FIATAL MŰSZAKIAK TUDOMÁNYOS ÜLÉSSZAKA

Kolozsvár, 1999. március 19-20.

A méretek csökkentésének hatása az alakemlékező fém aktuátorokra

Mihálcz István, Ilie Zudor Angyalka, Baranyi Péter

Abstract

This paper analyses scale effects of shape memory alloy (SMA) actuator. The analysis is based on thermal aspects and scaling effects on both convective and conductive heat transfer cases, which is a quite novel approach. Results of this analysis have effects on surface temperature and maximum current density of micro-actuators.

A méretek és a lépték hatása a hőátadásra

Az alakemlékező fémek (SMA-k) olyan nagy teljesítmény/térfogat aránnyal rendelkező aktuátorok, amelyeknek az értéke összehasonlítható a hidraulikus aktuátorokéval. Általában huzal formájában alkalmazzák őket. Az SMA huzal a rajta átvezetett elektromos áram által termelt hő hatására működtethető, és egy egyszerű, közvetlen meghajtású (direct drive), más mozgó alkatrészt nem tartalmazó aktuátor tervezését teszi lehetővé.

Az SMA aktuátorok tervezésénél az egyik legfontosabb paraméter a megfelelő hűtés biztosítása. Ezek az aktuátorok abban különböznek a többi aktuátortípustól, hogy itt a hűtésnek a működési sebességre közvetlen hatása van. Mindkét hőátadási egyenlet (itt a hőszugárzás elhanyagolható) – a vezetési és a konvekciós – tartalmaz egy-egy tényezőt, a hővezetési, illetve a konvekciós hőátadási tényezőt, melyeknek nagy szerepük van a hűtésben. Hővezetés esetében ez a tényező anyagfüggő, és állandónak tekinthető egy adott hőmérsékleti intervallumban. A konvekció viszont sok változótól függ és nagyon bonyolult kifejezéssel lehet meghatározni. Makroszkopikus rendszereknél ennek a tényezőnek az értéke, gázokban történő szabad konvekció esetén, 2-25 W/m²K között szokott lenni.

Vizsgáljuk meg, hogy mi történik, ha csökkentjük a rendszer méreteit.

A feladatot úgy lehet megoldani, hogy felhasználjuk a Nusselt, Rayleigh és Prandtl számok közötti összefüggést egy SMA huzalra. A huzalt ebben az esetben egy hosszú vízszintes hengerrel modellezzük:

$$\overline{Nu}_D = \left(0.60 + \frac{0.387 \cdot Ra_D^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0.559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right)^2 \quad 10^{-5} < Ra_D < 10^{12}$$

$$\text{ahol } \overline{Nu}_D = \frac{\bar{h} \cdot D}{k} \text{ és } Ra_D = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{surf} - T_{env}) \cdot D^3}{\gamma \cdot \alpha}$$

A következő táblázat ismerteti a fenti egyenletben szereplő változókat levegőre, 1 atmoszféra nyomásra és 400°K-ra vonatkozóan:

A változó jelölése	Értéke	Jelentése
g	9.81 m/s ²	gravitációs gyorsulás
Pr	0.690	Prandtl szám
v	26.4x10 ⁻⁶ m ² /s	kinematikus viszkozitás
α	38.3x10 ⁻⁶ m ² /s	termikus diffuzivitás
k	33.8x10 ⁻³ W/mK	hővezetőképesség
β	2.73x10 ⁻³ 1/K	hőtágulási együttható

Figyelembe véve a kicsinyítést, vagyis a méretek csökkentését, a fenti egyenletekből levezetve a hőátadási tényezőt kapjuk:

$$\bar{h} = \left(2.192 + \frac{0.110}{\sqrt{D}} \right)^2 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad \text{ha } 10 \mu m < D < 10 m$$

Hasonló egyenletet kapunk gömbfelületre vagy síkra is. Ábrázolva a hőátadási tényezőt, észrevehető, hogy értéke kis méreteknél (100 mm alatt) fordítottan arányos az átmérővel, nagy méreteknél pedig konstans.

