

MUISTIMETALLIT – MUISTIMETALLIAKTUAATTORIEN TERMOMEKAANINEN TOIMINTA JA MITOITUS

Merja Sippola, Tomi Lindroos
Marjaana Peltonen

Rakenteiden mekaniikka, Vol. 40
No. 1, 2007, s. 7-22

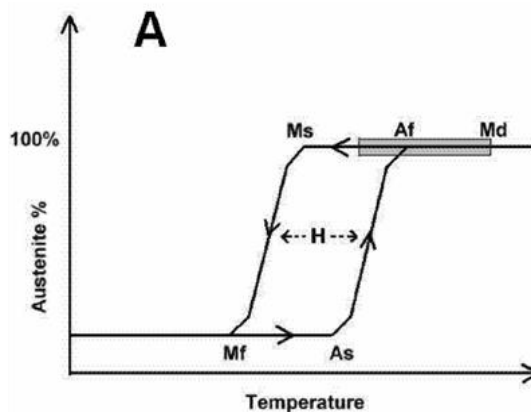
TIIVISTELMÄ

Tässä artikkelissa esitellään muistimetallien termomekaanisen toiminnan pääpiirteet sekä perusasiat lankamaisten muistimetalliaktuaattorien mitoituksesta rakenteiden muodon- tai jäykkyydenhallinnassa.

MUISTIMETALLIT JA MUISTIMETALLIAKTUAATTORIT

Muistiefekti

Muistimetalleilla on kyky palautua alkuperäiseen muotoonsa huomattavan suuren muodonmuutoksen jälkeen. Ilmiö perustuu materiaalin palautuvaan martensiitti-austeniitti-faasimuutokseen [¹] (Ks. Kuva 1).

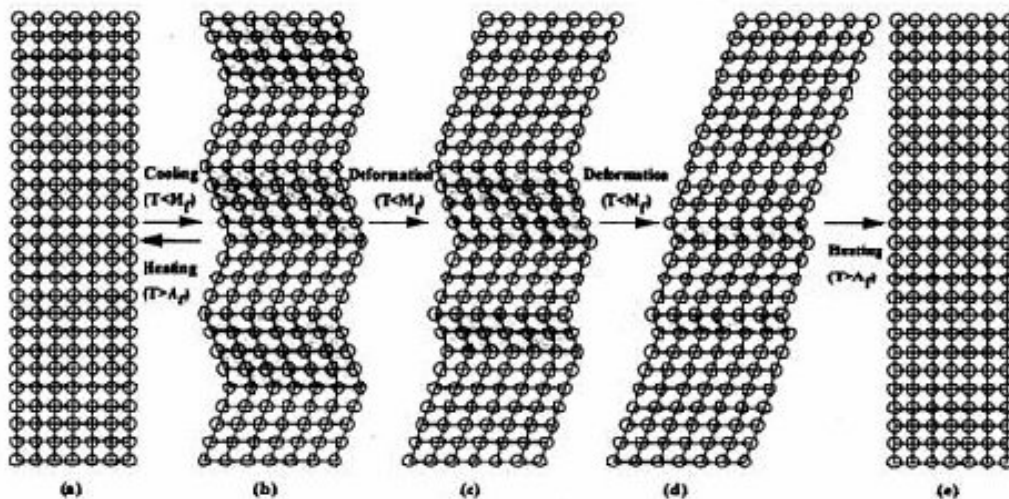


Kuva 1. Muistimetallissa tapahtuva faasimuutos.

Lämpötilaa M_f (martensite finish) alemmissa lämpötiloissa materiaali on martensiittisessä tilassa. Lämmitettäessä rakenne alkaa muuttua austeniittiseksi lämpötilassa A_s (austenite start). Lämpötilassa A_f (austenite finish) rakenne on täysin muuttunut austeniittiseksi. Jäähdytettäessä käynnistyy muutos martensiitiksi lämpötilassa M_s (martensite start).

Ulkoisen kuormituksen alaisena martensiittia voi myös muodostua M_s -lämpötilan yläpuolella eli ulkoinen kuormitus siirtää muutoslämpötiloja. M_d -lämpötila edustaa korkeinta lämpötilaa, jossa ulkoinen jännitys voi muuttaa rakenteen martensiittiseksi. Faasimuutokseen liittyy hystereesi: martensiitti-austeniittimuutos tapahtuu lämmitettäessä korkeammissa lämpötiloissa kuin käänteinen muutos jäädytettäessä. Hystereesin suuruus riippuu seoksesta.

Muistimetallin jäähtyessä austeniittisesta tilasta martensiittiseen tilaan ilman ulkoista kuormitusta martensiittivariantit pyrkivät suuntautumaan siten, että ulkoiset mittamuutokset ovat mahdollisimman pieniä energian minimoimiseksi (self accommodation, Ks. Kuva 2 a-b [2]). Kun martensiittifaasiin kohdistetaan ulkoinen kuormitus, variantit suuntautuvat ulkoisen jännityksen suuntaisesti (twinning, detwinning, Ks. Kuva 2 c-d). Martensiittifaasin kiderakenne on huomattavasti vähemmän symmetrinen kuin austeniittifaasin. Faasimuutos austeniitista martensiitiksi voi tuottaa 24 eri tavoin orientoitunutta martensiittivarianttia, mutta muutos martensiitista austeniittiin on mahdollista vain yhdellä austeniittifaasin orientaatiolla. Lämpötilan noustessa kaikki martensiittivariantit palaavat tähän yhteen määrättyyn austeniittifaasin orientaatioon, jolloin materiaalin alkuperäinen muoto palautuu Kuva 2 e.



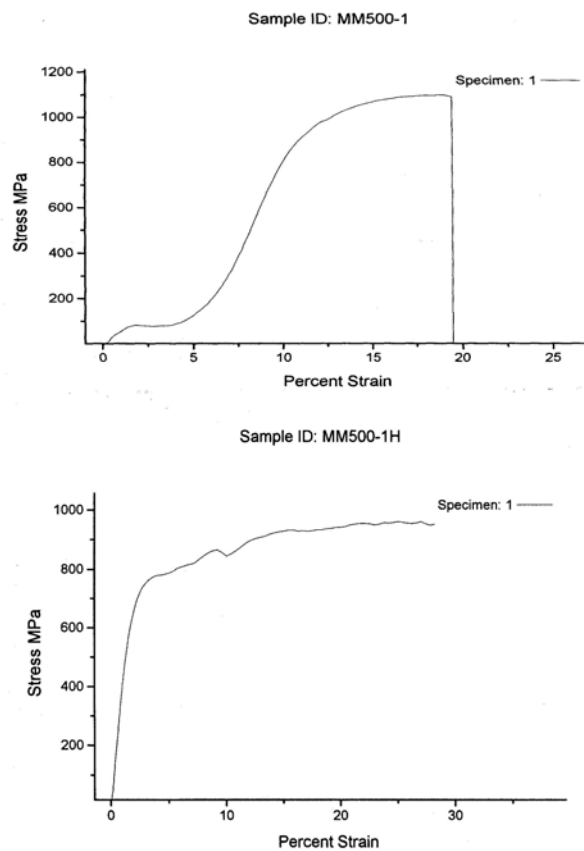
Mechanism of shape memory effect; (a) original parent single crystal, (b) self-accommodated martensite, (c–d) deformation in martensite proceeds by the growth of one variant at the expense of the other (i.e. twinning or detwinning), (e) upon heating to a temperature above A_s , each variant reverts to the parent phase in the original orientation by the reverse transformation. (After Otsuka)

