FIATAL MŰSZAKIAK TUDOMÁNYOS ÜLÉSSZAKA

Kolozsvár, 1999. március 19-20.

Az alakemlékező fémek modelljeinek összefoglalása

Mihálcz István, Ilie Zudor Angyalka

Abstract:

Shape memory alloys (SMA) are increasingly used in many engineering fields. In order to fully utilise the SMA's potential, it is necessary to have a good understanding of its mechanical behaviour under thermal and mechanical loading. For this reason, several models were developed. The proposed constitutive models can be classified in 5 categories. An extensive review of the SMA constitutive models is presented in this paper.

Bevezetés

Az alakemlékező fémötvözetek legfontosabb tulajdonsága az, hogy deformálva őket, majd egy átalakulási pont fölé melegítve, képesek emlékezni egy előzőleg betanított alakra. E folyamat során egy SMA huzal hosszának akár 8%-val is összehúzódhat. Ez teszi lehetővé az SMA-nak aktuátorként való alkalmazását. Ahhoz, hogy az SMA alkalmazási lehetőségeit teljesen ki tudjuk használni, meg kell értenünk a mechanikai viselkedését termikus és mechanikai terhelés esetében. Ebből az okból számos modellt dolgoztak ki, amelyek napjainkban is használatosak. Ezek a modellek öt csoportba sorolhatók: ferroelektromos modellek, belső változókon alapuló modellek, plaszticitáson alapuló modellek, hiszterézis modellek és nem-izotermikus modellek. A következőkben ezek a modellek kerülnek bemutatásra.

1. A ferroelektromos modell

Ingo Müller és társai (1979, 1980, 1989, 1991) egy ferroelektromos, és ferromágneses modellt javasoltak, amely a termodinamikán, a statisztikus fizikán és a szabad energián alapszik. Ezeket az egyenleteket kiegészítették és eredményül az SMA konstitutív egyenletét kapták. Az ő leírásukban a hőmérséklet hatása a szabad részecskék energiájának fluktuációjából ered a potenciálvölgyekben, ami a potenciálvölgy mélységeként van definiálva. A modell az ötvözetben két, egyszerre létező fázist feltételez. Mindkét fázis rendelkezik saját szabad energiával. A modell elég jól közelíti a fázisátalakulást, és az anyag viselkedését. Ennek ellenére nagyon bonyolult, és nehézkes az alkalmazása a mérnöki tervezésben, főleg a mikrostruktúrák tulajdonságainak becsléseire a különböző folyamatokban. Falk és társai (1980) módosították Müller modelljében a szabad energia-erő-hőmérséklet összefüggést és, egy egyszerűbb explicit összefüggést javasoltak. Ez a modell jól alkalmazható a rugalmassági modulus változásának, az alakemlékezés, a hőmérséklet, valamint a mechanikai feszültség által indukált fázisátalakulás és az egyirányú terhelés alatti hiszterézishurkok tanulmányozására.

2. A belső változókon alapuló modell

A második típusú modellcsoport a Helmholtz féle szabad energián alapszik, ami a termodinamika alapegyenletéből származik. A Helmholtz féle szabad energia az általános állapotváltozók függvénye. Ezek az alakemlékező fémeknél a következők: a alakváltozás (ϵ), a hőmérséklet (T) és a martenzittartalom (ξ). Így az általános változót a következőképpen definiálhatjuk: $\Lambda \equiv (\epsilon, T, \xi)$. Ebből az egyenletből kiindulva, és felhasználva a termodinamika első és második törvényét, az SMA alapegyenletéhez jutunk (Liang és Rogers, 1990):

$$\bar{\sigma} = \rho_0 \cdot \frac{\delta \Phi}{\delta \epsilon} = \sigma(\bar{\epsilon}, T, \xi)$$

A fenti egyenletből kiindulva, az alapegyenlet deriválva kapjuk, hogy a mechanikai feszültség változása az alakváltozás, a hőmérséklet és a martenzittartalom növekményfüggvénye:

$$\dot{\sigma} = E \cdot \dot{\varepsilon} + \Theta \cdot \dot{T} + \Omega \cdot \dot{\xi}$$

ahol E a Young (rugalmassági) modulus, Θ a termoelasztikus tenzor és Ω a transzformációs tenzor, ami az alakváltozás változását definiálja a fázisváltozás alatt. Ha a szabad energia egyenlete adott, minimalizálva a szabad energiát, megkaphatjuk a fázisok egyensúlyi állapotát. Ez adja a martenzittartalom, az alkalmazott mechanikai feszültség és a hőmérséklet közötti összefüggést. Ezt elég nehéz alkalmazni. A szabad energia egyenlete helyett, tegyük fel, hogy következtetni lehet a martenzittartalomra a mechanikai feszültség és a hőmérséklet függvényében. A gyakorlati mérésekből következtetni lehet a martenzites vagy az ausztenites átalakulás egyenleteire. Így, mivel sok kutató különböző függvényekkel közelítette a martenzittartalmat, különböző belső változón alapuló modellek születtek.