A lépték hatása az SMA-aktuátoroknál

Az olyan fizikai mennyiségek, mint az erő, nyomaték, munka, sebesség, teljesítmény felvétel, hatásfok, stb. értékei nem ugyanakkora mértékben csökkennek az SMA méreteinek csökkentése esetén.

A következőkben azt vizsgáljuk, hogy milyen kedvező vagy kedvezőtlen hatása van a lépték csökkentésének az SMA aktuátorra. Minden geometriai méretet ugyanakkora léptékkel csökkentjük. A 0 indexek a kezdeti értékeket, az L pedig a karakterisztikus hosszt jelölik.

A lépték csökkentésének hatása az erőre, a nyomatékra, az elmozdulásra és a munkára

Egy SMA huzal aktív hosszának 5%-ával (ε_0) húzódik össze. Ha a huzal hosszát L -szeresére csökkentjük, az összehúzódás értéke is L -szeresére fog csökkenni.

$$\varepsilon = L \cdot \varepsilon_0$$

Azonos mechanikai feszültség esetén, mivel a keresztmetszet területe L^2 arányban csökken, a terhelőerő értéke is L^2 arányban fog csökkenni:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{L^2 \cdot A_0} = \frac{F_0}{A_0} \quad \Rightarrow \quad F = L^2 \cdot F_0$$

Ez által az aktuátor által végzett munka: $W = F\varepsilon = L^2 F_0 L \varepsilon_0 = L^3 W_0$, tehát L^3 -nel csökken. Ennek ellenére a specifikus teljesítmény értéke nem változik:

$$\frac{W}{V} = \frac{L^3 \cdot W_0}{L^3 \cdot V_0} = \frac{W_0}{V_0} = \text{konstans}$$

Forgató aktuátoroknál a létrehozott nyomaték $M = RxF = LR_0 x L^2 F_0 = L^3 M_0$, vagyis L^3 -nel csökken. Egy adott tömeg felemeléséhez szükséges nyomaték viszont L^4 arányban csökken (mert a súly L^3 és az elmozdulás L arányban csökken). Ebből látszik, hogy a rendelkezésre álló/szükséges nyomaték L^{-1} -nel lesz arányos!

Hasonló a helyzet a lineáris aktuátornál is, egy adott tömeg felemelésénél: a rendelkezésre álló/szükséges erő L^{-1} -nel lesz arányos.

Ez azt jelenti, hogy az SMA aktuátor miniaturizálása esetén (mint lineáris, mint forgó rendszerénél) a vártnál nagyobb lesz a rendelkezésre álló nyomaték (erő), míg a külső nyomaték (erő) csak a tömegtől függ. Ezt a nagyobb nyomatékot (erőt) nagyobb tömegek mozgatására lehet alkalmazni. Hasonló analógiát találunk a természetben, ahol a hangya saját súlyánál 10-szer nagyobb tömegeket tud cipelni, míg az elefánt testsúlyának csak törtrészét képes felemelni.

A lépték hatása a válaszidőre és a kimenő teljesítményre

Az SMA sebessége a lehülési időtől függ (a felfűtési idő nagyságrenddel lehet kisebb!). Elektromos vezérlésnél a nagyobb áram (feszültség) alkalmazásával jelentősen csökkenteni lehet a felfűtési időt. A gyakorlatban ezért a felfűtés általában gyorsabb, mint a lehülés.

Az SMA-t időállandójával jellemezhetjük:

$$\tau = \frac{d \cdot \rho \cdot c}{4 \cdot h}$$

A fenti összefüggésben d a huzal átmérője, h a huzal hőátadási tényezője, ρ az ötvözet sűrűsége és c az ötvözet fajhője. Mivel a hőátadási tényező L^{-1} -nel arányos, ez egy L^2 -tel arányos lehülési időt eredményez. Tehát a ciklus-(válasz-)idő L^2 -tel lesz arányos, míg a működtetési frekvencia ennek a reciprokával, L^{-2} -nal. Ennek alapján egy fontos következtetéshez jutunk: a kimenő (hasznos) teljesítmény gyorsan fog növekedni méretcsökkentés esetén. Ez a hűtési felület és a hőátadási tényező növekedésével magyarázható.