Kuva 2. Muistiefekti lämpötilan ja ulkoisen jännityksen muuttuessa[2]

Mekaaninen käyttäytyminen

Kuormitettaessa martensiittista NiTi:a vedossa (Ks. Kuva 3a), jännitys-venymäkäyrässä havaitaan jännitystasanne. Tasanne muodostuu kun martensiittifaasin variantit alkavat suuntautua kuormituksen suuntaiseksi. Koska ulkoinen kuormitus vaikuttaa aina jännityksen kannalta edullisimmassa asennossa olevien varianttien suuntautumiseen, tapahtuu koko rakenteen suuntautuminen lähes vakiokuormituksella.

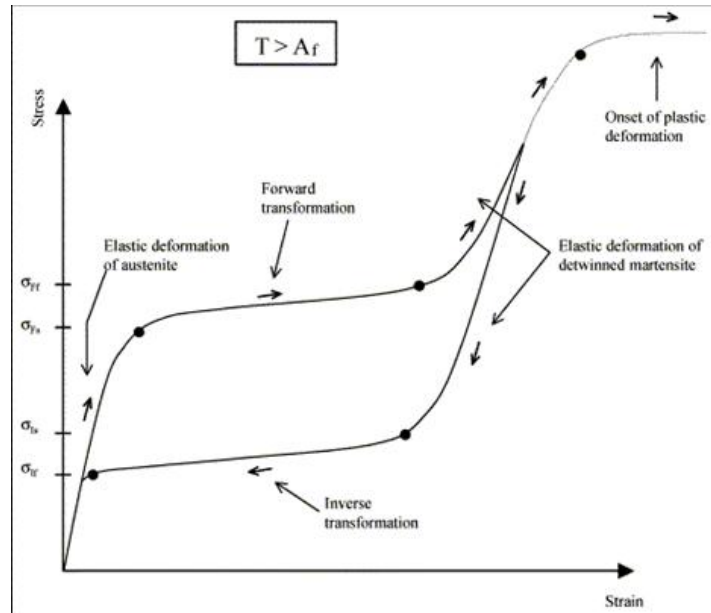
Tällöin syntyy suuri pseudoplastinen venymänmuutos (jopa 8 %). Kuormitusta edelleen kasvatettaessa suuntautunut rakenne deformatuu ensin elastisesti ja sitten plastisesti, kunnes lopulta materiaali murtuu. Jännitystasanteen muoto riippuu materiaalin käsittelytilasta: tasanne on vaakasuora vain riittävän korkeassa lämpötilassa esikäsittellyllä materiaalilla. Liun [3] mukaan jännitystasanteen jälkeen ulkoista kuormitusta kasvatettaessa tapahtuu lisää varianttien suuntautumista sekä suuntautuneen martensiitin elastista venymistä, mikä näkyy jännitys-venymäkäyrässä melko lineaarisena nousevana osana. Kuormitettaessa muistimetallia austeniittisessa tilassa M_d -lämpötilaa korkeammassa lämpötilassa jännitys-venymäkäyrä muistuttaa perinteistä metallien jännitys-venymäkuvaajaa (Ks. Kuva 3 b). Austeniittifaasin myötölujuus on huomattavan korkea.



Kuva 3. Muistimetallin käyttäytyminen vedossa a) martensiittisessä tilassa b) austeniittisessä tilassa M_d -lämpötilan yläpuolella.

Kuormitettaessa muistimetallia A_f -lämpötilaa korkeammassa mutta M_d -lämpötilaa alemmassa lämpötilassa materiaali käyttäytyy pseudoelastisesti eli superelastisesti (Ks. Kuva 4). Muodonmuutos alkaa austeniittifaasin elastisella venymisellä. Jännityksen kasvaessa austeniittinen faasi muuttuu epästabiiliksi ja rakenne alkaa muuttua martensiittiseksi ns. mekaanisen kaksostumisen avulla. Martensiittivariantit muodostuvat kuormituksen mukaan edullisimpaan suuntaan tai suuntautuvat välittömästi kuormituksen mukaan, jolloin venymänmuutos on suuri (jopa 15 %). Kuormitusta edelleen kasvatettaessa venyy martensiittifaasi ensin elastisesti ja lopulta plastisesti, kunnes materiaali murtuu.

Jos kuormitus poistetaan ennen plastisen muodonmuutoksen alkamista, palautuu materiaali alkuperäiseen muotoonsa. Kuormitusyksi muodostaa hystereesisilmukan eli muodonmuutos kuluttaa energiaa.



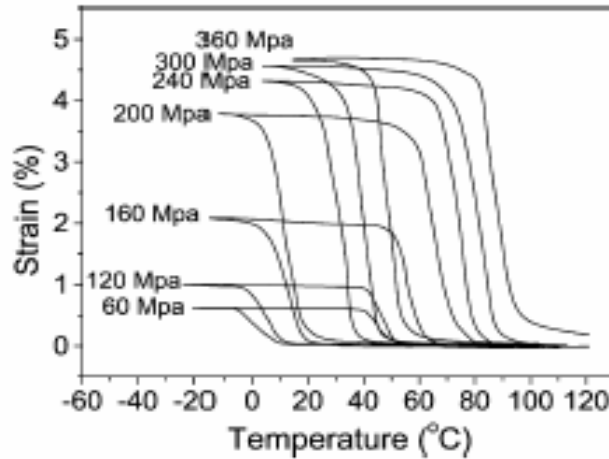
Kuva 4. Muistimetallin superelastinen käyttäytyminen