Tanaka és társai (1982, 1985, 1986, 1991 és 1994) egy l hosszúságú SMA huzalon (egydimenziós) tanulmányozták az ausztenites és a martenzites fázisátalakulást. Munkájukban, az átalakulás kinetikájából adódóan, a martenzittartalom a mechanikai feszültség és a hőmérséklet exponenciális függvénye:

$$\begin{aligned}\xi_{M \rightarrow A} &= \exp[A_a(T - A_s) + B_a \cdot \sigma] \\ \xi_{A \rightarrow M} &= 1 - \exp[A_m(T - M_s) + B_m \cdot \sigma]\end{aligned}$$

ahol A_a , A_m , B_a és B_m egy adott hőmérsékleten konstans anyagjellemzők, A_s , M_s , az átalakulási hőmérsékletek. A modellel ki lehet számolni, és le lehet írni a mechanikai feszültség és az alakváltozás közötti összefüggést, a szuperelasztikus effektust és a pszeudoelasztikus effektus energia-disszipációját. Mégis elég nehéz ezt a modellt a mérnöki tervezésben és számításokban alkalmazni.

Tanaka után Liang és Rogers (1990) kidolgoztak egy másik belső változókra alapuló egydimenziós modellt. Ők a martenzittartalmat nem egy mechanikai feszültséget és hőmérsékletet tartalmazó exponenciális függvénnyel, hanem egy koszinuszfüggvénnyel közelítették, ami jobban összhangban van a gyakorlatban mért értékekkel:

$$\begin{aligned}\xi_{M \rightarrow A} &= 0.5 \cdot \xi_M \cdot \{\cos[a_A \cdot (T - A_s) + b_A \cdot \sigma] + 1\} \\ \xi_{A \rightarrow M} &= 0.5 \cdot (1 - \xi_A) \cdot \cos[a_M \cdot (T - M_s) + b_M \cdot \sigma] + 0.5 \cdot (1 + \xi_A)\end{aligned}$$

A modellel kétségtelenül ki lehet számolni, és le lehet írni a mechanikai feszültség és az alakváltozás közötti összefüggést, a szuperelasztikus effektust és a szuperelasztikus effektus energia-disszipációját egy adott hőmérséklettartományban. A szabad-, a korlátozott- és az ellenőrzött tehermentesítést is figyelembe vették a modellben. Ez a modell csak egy pár mérhető konstans anyagjellemzőt igényel, ezáltal könnyen alkalmazható a mérnöki tervezésben.

Ezt az egydimenziós modellt egészítették ki Liang és Rogers (1992) háromdimenziósra. Így már felhasználhatóvá vált bonyolult SMA struktúrák tanulmányozására illetve modellezésére. Ez a modell már tudja kezelni a kétútas alakemlékezési effektust is (Zhang et al., 1992).

Brinson 1993-ban egy másik koszinusz modellt dolgozott ki, aminek alapjául Liang és Rogers modellje szolgált. Modelljében a martenzittartalom belső változót két részre osztotta, egy hőmérséklet indukálta és egy mechanikai feszültség indukálta komponensre:

$$\xi = \xi_s + \xi_T$$

ahol ξ_T a többorientációjú hőmérséklet indukálta martenzittartalom, ξ_s az egyorientációjú mechanikai feszültség indukálta martenzittartalom. E komponensek szétválasztásával ez a modell tudja kezelni a mechanikai feszültség által indukált martenzitképződést az A_s hőmérséklet felett a szuperelasztikus tartományban, és tudja modellezni az alakemlékezési effektust az alkalmazott feszültségre az összes hőmérsékleten. Tehát a Brinson modell már alkalmazható az összes hőmérsékleten. Ez a modell bevezet olyan, nem konstans anyagfüggvényeket, amelyekkel az anyagjellemzők változását lehet meghatározni. Felhasználva az állandó és a mérhető anyagtulajdonságokat, a Brinson modell könnyen alkalmazható a mérnöki tervezésben, a mechanikai feszültség-nyúlás összefüggések kiszámításában és az SMA effektus modellezésében.

