

Egy tervezési modell bemutatása alakemlékező ötvözetek alkalmazására

Mihálcz István

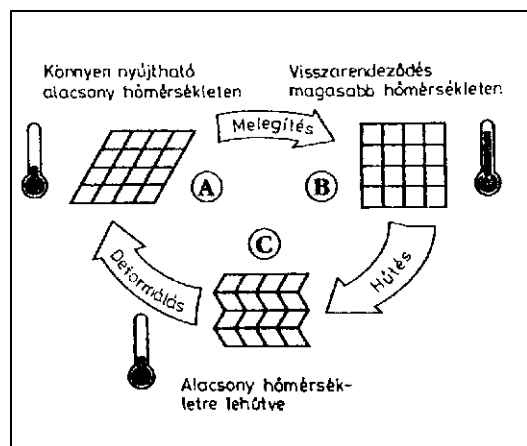
Budapesti Műszaki Egyetem
Finommechanikai és Optikai Tanszék

Összefoglalás:

Az alakemlékező ötvözetek (Shape Memory Alloy = SMA) a fémeknek egy olyan csoportját alkotják, amelyek hő hatására képesek „emlékezni” előző alakjukra. Általában alacsony hőmérsékleten ezek az anyagok nagyon hajlékonyak, felmelegítve azonban visszanyerik eredeti alakjukat. Ezt az emlékezési mechanizmust nevezik „egyutas” emlékezésnek. Jelen dolgozat egy ilyen alakemlékező fémrel megvalósított mozgató (aktuátor) tervezését mutatja be.

A jelenség bemutatása:

Ha egy SMA-ból készült huzalt hajlítás nélkül izítunk, majd ezen egyenes forma megtartása mellett lehűtjük, a drót alakja változatlan marad. A huzal meleg állapotban 5...8 %-ot rövidül hideg állapotban mért hosszához képest (NiTi esetében), lehűléskor meg ugyanennyit megnyúlik. Alacsony hőmérsékleten az ötvözet martenzites fázisban található. Melegítéskor, az átalakulási hőmérsékletet túllépve, ausztenites fázisba kerül. Az átmenet a martenzites fázisból az ausztenites fázisba egy úgynevezett R fázison át történik, de mivel nagyon rövid ideig létezik ez az állapot, ezért teljesen el szokták hanyagolni. A két fázisnak más a kristályszerkezete, ez a rövidülés magyarázata. A kristályszerkezet átalakulását az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra

Az SMA működése a következő: az A kristályszerkezetet deformáljuk az átalakulási hőmérséklet alatti hőmérsékleten, de csak olyan mértékben, hogy az atomok közötti kötések megmaradjanak. Az ötvözetet az átalakulási hőmérséklet fölé melegítve, a kristályszerkezet visszanyeri eredeti alakját (B - ausztenites kristályszerkezet). Ebben a lépésben

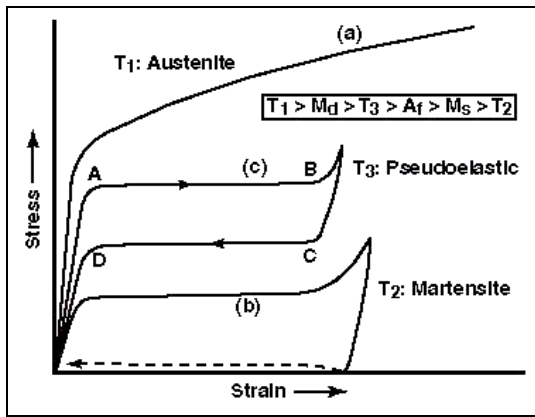
lehet az SMA-t munkavégzésre használni. Az ötvözetet lehűtve, a fázisváltozás ellentétes irányban történik (C - martenzites kristályszerkezet) és az ötvözet könnyen deformálhatóvá válik. Az átalakulás hiszterézissel jár, ennek értéke 5...30 °C.