Muisti-ilmiö aktuaattorisovelluksissa

Muisti-ilmiötä voidaan hyödyntää aktuaattorisovelluksissa, joissa muistimetalli toimii useimmiten joko lanka- tai nauhamaisena lineaariaktuaattorina tai jousimaisena vetävänä tai puristavana aktuaattorina. Aktuaattoria kuormitetaan martensiittisena pseudoplastiselle alueelle ja sitten kuorma poistetaan, jolloin venymästä palautuu vain elastinen osa. Kun materiaali sitten lämmitetään austeniittin muodostumislämpötilan yläpuolelle, tapahtuu faasimuutos austeniittiseen faasiin, jolloin pseudoplastinen venymä palautuu. Palautuminen tuottaa sekä liikettä että voimaa eli faasimuutoksessa syntyvää työtä voidaan hyödyntää esimerkiksi nostamaan kuormaa. Aktuaattorien ohueen muotoon on useita syitä. Ohuita aktuaattoreita voidaan lämmittää resistiivisesti materiaalin oman lämmönvastuksen avulla ja jäähdyttää nopeammin kuin massiivisempia aktuaattoreita. Jäähdytystä voidaan nopeuttaa myös parantamalla lämmön siirtymistä aktuaattorin pinnalta esimerkiksi virtauksen avulla, mutta lämmönsiirtymisnopeus aktuaattorin sisällä yhdessä aktuaattorin dimensioiden kanssa asettaa ylärajan aktuaattorin toiminta-ajalle.

Faasimuutoslämpötilat ja termomekaaninen käyttäytyminen

Martensiitti-austeniittimuutoksen hystereesistä johtuen sekä aktuaattorisovelluksissa että superelastisissa sovelluksissa materiaali palautuu kuorman (mekaaninen, lämpökuorma tai näiden yhdistelmä) poistamisen jälkeen eri reittiä. Hystereesisilmukan koko ja muoto riippuvat jännityksestä kuvan 5 mukaisesti [4].



Kuva 5. Kuormituksen vaikutus venymään sekä transformaatiolämpötiloihin [4]

Kuten kuvasta 5 käy ilmi ulkoinen kuormitus muuttaa faasimuutoslämpötiloja huomattavasti. Suuremmilla jännityksen arvoilla jännityksen vaikutus faasimuutokseen on monilla muistimetalliseoksilla lähes lineaarinen, noudattaen Clausius-Clapeyronin yhtälöä [5]. On kuitenkin huomioitava että näin määritettävä kerroin riippuu seoksesta sekä sen käsittelytilasta eikä näin ollen ole yleisesti hyödynnettävissä.

$$s = \frac{d\sigma^{tr}}{dT} = - \frac{\Delta S}{\varepsilon^{tr} V} \quad 1$$

missä s = faasimuutosrajan kulmakerroin lämpötila-jännitystasossa

ΔS = entropian muutos

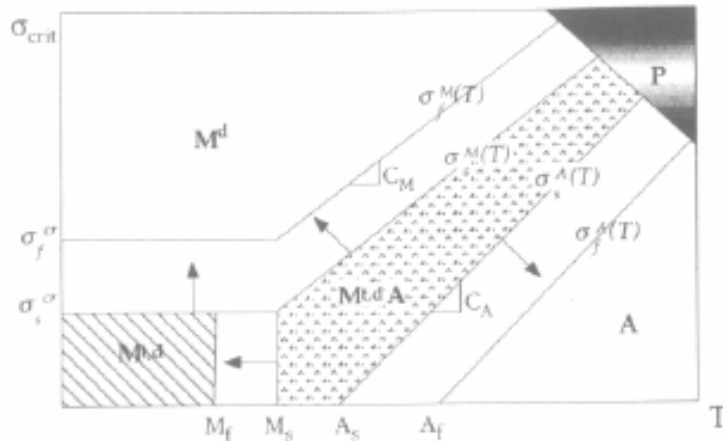
T = lämpötila [K]

V = moolitilavuus [mol]

σ^{tr} = faasimuutosjännitys

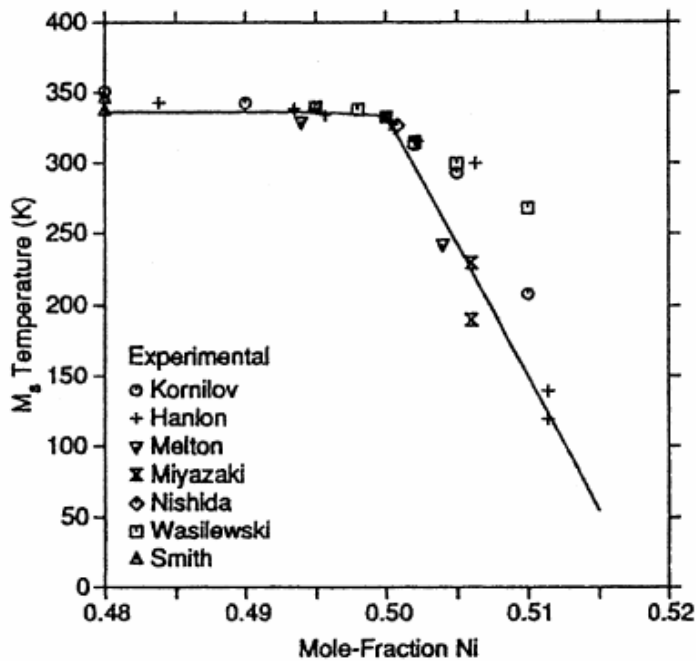
ε^{tr} = faasimuutosvenymä

Muistimetallien faasimuutoskäyttäytymistä kuvataan usein määrittämällä jännityksetötmässä tilassa olevan materiaalin muutoslämpötilat mittaamalla muutosta näytteen ja referenssimateriaalin välisessä lämpövirrassa kontrolloidun kuumennuksen ja jäähtymisen aikana (DSC-mittaus, engl. Differential Scanning Calorimetry). Kuvassa 6 on esitetty NiTi:n faasimuutoslämpötilojen riippuvuus jännityksestä vedossa [6]. A = austeniitti, M = martensiitti. Yläindeksi t = twinned (kaksostunut, suuntautumaton), yläindeksi d = deformed (suuntautunut). Väliwyöhykkeillä voi useampi faasimuoto esiintyä yhtä aikaa. P = plastisen muodonmuutoksen alue.