Barret (1994, 1995) figyelembe vette az SMA-ban a húzás és nyomás közötti különbséget, és egy olyan modellt javasolt, amely szintén a martenzittartalmat használja fel belső változónak. Ez a modell egy lineáris transzformációra alapozva, szintén különválasztja a mechanikai feszültség és a

hőmérséklet által indukált nyúlást. Ezen kívül figyelembe vette a fázisváltozás alatt az anyag keményedését és a mechanikai húzás-nyomás előző állapotait. Tehát ez a modell egy sokkal jobb előrejelzést ad. A konstitúciós egyenletben a húzás és a nyomás folyamatában különböző mechanikai feszültségváltozási faktorokat alkalmazott, mint az egy-, mint a háromdimenziós modellben:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + (\alpha + \beta) \cdot \dot{T}$$

ahol ε az alakváltozás, E a rugalmassági modulus, α és β hőtágulási együtthatók, T a hőmérséklet. A modell feltételezi, hogy az anyagjellemzők nem függenek a hőmérséklettől. Lehet modellezni a húzás-nyomás transzformációkat, a fázisváltás alatt az anyag keményedését és a hiszterézis részleges átalakulással. Ez a modell a rugalmas deformáció tartományában dolgozik.

Boyd és Lagoudas (1994a) szintén egy egydimenziós modellt alkottak, melynek alapja a Tanaka féle exponenciális modell. Ebben a húzási feszültség helyett a képlékenységi alakváltozásoknál használatos Von Mises féle egyenértékű feszültséget alkalmazták, mert ez az átalakulás egy nemelasztikus folyamat. A belső változók evolúciós egyenletének megállapítására a nemelasztikus folyamatokban a termodinamika első és második törvényeit alkalmazták. A modellben a nemelasztikus folyamatok leírásához egy kiegészítésre volt szükség, mégpedig arra, hogy az energia a martenzittartalom függvénye. Ez a feltételezés a vegyes szabadenergia kifejezéséből az Edelen féle disszipatív potenciálmélethez adódik. Bo és Lagoudas (1994) általánosították modelljüket, bevezetve egy állapotváltozóktól függő határértéket egy konstans érték helyett, és kifejezték néhány paramétert a martenzittartalom függvényében. Ezekkel a módosításokkal ez a modell egyesíti a Tanaka, a Liang és Rogers, és a Boyd és Lagoudas által javasolt modelleket.

3. A plaszticitási (képlékenységi) modell

Kafka (1994) a nemelasztikus folyamatokat leíró SMA modellt kiterjesztette a heterogén anyagokra is. A heterogén anyagokban az izotermikus alakítási folyamat alapegyenletében egy elasztikus és egy elasztoplasztikus rész különböztethető meg. Ez a modell kezelni tudja az SMA-ban jelenlevő alakemlékezési effektust és a szuperelaszticitást. A hőmérsékletváltozás hatását, a deviátor mechanikai feszültség alatti SMA termikus hőtágulása és az alakváltozási folyamat közötti lineáris összefüggésként írja le.

Brandon és Rogers (1992) Müller és Xu mérései alapján egy SMA egykristály elemzésén alapuló modellt javasoltak. A modell figyelembe veszi a hiszterézishurokban mind a rugalmas, mind a plasztikus állapotot. A modell a hagyományos képlékenységi elmülethez viszonyítva egy sokkal szélesebb fizikai jelenségskálát tud kezelni. Előrejelzi az elasztikus és a plasztikus fázisok közötti transzformációt, figyelembe véve az előző mechanikai feszültségeket és fázisváltásokat. Ez a modell jól szimulálja az SMA egykristályt egyenletes átalakulási folyamatokban elasztikus és plasztikus módban.

4. A hiszterézis modell

Graesser és Cozzarelli (1990, 1991) a csillapító anyagokra kidolgozott hiszterézis-modell alapján egy egydimenziós SMA modellt dolgoztak ki. Az SMA-ban a mechanikai feszültség által előidézett micromechanikus fázisátalakulás egy nemelasztikus deformációt okoz, és ez nagy energiaelnyelő kapacitást eredményez. A nemelasztikus mechanikai feszültség növekménye a mechanikai feszültség, a fázisállapot és más belső változóknak a függvénye:

$$\dot{\sigma} = E \cdot \left[\dot{\varepsilon} - \left| \frac{\sigma - \beta}{\gamma} \right|^{n-1} \cdot \left(\frac{\sigma - \beta}{\gamma} \right) \right]$$

$$\beta = E \cdot \alpha \cdot \left[\varepsilon - \frac{\sigma}{E} + f_T \cdot |\varepsilon|^c \operatorname{erf}(a\varepsilon) \right]$$

ahol β egy egydimenziós belső feszültség jellegű tenzoriális változó, γ a határfeszültség, amelynél elkezdődik a mechanikai feszültség által indukált fázisátalakulás, α egy konstans, ami a nemelasztikus tartomány mereedségét adja meg, n egy konstans ami az elasztikusból a plasztikus állapotba történő átalakulást jellemzi, f_T egy konstans ami a hiszterézis típusát és nagyságát jellemzi, a egy konstans,

ami a tehermentesítés rugalmas alakváltozásától függ, c szintén egy konstans ami ellenőrzi a leterhelő feszültség-plató merevedségét.

