontos megjegyezni, hogy a martenzit kristályok ikerződésre hajlamosak. Tehermentes állapotban 12 féle ikerpár létrejötte lehetséges közel azonos mennyiségben.



2. ábra. Fázisok helyzete a feszültség - hőmérséklet ($\sigma - \vartheta$) síkon
 A: ausztenit, M_1 : ikeresedett martenzit, M_{im} : ikermentes martenzit,
 P: képlékeny zóna;
 [A]: ausztenit, [M]: ausztenitből ikermentes martenzitté,
 [i]: ausztenitből ikeresedett martenzitté történő átalakulás,
 [im]: martenzit ikermentesedés

Terhelés alatt viszont ez az arány megváltozik. A terhelés irányába esők kialakulása előnyösebb lesz, így azokból nagyobb arányban lesznek jelen az anyagban. Egyes ikerk viszont, amelyek a terheléshez képest kedvezőtlen irányítottak, kisebb százalékban maradnak, vagy teljesen eltűnnek. A folyamatot ezért *ikermentesedés*nek nevezik.

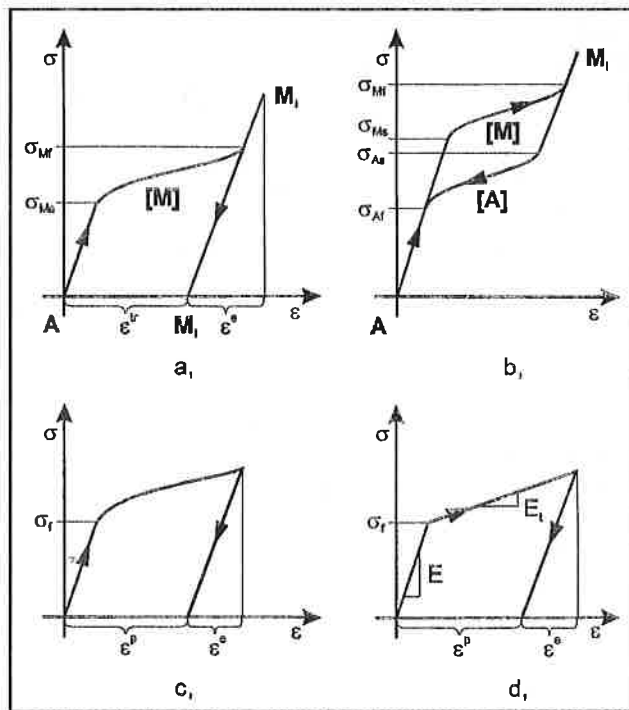
A fázisátalakulás és az ikermentesedés folyamatára mind a feszültségi, mind pedig a termikus állapotnak igen erős hatása van. Ezt szemlélteti a 2. ábra [7].

Rugalmas-képlékeny anyagmodell analógia

A jelenségek modellezésére többféle módszer alakult már ki, mint például a mikromechanikai modellek (E.Patoor), a statisztikus mechanikai és kinetikai módszerek (M.Achenbach, I.Müller) és a kontinuum mechanikára építő, belső változós modellek (F.Falk, M.Frémond, P.Coli, M.Niezgódka, K.-H.Hoffmann, K.Tanaka, L.C.Brinson) (Az irodalom pontos megnevezései a [11]-ben találhatóak.). Ezen utóbbiba sorolhatóak a képlékenységi módszerek is [3][8][9][10], ami a továbbiakban bemutatásra kerül.

Alapok

A modellezés alapfogolata az alakemlékező ötvözetek viselkedésének és a képlékeny folyamatok makroszkopikus hasonlóságából ered. Megvizsgálva az egyirányú jelenség terhelés-tehermentesítés folyamatát (2. ábra 1. vonal) a feszültség-alakváltozás síkon (3. ábra (a)), hasonlóság fedezhető fel egy képlékeny folyamat lefutásával kapcsolatban (3. ábra (c)).



3. ábra. Egyirányú (a) és pszeudoelasztikus jelenség (b) a képlékeny folyamattal (c) és modelljével (d) összevetve a feszültség-alakváltozás síkon

A szembevetendő különbség az, hogy az alakemlékezőknél a nemrugalmas szakasznak nem csak kezdete, de vége is van, ami után az anyag ismét rugalmasan viselkedik. A pszeudoelasztikus viselkedésnél (2. ábra 1. vonal, 3. ábra (b)), pedig a tehermentesítés folyamán is található egy a terheléskor fellépővel hasonló nemlineáris szakasz. Ezen eltérések a folyásfelületek analógiájaként felírt fázisváltási felületek meghatározásánál vannak figyelembe véve.