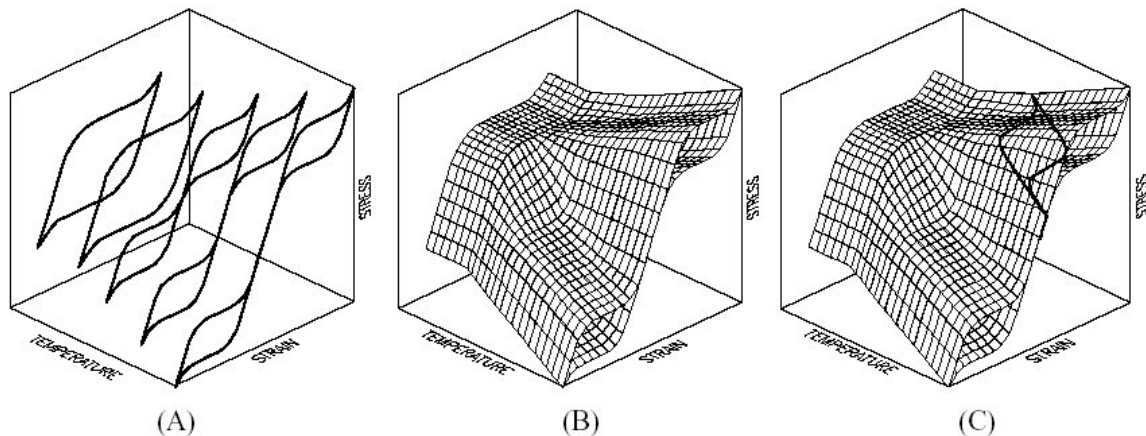
Kuva 6. NiTi:n faasimuutoslämpötilojen riippuvuus jännityksestä vedossa [6]

Faasimuutoslämpötiloihin vaikuttavat ulkoisen jännityksen lisäksi seoksen koostumus sekä erilaiset termomekaaniset käsittelyt. Pienikin muutos binäärisen Ni-Ti-seoksen Ni-pitoisuudessa saa aikaan dramaattisen laskun M_s -lämpötilassa (Ks. Kuva 7). Myös kolmannen seosaineen lisäyksellä on merkittävä vaikutus faasimuutoslämpötiloihin ja hystereesiin.



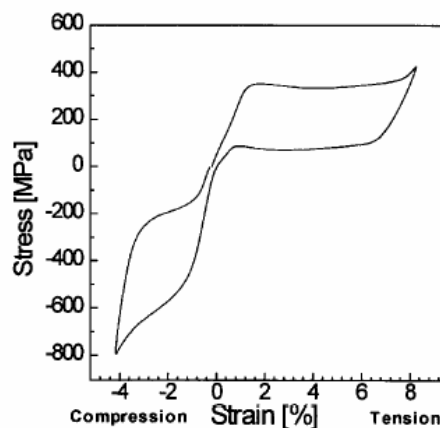
Kuva 7. M_s -lämpötila Ni-pitoisuuden funktiona binäärisille Ni-Ti seoksille.[1]

Kokonaisuutena muistimetallin termomekaaninen käyttäytyminen on karkeasti kuvan 8 mukaista [7], joskin puristuspuoli on kuvassa esitetty vetopuolen kaltaiseksi, mikä ei vastaa materiaalin todellista käyttäytymistä. Mm. lähteiden [8] ja [9] mukaan puristus- ja vetopuolen jännitysvenymäkäyrät eroavat merkittävästi toisistaan sekä pseudoelastisella alueella (Ks. Kuva 9) että martensiittisessä tilassa (Ks. kuva 10).



Kuva 8. Muistimetallin termomekaaninen käyttäytyminen [7] A 'Vakiolämpötilakokeiden tuloksiin sovitettut käyrät' Huom! Puristuspuoli ei vastaa todellista käyttäytymistä B Sovitettut kuormitus- ja kuormanpoistopinnat C Eräs laskettu jännitys-lämpötila-venymäpolku.

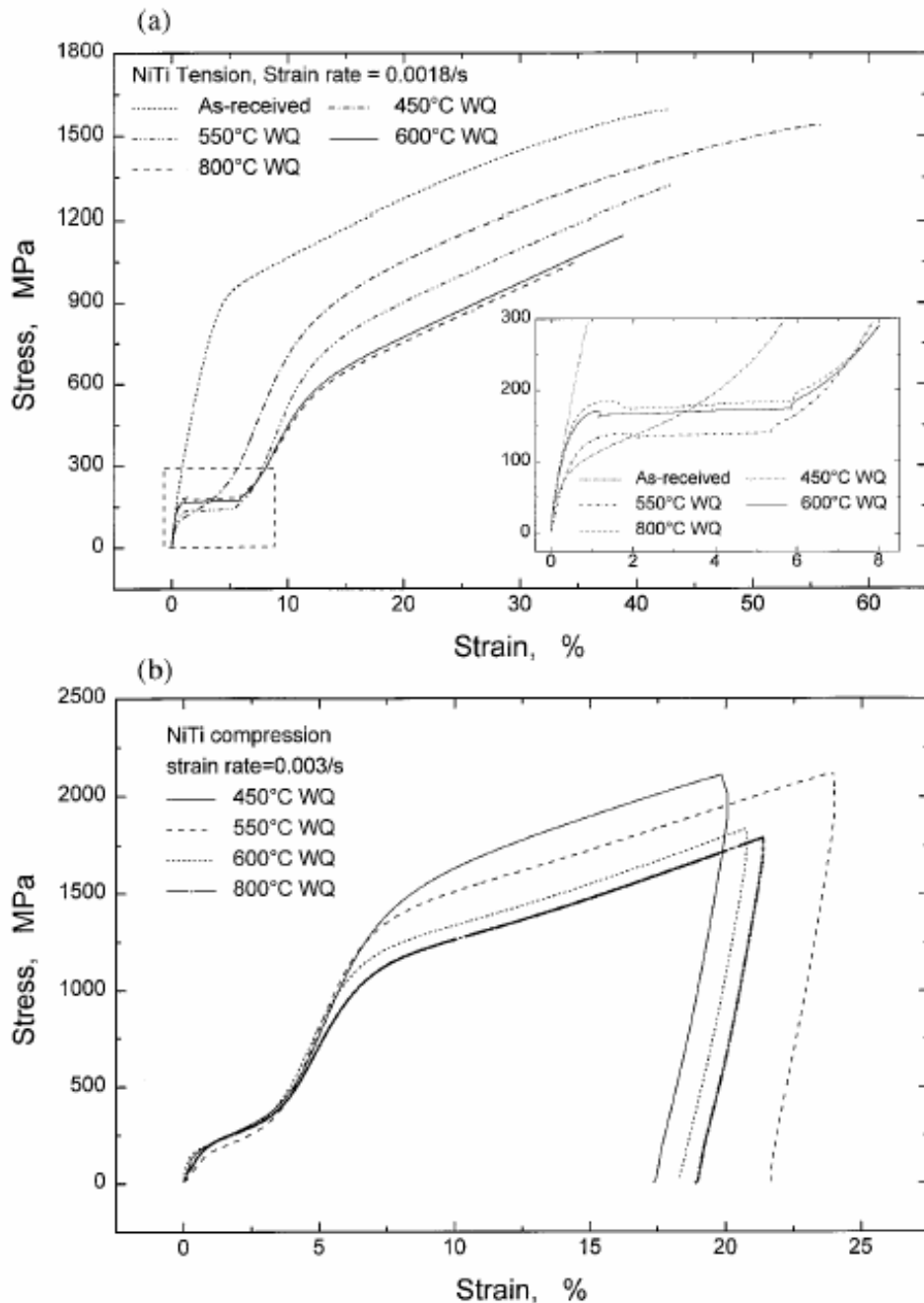
Plietsch ja Ehrlich [9] määrittivät materiaalin käyttäytymistä syklisessä veto-puristuskuormituksessa. Kuormitettaessa materiaalia pseudoelastisella alueella jännitys pysyi vedossa noin 8 % asti koko ajan 400 MPa alapuolella, kun taas puristuksessa 400 MPa jännitys saavutettiin jo alle 1 % venymällä. Kuvasta 9 havaitaan, miten puristuspuolen hystereesisilmukan muoto eroaa vetopuolen silmukan muodosta. Liu [3] on osoittanut, että puristuskuormituksessa martensiittivarianttien suuntautumista tapahtuu vain pienillä venymän arvoilla. Venymän kasvaessa muodonmuutos perustuu dislokaatioiden liikkeeseen. Puristuksessa palautuva venymä on siis selvästi pienempi kuin vedossa.