A lépték hatása a teljesítményfelvételre és a hatásfokra

A teljesítményvesztés $Q = hA\Delta T$, tehát arányosan fog csökkenni (L -lel). Elosztva a térfogattal, a specifikus teljesítményvesztés L^{-2} -nal lesz arányos. Ez azt jelenti, hogy az aktuátor többet fog fogyasztani. Meg kell azonban jegyezni, hogy állandósult állapotban az SMA hatásfoka zérus. Ciklikus mozgás esetén az energiafelvétel akkor minimális, ha az SMA felfűtési ideje nagyon kicsi, ezért a felfűtés közben csak nagyon kevés hőt tud átadni a környezetének. A felfűtésre fordított energiát adjuk át a környezetnek a lehülési fázisban. Az energia csak akkor arányos a tömeggel ($\sim L^3$), ha a cikluson belül munkavégzés történik. Ezek szerint a gyors felfűtést alkalmazó ciklusoknál a hatásfok állandó és nem változik a méretek csökkentésével. A maximális működési frekvenciánál ($\sim L^{-2}$) a teljesítményfelvétel arányos a kicsinyítési tényezővel (L -lel).

A lépték hatása az aktuátor felületére

Egy termikusan működtetett készülékben a hő az aktuátortól a készülék többi alkatelméhez vezetődik el. Ezzel növekedni fog az összes alkatétel hőmérséklete. Ez hátrányos lehet sok alkalmazásnál, például a gyógyászatban, ahol az implantátum felületi hőmérséklete csak néhány fokkal haladhatja meg a testhőmérsékletet.

Ha az aktuátor valamilyen anyaggal, például szilikongumival van bevonva, akkor a következő egyenletekkel lehet meghatározni a felületi hőmérsékletet:

$$Q = \frac{T_{actuator} - T_{env}}{R_{conduction} + R_{convection}}$$

$$Q = \frac{T_{surf} - T_{env}}{R_{convection}}$$

ahol Q a hőfolyam az aktuátortól a környezet felé, $T_{actuator}$ az aktuátor hőmérséklete működtetés közben. Ez egy adott aktuátorra állandó, és független annak fizikai méreteitől. $R_{convection} = 1/hA$ a konvekciós termikus ellenállás, $R_{conduction}$ az aktuátor körüli szigetelés termikus ellenállása. Az utóbbi értéke függ a szigetelő réteg felületének alakjától:

- síkfelületnél: $R_{conduction} = L/kA$
- hengerfelületnél: $R_{conduction} = \ln(R_2/R_1)/2\pi Hk$
- gömbfelületnél: $R_{conduction} = (1/R_1 - 1/R_2)/4\pi k$

ahol L a felület vastagsága, A a felszíne, R_1 és R_2 a belső és a külső sugara, H a henger magassága, k a szigetelés termikus vezetőképessége és h a konvekciós hőátadási együttható.

A hőfolyam egyenleteiből felírható, mivel az SMA által a környezetnek átadott hőmennyiség egyenlő a szigetelésen áthaladó hőmennyiséggel:

$$\frac{\Delta T_{surf}}{\Delta T} = \frac{1}{1 + \frac{h}{k} f \cdot L}$$

ahol ΔT és ΔT_{surf} az SMA és a szabad felszín hőmérsékletkülönbségei. Az f egy alak-tényező, ami a következő összefüggésekkel határozható meg:

- síkfelületnél: $f = 1$
- hengerfelületnél: $f = \ln(R_2/R_1)$
- gömbfelületnél: $f = R_2/R_1 - 1$

Egy levegőn lévő (szabad konvekció) gumiréteggel bevont SMA aktuátor relatív felületi hőmérséklete a karakterisztikus hossz függvénye. Az egyenletekből látható, hogy a hőmérsékletre nézve létezik egy

kritikus hossz: a k/hf . Ez alatt a felületi hőmérséklet egyenlő az aktuátor hőmérsékletével. Vékonyabb szigetelőréteg és intenzívebb hűtés alkalmazásával ez az érték csökkenthető. Léptécsökkentésnél a szigetelés már olyan vékony lesz, hogy hatása elhanyagolható. A szigetelő felületének növelésével nem csökkenthető nagymértékben a lehűlési idő. Például 10%-os csökkentést majdnem 10-szeres felületnövekedésnél kapunk.