A modell analóg a egydimenziós belső feszültség jellegű tenzoriális változót tartalmazó csúszás és viszkoplaszticitás nemelasztikus megfogalmazásával. Ez a modell ábrázolni tudja az elasztikus és nemelasztikus állapotot, valamint a különbséget az SMA terhelése és tehermentesítése között. Ezen kívül tudja kezelni a szuperelasztikus állapotot és az SMA martenzit ikerképződéséből adódó hiszterézist. Az SMA nem változó, konstans hőmérsékleteire is figyelembe lett véve a modellben.

5. A nem izotermikus modell

Ivshin és Pence (1994) valamint Pence és társai (1994) javasoltak egy modellt, ami figyelembe veszi a teljes átalakulás és a terhelés vagy a tehermentesítés közötti kapcsolatot. Hasonlóképpen a modell figyelembe veszi az izotermikustól az adiabatikus terheléssel történő állapotváltást egészen a hőközléses környezetben történő állapotváltásig. A modell csak egy változót használ az összes fázisban, ezért nem képes modellezni az ikerképződési jelenséget, ami általában az alakemlékezési effektussal jár. Meg lehet határozni a mechanikai feszültség-alakváltozás összefüggéseket az adiabatikus terheléstől egészen a hőközléses környezetben történő terhelésig.

Abeyaratne, Kim és Knowles (1994) egy olyan modellt javasoltak, ami figyelembe veszi az SMA-ban a terhelés gyors növekedésének a hatását. Alacsony terhelésnövekedésnél az izotermikus egyenletekkel le lehet írni az SMA viselkedését. Azonban a terhelés gyors növekedésénél a fázisátalakulás által keletkezett hőnek nagy hatása van az anyag viselkedésére. Valójában a hőmérsékletmező az SMA-ban nem azonos, és a hő fázishatára mozog, mint egy mozgó hőforrás. Azt, hogy a hőforrásnak milyen erejével és a hőterjedésnek milyen sebességével, azt nem lehet tudni. Az SMA-ban a lokális hő termikus keményedést okozhat. Ezért az SMA mechanikai viselkedése gyors terhelésváltozás hatására kapcsolt termo-mechanikai választ ad. Figyelembe véve ezeket a termikus sebességből adódó hatásokat, kifejtésre került egy klasszikus kontinuum-mechanikán alapuló önmagára épülő modell, melynek eredménye egy nemlineáris egyenlet, ami összekapcsolja a termikus és a mechanikai effektust:

$$\frac{k}{\rho \cdot c} \theta_{xx} = \left[1 + \frac{\mu \cdot \alpha^2}{\rho \cdot c} \theta \right] \theta_t + \frac{\alpha}{\rho \cdot c} \dot{\sigma} \cdot \theta + \frac{\zeta}{c} (\theta - \theta_0)$$

Megoldva a határértékfeladatot mozgó határfeltételekkel, fel lehet írni az SMA mechanikai feszültség-alakváltozás egyenletét gyorsan növekvő terhelésre.

Összefoglalás

Az ismertetett modellek előnyei és hátrányai:

- A ferroelektromos modellel jól lehet tanulmányozni a fázisátalakulásokat, de nehéz alkalmazni a mérnöki tervezésben.
- A belső változókon alapuló modell, az átalakulási folyamatban belső változóként a martenzittartalmat használja, ami fizikai szempontból kezelhetővé és könnyen érthetővé teszi. A legtöbb ilyen modell az elasztikus és az izotermikus folyamatokra van korlátozva.
- A plaszticitási modell az elasztikus és nemelasztikus folyamatoknál használatos, de főképp a sima folyamatok leírásánál alkalmazzák.
- A hiszterézis modell jól használható a nemelasztikus folyamatoknál, de a modell sokkal inkább fenomenológiai, mint fizikai leírást ad.
- A nem-izotermikus modell különösen az adiabatikus folyamatoknál alkalmazható, mint például gyorsan növekvő terhelések esetében.

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

Mihálcz István, egyetemi tanársegéd, Budapesti Műszaki Egyetem, Finommechanikai és Optikai Tanszék, H-1111 Budapest, Egry J. u. 1, 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