Kuva 9. Muistimetallin jännitys-venymäkuvaaja veto-puristussyklityksessä pseudoelastisella alueella [9].

Martensiittisessä tilassa puristuksessa tapahtunut muokkautuminen vaikuttaa käyttäytymiseen vedossa ja päinvastoin (Ks. Kuva 10).

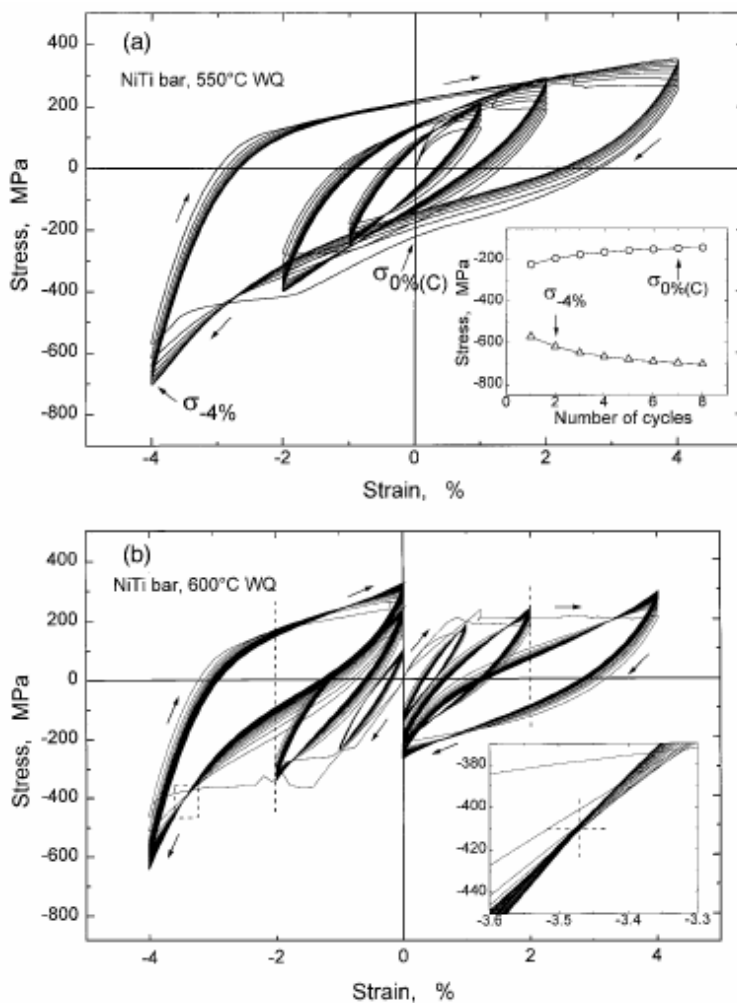
Lähteen [8] monotonisessa vetokuormituksessa esiintyi yli 550°C lämpötilassa esikäsitellyllä NiTi:llä jännityksessä vaakasuora tasanne 1 % ja 6 % venymien välillä. Monotonisessa puristuskuormituksessa samalla tavoin esikäsitellyllä NiTi:llä 'tasanne' vietti merkittävästi ylöspäin ja se sijaitsi vajaan 1 % venymän ja vajaan 4 % venymän välillä. Kuvasta 10a nähdään myös, että materiaalin esikäsitteilyllä on merkittävä vaikutus etenkin vetopuolen käyttäytymiseen.



Kuva 10. Eri lämpötiloissa esikäsitellyn martensiittisen NiTi:n jännitys-venymäkuvaajat vedossa ja puristuksessa Liun ja muiden [8] mukaan.

Kuvassa 11 on esitetty Liun ja muiden [8] raportoimat jännitysvenymäkäyrät veto-puristussyklityksessä -4 % ja +4 % venymien välillä. Sisemmät kuvaajat ylemmässä käyrässä esittävät pienempiä syklejä. Alemmassa kuvassa esitetään erisuuruisia osittaisia syklejä pelkästään vetopuolella ja pelkästään puristuspuolella. Kuvista havaitaan, miten muistimetallimateriaalin syklisen käyttäytymisen mallintaminen on haastava tehtävä, joka ei onnistu pelkällä käyränsovituksella koetuloksiin. Käyränsovitustyypiset muistimetallimallit ovat tarkkuutensa vuoksi varsin suosittuja. Niiden käyttö muistimetallien kaltaisille historiariippuville materiaaleille on kuitenkin melko kyseenalaista, koska niiden ekstrapoloitavuus mitatusta hiemankin poikkeaviin tilanteisiin on huono.

Käytettäessä lankamaisia aktuaattoreita on niihin kohdistuva kuormitus useimmiten vetoa. Komposiitin sisässä muistimetallilanka voi altistua myös puristuskormituksille. Kun ympäröivä komposiitti estää lankojen nurjahtamisen, on veto-puristussyklityksessä huomioitava myös puristuksen vaikutus. Taivutuksessa muodonmuutostilaa ei enää voida kuvata uniaksiaalisena, vaan tarvitaan 2D tai 3D-malleja.