Konstitutív egyenlet, merevségi tenzorok

A konstitutív egyenlet a folyási elmélet alapján a következő formájú, figyelembe véve a feszültség növekményének az alakváltozás és a hőmérséklet növekményétől való függését:

$$d\sigma = D^{e-tr-p} : d\epsilon + D^p d\vartheta \tag{1}$$

ahol a D^{e-tr-p} negyedrendű, D^p másodrendű tenzor. Ebben az alakváltozás megváltozása additív felbontásban tartalmazza a rugalmas, a fázis-transzformációból származó és a képlékeny részeket:

$$d\epsilon = d\epsilon^e + d\epsilon^tr + d\epsilon^p \tag{2}$$

A fázisátalakulásra kettő (oda-vissza alakulás) a képlékenységre egy feltétel írható fel a lineárisan keményedő Mises-féle folyási feltétel szerint:

$$F_M = \sigma_e - \sigma_{yM} = \sigma_e - (\sigma_{Ms} + H_M \bar{\epsilon}^{tr}) - He[\sigma_e - \sigma_{Mf}] \sigma_{Mf} \leq 0 \tag{3}$$

$$F_A = \sigma_e - \sigma_{yA} = \sigma_e - (\sigma_{As} - H_A (\bar{\epsilon}_t^{tr} - \bar{\epsilon}^{tr})) + He[\sigma_{Af} - \sigma_e] \sigma_{Af} \geq 0 \tag{4}$$

$$F_p = \sigma_e - \sigma_{yp} = \sigma_e - (\sigma_f + H \bar{\epsilon}^p) \leq 0 \tag{5}$$

ahol σ_e az egyenértékű feszültség, ami a feszültség tenzor deviátoros részével (s) van kifejezve:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{3}{2}} s : s \tag{6}$$

σ_{yM} és σ_{yA} a martenzites és az ausztenites fázisváltási határok, σ_{yp} a folyáshatár, H_M, H_A, H a megfelelő folyamatokhoz tartozó keményedési modulusok, $\bar{\epsilon}_t^{tr}$ pedig a transzformációból eredő teljes alakváltozás. (Megjegyzendő, hogy az alakváltozások felülvonása, a többtengelyű esetből meghatározott egyenértékű értéket jelenti. A 2. és 3. ábrákon az egyszerűbb megértés miatt sem ezek, sem a feszültségek egyenértékű volta nincs feltüntetve.) A kifejezésekben szereplő $He[x]$ függvény a Heaviside-függvény, mely x kisebb 0 esetén 0, egyébként 1 értéket vesz fel.

A fázisváltásnál szereplő, csak a hőmérséklettől függő feszültségkomponensek a 2. ábráról olvashatók le:

$$\sigma_{Ms} = \sigma_{Ms0} + He[\vartheta - \vartheta_{Ms}] k_M (\vartheta - \vartheta_{Ms}) \tag{7}$$

$$\sigma_{Mf} = \sigma_{Mf0} + He[\vartheta - \vartheta_{Mf}] k_M (\vartheta - \vartheta_{Mf}) \tag{8}$$

$$\sigma_{As} = He[\vartheta - \vartheta_{As}] k_A (\vartheta - \vartheta_{As}) \tag{9}$$

$$\sigma_{Af} = He[\vartheta - \vartheta_{Af}] k_A (\vartheta - \vartheta_{Af}) \tag{10}$$

A (10) egyenletbeli Heaviside-függvény változójaként a parciális egyirányú jelenség megfelelő leírása miatt került ϑ_{As} a ϑ_{Af} helyett. (Parciális egyirányú a jelenség, ha a terhelési folyamat ϑ_{As} és ϑ_{Af} közti hőmérsékleten zajlik.)