Ha a martenzites állapotban a huzalt meghajlítjuk, ezt az alakját addig tartja, amíg kristályszerkezete meg nem változik. Ha az így meghajlított huzalt melegítjük, az A_s hőmérsékleten megindul a drót kiegyenesedése, és a kiegyenesedés az A_f hőmérsékleten fejeződik be. Ezek a hőmérsékletek az ausztenitképződés kezdetét és végét, az M_s és M_f pedig a martenzitképződés kezdetét és végét jelentik. Az alakemlékezés arra az alakra vonatkozik, amelyben az ötvözet volt a deformációt megelőző ausztenites fázisban.

A martenzites átalakulás az alakemlékező ötvözetekben bekövetkezhet hőmérsékletcsökkentéssel vagy a mechanikus terhelés növelésével. Az elsőt termoelasztikus martenzitnek, a másikat feszültség- vagy alakváltozás keltette martenzitnek nevezik. A termoelasztikus martenzites átalakulásnál a hőmérséklet csökkenésével a martenzit mennyisége nő, és fordítva, a martenzit tartalom csökken, ha a hőmérséklet emelkedik.

Ha az ötvözet az M_s hőmérséklet fölött található, mechanikai terhelése fázisátalakuláshoz vezet. A mechanikai feszültség növelésével nő a rugalmas alakváltozás. Ha a feszültség elérte az alakváltozáshoz szükséges értéket, megindul a fázisátalakulás izotermikus jelleggel és feszültségkeltette vagy alakváltozáskeltette martenzit keletkezik. A terhelés csökkentésével előbb a rugalmas alakváltozás csökken, majd elkezdődik a martenzit mennyiségének csökkenése. Ezt a viselkedést pseudoelasztikus viselkedésnek, a jelenséget meg pseudoelaszticitásnak nevezik, ezt a 2. ábra C görbéje szemlélteti.

Az alakemlékező hatásban mind a termoelasztikus, mind a pseudoelasztikus viselkedésnek szerepe van. Az alakemlékező hatás ugyanis csak akkor észlelhető, ha a feszültséggel keltett martenzites átalakulás a terhelés megszüntetésével nem fordul meg. Az így keletkezett martenzites szerkezetet ezután hevítéssel lehet visszavinni az eredeti fázisába és alakjára. Ezt mutatja be a 2. ábra B görbéje. A B görbe alsó szaggatott vonallal rajzolt szakasza a melegítés hatására következik be és ezen a szakaszon lehet munkát végezni az ötvözetrel.



2. ábra

A hatásfok számítása:

Minden mozgatóelemnél lényeges a hatásfok. A hatásfok számításához egy egyszerűsített modellet alkalmaztam. A martenzit- és az ausztenit-képződés kezdeti és befejezési hőmérsékletét ugyanakkora értékűnek választottam, vagyis $M_s = M_f = M$ és $A_s = A_f = A$ (a hiba itt pont a hiszterézis értékével egyenlő), a nyúlás meg az összehúzóadás független a feszültségtől, a plasztikus alakítás során nem lép fel fázisátalakulás, a termikus hiszterézis független a feszültségtől, a fázisátalakulást nem befolyásolja az anyag kifáradása.

A hatásfok egyenlete:

$$\eta = \frac{W_{out} - W_{in}}{Q_{in}} \quad (1)$$

ahol W_{in} és W_{out} a bevitt- és az ötvözet által létrehozott mechanikai munka, Q_{in} pedig a bevitt hőmennyiség. Mivel a bevitt munka nulla ($W_{in} = 0$), az SMA által kifejtett munka:

$$W_{out} = \int \sigma \cdot d\varepsilon = (\varepsilon_M - \varepsilon_A) \cdot (\sigma_H - \sigma_L) = \Delta\varepsilon \cdot \Delta\sigma \quad (2)$$

ahol σ_H - az SMA-ra ható maximális feszültség, σ_L - az SMA-ban lévő maradékfeszültség, ε_M - a martenzites fázisban lévő ötvözet nyúlása, ε_A - az ausztenites állapotban a rövidülés. A bevitt hőmennyiség az ötvözet belső energiaváltozásának (Q) és a látenshőnek (Δh) az összege. A belső energiaváltozás egyenlete:

$$Q = \rho \cdot c \cdot (A_{\sigma H} - M_{\sigma L}) = \rho \cdot c \cdot \left(\Delta T + \frac{\sigma_H - \sigma_L}{dT} \right) \quad (3)$$