Kuva 11. Martensiittisen NiTin jännitys-venymäkäyriä veto-puristussyklityksessä [8]

Mallitettaessa muistimetalliaktuaattoreita on tärkeää huomioida hystereesisilmukoiden neljä peruspiirrettä [¹⁰]:

- Stabiilius: Kuormitettaessa materiaalia syklisesti edestakaisin (kuormitus-palautus) lämpötilanmuutoksella ja/tai mekaanisella kuormituksella kahden $[\epsilon, T, \sigma]$ -pisteen (paluupisteen, Return Point, RP) välillä, alkaa materiaali muutaman syklin jälkeen noudattaa samanlaisena toistuvaa polkua. Jos jompaakumpaa paluupisteistä muutetaan, ensimmäinen kierros on selvästi erilainen, mutta muutaman kierroksen jälkeen materiaali noudattaa uutta samanlaisena toistuvaa polkua (ks. kuva 10).
- Sisäkkäisyys: Hystereesisilmukan leveys yleensä kasvaa paluupisteiden välin kasvaessa (koska tällöin suurempi osa materiaalista vaihtaa faasia). Jos samanlaisena toistuvien silmukoiden välissä tehdään pienempi silmukka, pysyy tämä pienempi silmukka yleensä kokonaan ison silmukan sisällä.
- Paluupistemuisti: Jos pienen silmukan jälkeen jatketaan kuormitusta, palaa polku siihen $[\epsilon, T, \sigma]$ -pisteeseen, jossa se erkani isommalta silmukalta.
- Historiariippuvuus: Paluupiste ei yksikäsitteisesti määrää pienen silmukan muotoa, vaan muotoon vaikuttaa myös materiaalin aiempi lämpötila-jännitys-venymähistoria.

MUISTIMETALLILANKA-AKTUAATTORIEN MITOITUS

Kuten edellä on esitetty, muistimetalliaktuaattorien käyttäytyminen on riippuvaista monista eri tekijöistä. Täten suunniteltaessa muistimetallitoimilaitteita tulee aktuaattorin käyttäytymisen ennustamiseksi tietää mahdollisimman tarkasti materiaalin koostumus sekä termomekaaninen historia. Valitettavasti muistimetallien toimittajat eivät tätä tietoa pysty antamaan vaan peruskäyttäytyminen pitää selvittää itse. Lisäksi toimituseräkohtaiset vaihtelut voivat olla hyvinkin suuria, minkä vuoksi jokainen erä on testattava ennen käyttöönottoa. Erityisesti tilattaessa valmiiksi lämpökäsiteltyjä muistimetalliaktuaattoreita tulee niiden toiminta selvittää sarjalla mittauksia. Kaupallisten käsittelyjen (ns. 'straight annealing') seurauksena materiaaliin saattaa syntyä esim. kaksisuuntainen muistiefekti, jolloin käyttäytymien poikkeaa merkittävästi oletetusta.

Lankamaisten muistimetalliaktuaattorien mitoitus perustuu jännityksen rajoittamiseen aktuointisyklimäärästä riippuvaan sallittuun arvoon. Lisäksi on huomioitava jännityksen vaikutukset faasimuutokseen sekä aktuaattorien tehontarve. Tarvittaessa suurta voimantuottoa on paksumpi lanka tehokkaampi, kun taas tarvittaessa suurta siirtymäntuottoa on parempi käyttää useampia ohuita lankoja. Ohuemmillä langoilla myös jäähtyminen tapahtuu nopeammin.

Lämmitettäessä muistimetallilankoja resistiivisesti on tärkeää tietää paljonko tehoa aktuointiin tarvitaan. Taulukossa 1 on esitetty Oulun Yliopistossa [¹¹] mitattuja aktuaattorilankojen nimellistehoja muodossa voima N/W ja siirtymä mm/W. Taulukosta havaitaan, että tarvittaessa suurta voimantuottoa on paksumpi lanka tehokkaampi, kun taas tarvittaessa pelkästään suurta siirtymäntuottoa on tehokkaampaa käyttää ohuita lankoja.

Paksuus [mm]	Maksimiteho [W]	Voima/Teho [N/W]	Venymä/Teho [%/W]
0.1	0.44	6.58	10.4
0.5	5.2	23.3	1.07
1.0	4.8	48.6	0.78

Taulukko 1. NiTi-muistimetallilanka-aktuaattorien nimellistehoja [11].

Muistimetalliaktuaattorien käyttöä rajoittavat niiden terminen väsyminen ja eräät muut toistuvassa ja/tai pitkäaikaisessa termomekaanisessa kuormituksessa tapahtuvat muutokset [12]. Lisäksi liian suuressa lämpötilassa materiaalin faasimuutos estyy. Näin ollen muistimetalliaktuaattorien lämpötilaa, jännitystä ja venymää on rajoitettava sitä enemmän, mitä useampia syklejä aktuaattorin on kyettävä toimimaan.

Muistimetallilangoilla (vedossa) maksimivenymä on 8-10 % ja maksimijännitys noin 700 MPa. Käytännössä ei näin suuria jännityksen arvoja voida hyödyntää. Leppäniemen [12] mukaan Stöckel julkaisi 1992 taulukon 2 mukaiset ohjearvot lankamaisten NiTi-aktuaattorien maksimivenymille ja maksimijännityksille kuormituskertojen määrän funktiona. Valmistusprosessien kehitys on kuitenkin ollut voimakasta, jonka seurauksena nykyisillä kaupallisilla langoilla päätään huomattavasti korkeampiin toistomääriin.

Cycles	Max strain [%]	Max Stress [MPa]
1	8	500
100	4	275
10000	2	140
100000	1	70

Taulukko 2. NiTi-muistimetallien ohjearvoja maksimivenymälle sekä maksijännitykselle vedossa [12].

Muistimetallilanka-aktuaattorien mitoitus (vedossa) tapahtuu seuraavasti [13]:

Langassa kuumennuksen jälkeen vaikuttava voima on

$$F_A = \sigma_A * A = \sigma_A * \pi * d^2 / 4 \quad (2)$$

missä σ_A on taulukossa 2 annettu maksimijännitys ja d on langan halkaisija.

Siis lanka pystyy nostamaan kuorman

$$M = F / g \quad (3)$$

missä g on maan vetovoiman aiheuttama kiihtyvyys 9.81 m/s^2

Taulukosta 2 saadaan martensiittisessä tilassa tapahtuneella esikuormituksella aiheutetuksi maksimivenymäksi $\varepsilon_M = 2\%$. Oletetaan austeniittisen tilan kimmomoduliksi $E_A = 70$ GPa. Tämä arvo riippuu langan materiaalisuudesta ja langan esikäsitteilyistä.