A feltételek teljesülésekor (egyenlő 0), feltéve, hogy a három feltételtől egyszerre csak egy teljesül, kaphatók az (1)-hez szükséges tenzorok:

$$D_M^{e-tr} = D^e - \frac{9G^2 s \otimes s}{\sigma_{yM}^2 (H_M + 3G)}, \quad D_M^p = \frac{-3G k_M}{\sigma_{yM} (H_M + 3G)} s \tag{11}$$

$$D_A^{e-tr} = D^e - \frac{9G^2 s \otimes s}{\sigma_{yA}^2 (H_A + 3G)}, \quad D_A^p = \frac{-3G k_A}{\sigma_{yA} (H_A + 3G)} s \tag{12}$$

$$D^{e-p} = D^e - \frac{9G^2 s \otimes s}{\sigma_{yp}^2 (H + 3G)}, \quad D^p = \frac{-3G \frac{\partial \sigma_f}{\partial \vartheta}}{\sigma_{yp} (H + 3G)} s \tag{13}$$

ahol D^e a rugalmas viselkedést leíró negyedrendű tenzor

$$D^e = 2G I + \lambda \delta \otimes \delta \tag{14}$$

amiben G és λ a Lamé-állandók, I a negyedrendű, δ a másodrendű egytenzor.

A rugalmas viselkedést leíró mennyiségek (G, λ) a szerkezet tetszőleges állapotában megadhatók a fázisokra ismert mennyiségek súlyozott összegeként, például:

$$G = \xi GM + (1-\xi) GA, \tag{15}$$

ahol ξ a martenzit fázis mennyisége. $\xi = 1$, ha teljesen martenzites a szerkezet, $\xi = 0$ ha teljesen ausztenites. Értéke a folyási törvény alapján a konzisztencia feltételből határozható meg. A két fázisra érvényes keményedési modulus (H_M, H_A) is valójában a fázismennyiség függvénye, így ezek segítségével elő lehet írni nemlineáris keményedést is.

A bemutatott módszer beépíthető egy végelelemes algoritmusba, amivel már tényleges számítások végezhetőek el.

Összefoglalás

Az alaklélekző ötvözetek érdekes tulajdonságai és azoknak egy modellezési lehetősége került bemutatásra. A modell a már kidolgozott képlékenységi elmélet alapján lett felállítva, felhasználva az alaklélekző ötvözetek tapasztalati eredményeit, mely így alkalmas mindhárom jelenség leírására. Továbblepést a modell végelelemes algoritmizálása és azon példák lefutattása jelenti.

Irodalom

[1] Reed-Hill, R. E.: "Physical Metallurgy Principles", D.Van Nostrand Company, New York, Cincinnati, 1973.
 [2] Perkins, J.: "Shape memory effects in alloys", Plenum Press, New York, 1975.
 [3] Bertram, A.: "Thermo-mechanical constitutive equations for the description of shape memory alloys", *Nuclear Engineering and Design* 74, 1982, p. 173-182.
 [4] Schumann, H.: "Kristálygeometria és a fémek transzformációi", Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985.
 [5] Hornbogen, E.: "Alloys with Shape Memory - New Materials for the Technology of the Future?", *Metall.* 41, Vol.5, 1987, p. 488-493.
 [6] Prohászka J. - Kristyákné Maróti G.: "Alaklélekző ötvözetek", *Kohászat*, 121. évfolyam, 7. szám, 1988, p. 290-301.
 [7] Brinson, L. C. - Huang, M. S.: "Simplifications and comparisons of shape memory alloy constitutive models", *Journal of Intelligent Material Systems & Structures*, 7, 1996, p. 108-114.
 [8] Lubliner, J. - Auricchio, F.: "Generalized plasticity and shape memory alloys", *Int. J. Solids Structures*, Vol. 33. No. 7, 1996, p. 991-1003.
 [9] Auricchio, F. - Taylor, R. L. - Lubliner, J.: "Shape memory alloys: macro-modelling and numerical simulations of the superelastic behavior", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 146, 1997, p. 281-312.
 [10] Trochu, F. - Yuan-Yao Qian: "Nonlinear finite element simulation of superelastic shape memory alloy parts", *Computers & Structures*, Vol. 62. No. 5, 1997, p. 799-810.
 [11] Birman, V.: "Review of mechanics of shape memory alloy structures", *Appl. Mech. Rev.*

A TESTOR BT.
 és lapunk szerkesztőbizottsága
 elérhető az elektronikus postán:
E-mail: info@testor.hu

Cég- és lapinformációk,
 az Anyagvizsgálók Lapja eddig
 megjelent számainak tartalom-
 jegyzéke olvasható az Interneten:
www.testor.hu