Maximális áramsűrűség

A konvektív hőátadás arányos a felülettel, a hőmérsékletkülönbséggel és a konvektív hőátadási együtthatóval. Egyensúlyi állapotban:

$$P = R_{elect} I^2 \approx h L^2 \Delta T \quad (\text{konvekciónál})$$

Egy előre megadott maximális hőmérséklet esetén, mivel a villamos ellenállás arányos L^{-1} -nel, a maximális áram arányos lesz $h^{1/2} L^{3/2}$ -vel. Kis méreteknél, h arányos L^{-1} -nel, tehát a maximális áram L -lel lesz arányos. Nagy méreteknél, mivel h konstans, a maximális áram $L^{3/2}$ -nel arányos.

Hővezetés esetében a hőelvezetés arányos a felülettel és a hőmérsékletgradienssel. Egy adott hőmérsékletkülönbségre a hőmérsékletgradiens fordítottan arányos L -lel. Eredményül azt kapjuk, hogy a maximális áram is L -lel arányos:

$$P = R_{elec} I^2 \approx L^2 \frac{dT}{dx} \Rightarrow I \approx L \quad (\text{vezetésnél})$$

A két folyamat (konvekció és vezetés) együttes hatása esetén a maximális áram egy L és $L^{3/2}$ közötti értékkel lesz arányos, ami függ a geometriai méretektől és a hűtés típusától.

A konvektív és a hővezetési ellenállás jelentősége függ a méretektől. A kettő közötti arány egy, ha a külső átmérő 100 mm körüli. E fölött a hővezetés a domináns, ez alatt pedig a konvekció. Mindkét esetben azonban a maximális áram L -lel lesz arányos.

Összehasonlítás és következtetések

A léptécsökkentési számításokat elvégezve több aktuátortípusra, az eredmények a következő táblázatban láthatók:

Aktuátor típusa	Határfeltételek	Erő	Válaszidő	Teljesítménysűrűség
SMA	termikus válasz	L^2	L^2	L^{-2}
Elektrosztatikus motor.	$V = \text{konst.}$	Konst.	L^2	L^{-4}
	$E = \text{konst.}$	L^2	L^1	L^{-1}
Reluktancia motor	$J \approx L^{-1}$	L^2	L^2	L^{-1}
Állandómágneses motor	$J \approx L^{-1}$, $B = \text{konst.}$	L^2	L^1	L^{-1}
Lorentz-erő	$J \approx L^{-1}$	L^2	L^1	L^{-1}
Piezo motor	Rezonancia	L^2	L^1	L^{-1}

Elméleti szempontból összehasonlítva a különböző aktuátorok léptécsökkentésekor az erő arányossági tényezőjét, észrevehető, hogy ezek értéke arányos L^2 -tel az elektrosztatikus erő kivételével, aminek értéke konstans. Makroszkopikus szempontból az SMA a leglassúbb, de léptécsökkentéskor a sebessége L^2 arányban változik, míg a többi aktuátoré csak L -lel. Ezáltal az SMA-nál nagy sebességnövekedés érhető el. A teljesítménysűrűség is kedvezően alakul az SMA-nál. Ennél csak az elektrosztatikus aktuátor tényezője jobb, de csak nagyon kis méreteknél.

Mindezek alapján elmondható, hogy az SMA aktuátorok rendelkeznek a legnagyobb teljesítménysűrűséggel az 1 mm^3 alatti tartományban.

Ez a cikk az OTKA F026127-es és F030056-os számú pályázatainak a támogatásával készült.

Mihálcz István, egyetemi tanársegéd, Budapesti Műszaki Egyetem, Finommechanikai és Optikai Tanszék, H-1111 Budapest, Egrý J. u. 1, Tel: (..36-1) 463-2088, Fax: (..36-1) 463-3787, E-mail: mihalcz@hotmail.com.

Ilie Zudor Angyalka, okl. gépészmérnök, PhD hallgató, Budapesti Műszaki Egyetem-MTA SZTAKI, Integrált Gépészeti Informatikai Rendszerek Tanszék, H-1111, Kende u 13-17, Tel: (..36-1) 466-5644/231, E-mail: ilisa@hotmail.com.