Kuumennettaessa lanka siirtyy martensiittisen tilan jännitys-venymäkäyrältä austeniittisen tilan jännitys-venymäkäyrälle. Tässä oletetaan, että austeniittisen tilan jännitys-venymäkäyrällä ollaan nyt lineaaris-elastisella osalla. Kuumennettaessa tapahtuva venymänmuutos lasketaan kaavasta

$$\varepsilon = \varepsilon_M - \varepsilon_A \quad (4)$$

missä jälkimmäinen termi on austeniittisen tilan kimmoinen venymä

$$\varepsilon_A = \sigma_A / E_A \quad (5)$$

Langan lyhenemä on

$$\text{Lyhenemä} = L * \varepsilon = L * (\varepsilon_M - \varepsilon_A) \quad (6)$$

Esimerkiksi metrin pituisella 0.4 mm halkaisijaisella langalla voidaan siis nostaa 1.8 kg:n painoa 18 mm ja toistaa tämä 10000 kertaa. Taulukossa 3 on annettu vastaavat arvot muutamalle eri lankapaksuudelle.

Langan halkaisija mm	Kuorma kg	Siirtymä mm
0.1	0.1	18
0.3	1.0	18
0.5	2.8	18
0.7	5.5	18

Taulukko 3. Eri paksuisten NiTi-muistimetallilankojen kyky nostaa kuormaa (10000 toistoa)^[13].

Lankaa jäädytettäessä langan lyhenemä ei palaudu ilman ulkoista kuormitusta. Palautukseen (eli langan uudelleen venytykseen martensiittisessä tilassa) tarvittavaa voimaa voidaan arvioida seuraavalla tavalla:

Materiaalin käyttäytyminen martensiittisena on suunnilleen kuvan 3 mukaista. 2 % venymällä ollaan siis pseudoplastisella alueella. Memory Metalle ^[14] ilmoittaa langoilleen pseudoplastiseksi alueeksi 70-200 MPa. Jos langan pseudoplastinen jännityskynnys olisi 130 MPa, palautukseen tarvittava voima olisi siis noin

$$F_{\text{pal}} = \sigma_{\text{pal}} * A \quad (7)$$

$$= 130 \text{ MPa} * 0.1257 \text{ mm}^2 = 16.3 \text{ N}, \text{ eli kuorma riittäisi palauttamaan aktuaattorin}$$

Huom! Edellä esitetty laskenta on hyvin karkea, ja tarkoitettu vain karkeaan mitoitusseen. Tarkempi mitoitus ja jännitysten ja venymien laskenta on tehtävä materiaalin käyttäytymistä paremmin kuvaavilla malleilla.

Langan jäähtymisnopeus heikkenee nopeasti langan paksuuden kasvaessa. Koska myös langan resistanssi pienenee langan pinta-alan kasvaessa, vaatii paksujen lankojen resistiivinen lämmittäminen paljon tehoa. Taulukossa 4 on esitetty resistanssi, suositeltava maksimikuorma, tarvittava lämmitysvirta, lämmitykseen kuluva aika ja jäähtymiseen kuluva aika huoneenlämmössä (ilmassa) sekä langan hinta-arvio eri paksuisille langoille. Taulukko on Images SI Inc:n nettisivuilta vuodelta 2004 (muutettuna SI-yksiköihin) [15]. Kyseessä ovat tavanomaiset NiTiNOL-lanka-aktuaattorit, joita myydään hyllytavaran.

D mm	R ohm/cm	Kuorma g	Virta mA	Lämm. aika s	Jääht. aika s	Hinta dollaria/m
0.15	0.51	330	400	1	2	16.4
0.2	0.31	590	610	1	3.5	16.4
0.25	0.2	930	1000	1	5.5	16.4
0.3	0.13	1250	1750	1	8	24.6
0.38	0.08	2000	2750	1	13	41.0

Taulukko 4. Eri paksuisten NiTiNOL-muistimetallilankojen ominaisuuksia (2004) [15].

Erikoiskäsittelyillä sekä ternärisillä seoksilla kuten NiTiCu voidaan jo nykyäänkin päästä huomattavasti edellä mainittua suurempiin venymä- ja jännitysarvoihin. Tavanomaisten NiTi-aktuaattorien osalta oikeilla lämpökäsittelyillä, lankojen kiinnityksillä yms. voitaneen edellä annettujen taulukoiden arvot tulevaisuudessa merkittävästikin ylittää. Puristusykytyksestä ja veto-puristusykytyksestä ei taulukoiden 2 ja 5 tyyppisiä raja-arvoja liene julkaistu.

Lähteessä [13] on esitetty myös jousimaisten muistimetalliaktuaattorien mitoitus. Siihen ei tässä paneuduta tarkemmin.

Edellä esitetty mitoitus pätee pelkälle muistimetalliaktuaattorille. Myös tapauksessa, jossa muistimetalliaktuaattorin kanssa on **sarjaan** kytketty jousi, voidaan muistimetalliaktuaattorin mitoituksessa hyödyntää edellä esitettyjä kaavoja, koska tällöin voima jousessa ja aktuaattorissa on sama. Jousen venymä sekä muuttuva kuormitus on tällöin tietysti huomioitava. Sen sijaan, jos muistimetalliaktuaattori on laminoitu komposiitin sisään, muuttuu aktuaattorin mitoitus, sillä tällöin muistimetalli ja komposiittimatriisi ovat **rinnan** kytkettyjä. Langan lyhetessä matriisi puristuu kokoon ja siinä syntyy langan lyhenemistä vastustava voima. Tällöin aktuaattorin ja matriisin venymänmuutokset ovat samat, mutta voimat ja jännitykset ovat eri suuruiset matriisissa ja aktuaattorissa. Koska muistimetallin osuus poikkileikkauksesta on tyypillisesti pieni, vastustaa rakenteeknisesti varsin löysäkin laminaatti muistimetalliaktuaattoreiden venymänmuutosta niin paljon, että aktuaattorilankoihin syntyy erittäin suuria elastisia jännityksiä.

Jännitys taas nostaa aktuaattorilangan faasimuutoslämpötiloja sekä hidastaa faasimuutosta ja voi jopa estää faasimuutoksen lähes kokonaan. Lujitemuovikomposiitin sisään laminoituja muistimetalliaktuaattoreita ei voidakaan mitoittaa tämän julkaisun kaavoilla, vaan niiden mitoittamiseen täytyy käyttää mallia, joka huomioi komposiitin muistimetallin venymää ja faasimuutosta vastustavan vaikutuksen oikein. Tarkempaan mitoittamiseen voidaan käyttää esimerkiksi elementtimenetelmää.