A látenshő a Clausius-Clapeyron egyenletből írható fel [3]:

$$\Delta h_{\sigma H} = \frac{d\sigma}{dT} \cdot \Delta\varepsilon \cdot A_{\sigma H} = \frac{d\sigma}{dT} \cdot \Delta\varepsilon \cdot \left(M + \Delta T + \frac{\sigma_H - \sigma_L}{dT} \right) \quad (4)$$

Behelyettesítve a (2), (3) és (4) egyenleteket a hatásfok egyenletébe (1), a következő összefüggést kapjuk:

$$\eta = \frac{(\varepsilon_M - \varepsilon_A) \cdot (\sigma_H - \sigma_L)}{\rho \cdot c \cdot \left(\Delta T + \frac{\sigma_H - \sigma_L}{dT} \right) + \frac{d\sigma}{dT} \cdot (\varepsilon_M - \varepsilon_A) \cdot \left(M + \Delta T + \frac{\sigma_H - \sigma_L}{dT} \right)} \quad (5)$$

A Flexinol nevű NiTi alakemlékező ötvözetre elvégezve a számításokat a következő adatokkal: $\sigma_H = 400 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_L = 200 \text{ N/mm}^2$, $\Delta\varepsilon = 5 \%$, $d\sigma/dT = 7 \text{ N/mm}^2\text{C}^\circ$, $\Delta T = 25 \text{ C}^\circ$, $c = 460 \text{ J/kgC}^\circ$ az ötvözet fajhője, $\rho = 6.45 \text{ g/cm}^3$ az ötvözet sűrűsége, $M = 47 \text{ C}^\circ$ - a hatásfok értéke $\eta = 8.15 \%$.

Tervezési modell:

Az SMA kontinuummechanikai egyenletét Tanaka japán kutató határozta meg 1982-ben, ezt az egyenletet C. Liang és C.A. Rogers 1990-ben [1] valamint L.C. Brinson 1993-ban [2] korrigálták. Az egyenlet egy kezdeti (0) állapotra vonatkoztatva a következő:

$$\sigma - \sigma_0 = E(\xi) \cdot \varepsilon - E(\xi_0) \cdot \varepsilon_0 + \Theta \cdot (T - T_0) + \Omega(\xi) \cdot \xi_s - \Omega(\xi_0) \cdot \xi_{s0} \quad (6)$$

ahol σ - az ötvözetben a mechanikai feszültség, E - a rugalmassági modulus, ε - az összehúzóadás (rövidülés) mértéke, Θ - a hőmérséklet-tenzor, T - a hőmérséklet, Ω - a fázistenzor, ξ - a martenzittartalom, ξ_s - a feszültség hatására keletkező martenzittartalom. Szintén C. Liang és C.A. Rogers 1990-ben [1] és L.C. Brinson 1993-ban [2] kimutatták, hogy a fázistenzor értéke:

$$\Omega(\xi) = -\varepsilon_L \cdot E(\xi) \quad (7)$$

ahol ε_L az ötvözet maximális maradék nyúlása. A martenzittartalom függ a hőmérséklettől és a feszültségtől, ezért felírható a kettő összegeként [2]:

$$\xi = \xi_T + \xi_S \quad (8)$$

ahol ξ_T a hőmérséklet hatására keletkező martenzittartalom. Átirva a (6) egyenletet, elvégezve a behelyettesítéseket [2]:

$$\sigma = E(\xi) \cdot (\varepsilon - \varepsilon_L \cdot \xi_S) + \Theta \cdot (T - T_0) + K_0 \quad (9)$$

$$K_0 = \sigma_0 - E(\xi_0) \cdot (\varepsilon_0 - \varepsilon_L \cdot \xi_{s0})$$

A K_0 tag tartalmazza a kezdeti feltételeket. A fenti egyenletrendszer felírva két feszültségértékre (σ_1 -re és σ_2 -re), a σ_1 -hez tartozó K_0 tagot zérusra választva ($\sigma_0 = 0$, $\varepsilon_0 = 0$, $\xi_0 = 0$) és a K_1 -et ha kifejezzük a σ_1 függvényében, akkor kapjuk:

$$K_1 = \Theta \cdot (T_1 - T_0) \quad (10)$$

Ezt az eredményt behelyettesítve a σ_2 egyenletébe a következő egyenlethez jutunk:

$$\sigma = E(\xi) \cdot (\varepsilon - \varepsilon_L \cdot \xi_S) + \Theta \cdot (T - T_0) \quad (11)$$

Mivel a rugalmassági modulus értéke nemlineáris, de ismeretes az értéke mindkét fázisban, ezért felbontható két összegre:

$$E(\xi) = \xi \cdot E_M + (1 - \xi) \cdot E_A \quad (12)$$

Ezáltal az SMA egyenlete a következő ($K_0 = 0$ -ra):

$$\sigma = (\xi \cdot E_M + (1 - \xi) \cdot E_A) \cdot (\varepsilon - \varepsilon_L \cdot \xi_s) + \Theta \cdot (T - T_0) \quad (13)$$

vagy a kezdeti feltételek figyelembevételével a következő összefüggést kapjuk:

$$\begin{aligned} \sigma - (\xi \cdot E_M + (1 - \xi) \cdot E_A) \cdot (\varepsilon - \varepsilon_L \cdot \xi_s) - \Theta \cdot T = \\ \sigma_0 - (\xi_0 \cdot E_M + (1 - \xi_0) \cdot E_A) \cdot (\varepsilon_0 - \varepsilon_L \cdot \xi_{s0}) - \Theta \cdot T_0 = konst. \end{aligned} \quad (14)$$

Ismerve az SMA-ban keletkező feszültségeket, már meg lehet határozni az SMA huzal rövidülését, vagyis a mozgás mértékét. Az SMA hőmérsékletét a következő egyenlettel lehet meghatározni:

$$T = T_o + (T_f - T_m) \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{\tau}}\right) \quad (15)$$

ahol T_m a környezet hőmérséklete, a T_f az SMA végső hőmérséklete:

$$T_f = \frac{I^2 \cdot R}{\pi \cdot d \cdot h} \quad (16)$$

τ az SMA időállandója:

$$\tau = \frac{d \cdot \rho \cdot c}{4 \cdot h} \quad (17)$$

A fenti összefüggésekben I az áram, R az SMA huzal ellenállása, d a huzal átmérője, h a huzal hőátadási tényezője.

Következtetés:

1. A hatásfok értéke 5.1%, ami elfogadható, mert átalakító nélkül alkalmazható, nagyon megbízható (mert nem tartalmaz mozgó alkatrészeket) és a teljesítmény/térfogat arány ennél az aktuátornál a legnagyobb. A hatásfok értéke csak közvetlen (árammal) fűtés esetében érvényes.

2. Aktuátor tervezésénél, ha két szélső érték között kell pozícionálni valamit, elegendő ismerni az adott hőmérsékletnél és mechanikai feszültségnél az ötvözet paramétereit. Folyamatos, nagy pontosságú pozícionálásnál ($\Delta x < 0.2$ mm) már szabályozórendszert kell alkalmazni.

Irodalom

1. C. Liang, C.A. Rogers: Design of Shape Memory Alloy Actuators, Journal of Mechanical Design, Vol. 114, June 1992, p. 223-230.
2. L.C. Brinson, M.S. Huang: Simplification and comparison of shape memory alloy constitutive models, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1995
3. Duering, T.W. at al.: Engineering Aspects of Shape Memory Alloys, Butterworth-Heinemann Ltd, London 1990, ISBN 0-750-61009-3
4. Roger G. Gilbertson: Muscle wires project book, Mondo-Tronics, Inc. 1994, ISBN 1-879896-13-3.