Jos lankamaiset muistimetalliaktuaattorit sijoitetaan joustavien putkien sisään ja putket laminoidaan lujitemuovikomposiittiin, ympäröivän komposiittirakenteen aktuaattorien venymää rajoittava vaikutus on hieman pienempi kuin kiinni laminoidussa tapauksessa. Mikäli muistimetallilangat sijaitsevat laminaatissa epäkeskisesti, aikaansaa aktuointi laminaattiin taipuman ja muistimetallilangat pääsevät lyhenemään enemmän kuin ympäröivä matriisi puristuu kokoon. Tällöin jännitykset muistimetalliaktuaattoreissa eivät kasva niin suuriksi kuin matriisiin kiinni laminoidussa tapauksessa. Toisaalta laminaatin taipuessa voimakkaasti alkavat muistimetallilangat painaa putken seinämää, mikä aiheuttaa laminaattiin repivän sisäisen kuormituksen, joka voi toistuvassa aktuoinnissa rikkoa laminaatin.

Jos muistimetallilankoihin jätetään laminoinnin yhteydessä esijännitys, se on huomioitava mitoituksessa. Jos laminaatti on päistään kiinnitetty siten, ettei kumpikaan pää pääse pituussuunnassa liikkumaan, aikaansaa muistimetallilangan lyheneminen kitarankielimäisen efektin - rakenteen ominaistaajuus muuttuu voimakkaasti. Jos laminaatin jompikumpi pää pääsee liikkumaan pituussuunnassa, on muistimetalliaktuaattorien aikaansaama ominaistaajuuden muutos paljon pienempi.

YHTEENVETO

Muistimetalleiksi kutsutaan metalliseoksia, joilla esiintyy muisti-ilmiö: matalassa lämpötilassa muokattu muistimetalli palautuu lämmitettäessä alkuperäiseen muotoonsa. Muisti-ilmiö perustuu termoelastisen martensiittisen faasimuutoksen palautumiseen. Martensiittisessä faasimuutoksessa muistimetalli muuttuu korkean symmetrian omaavasta, useimmiten kuutiollisesta, austeniittifaasista vähemmän symmetriseen, martensiittiseen faasiin. Jäähdytettäessä austeniittia ilman ulkoista mekaanista kuormitusta martensiittivariantit syntyvät eri suuntiin orientoituneina, jolloin faasimuutoksessa ei synny merkittävää makroskooppista muodonmuutosta. Kuormittamalla martensiittia mekaanisella kuormituksella saadaan martensiittivariantit suuntautumaan, jolloin syntyy suuri makroskooppinen venymä. Poistettaessa mekaaninen kuormitus poistuu venymästä vain elastinen osa ja jäljelle jää suuri pseudoplastinen venymä. Kun martensiitti lämmitettäessä palautuu austeniittiseen faasimuotoon, pseudoplastinen venymä poistuu. Tietyllä lämpötila-alueella martensiittinen faasimuutos voidaan aikaansaada myös mekaanisella kuormituksella ilman lämpötilanmuutosta. Tähän jännityksen indusoiman martensiittiseen faasimuutokseen perustuu muistimetallien ns. superelastinen ilmiö, jossa muistimetalli palautuu jopa 15 % muodonmuutoksesta kuormituksen poiston jälkeen.

Muisti-ilmiö saadaan lämmittämällä aikaan myös kuormitusta vastaan, jolloin muisti-metalliaktuaattori tekee työtä. Estämällä Ni-Ti-langan muodon palautuminen, voidaan aikaansaada jopa 700 MPa:n suuruinen jännitys. Väsymisen ja muistiominaisuuden menettämisen välttämiseksi jännitys muistimetalliaktuaattoreissa rajoitetaan kuitenkin yleensä 200-300 MPa:iin. Tavallisimmilla muistimetalliaktuaattoreilla, NiTi-langoilla, hystereesin suuruus on 30°C luokkaa ja palautuva venymä noin kahdeksan prosenttia.

Muistimetallien termomekaanisen käyttäytymisen pääpiirteet ovat:

- Muisti-ilmiö
- Superelastisuus
- Suuri epälineaarisuus
- Voimakas kytkentä lämpötilanmuutoksen ja jännityksenmuutoksen aikaansaamien ilmiöiden välillä.
- Muistimetalli käyttäytyy eri tavalla puristuksessa kuin vedossa ja veto-puristus-syklityksessä puristuspuolella syntynyt plastinen muodonmuutos vaikuttaa käyttäytymiseen vetopuolella.

Mallituksessa tulee huomioida hystereesisilmukoiden neljä erityispiirrettä: Stabiilius, sisäkkäisyys, paluupistemuisti ja historiariippuvuus. Se, miten tarkasti malli toteuttaa nämä neljä piirrettä, on yleensä varsin hyvä mittari mallin luotettavuudelle.

Muistimetalliaktuaattorien karkeaan mitoitukseen voidaan käyttää tässä artikkelissa esitettyjä Waramin kirjan kaavoja pelkille aktuaattorilangoille sekä jousen kanssa sarjaan kytketyille aktuaattorilangoille. Jousen kanssa rinnan kytkettyjen tai lujitemuovikomposiitin sisään laminoitujen muistimetalliaktuaattorien mitoituksessa nämä kaavat eivät päde, vaan täytyy käyttää mallia, joka huomioi jousen tai ympäröivän komposiitin muistimetallin venymää ja faasimuutosta vastustavan vaikutuksen oikein. Tarkempi mitoitus voidaan tehdä esimerkiksi elementtimenetelmällä. Mitoituksessa tulee huomioida myös tehonkulutus ja tarvittava lämmitysnopeus sekä komposiittiin upotetussa tapauksessa erityisesti jäähtymisnopeus sekä komposiittirakenteen kestävyys väsyttävässä kuormituksessa.

KIRJALLISUUSVIITTEET

¹ Otsuka K., Ren, X.: Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys, Progress in Material Science, Vol 50, 2005, pp 511-678.

² Otsuka K., Wayman C.M.: Shape Memory materials, Cambridge, Cambridge University Press 1998.

³ Liu Y.: Detwinning process and its anisotropy in shape memory alloys, Smart Materials, Proc of SPIE, Vol 4234, 2001, pp. 82-93

⁴ Wu X.D., Sun G.J., Wu J.S.: The nonlinear relationship between transformation strain and applied stress for NiTiNOL, Materials Letters, Vol 57, 2003, pp. 1334-1338

⁵ Šittner P., Michaud V., Schrooten J.: Modelling and material design of SMA polymer composites, Material Transactions JIM (the Japan Institute of Metals), Vol 43, No 5, 2002

- ⁶ Brinson L.C., Huang M.S.: Simplifications and comparisons of Shape Memory Alloy constitutive models, Technical Notes, J of Intelligent Material Systems and Structures, 1996
- ⁷ Trochu F., Terriault P.: Nonlinear modelling of hysteretic material laws by dual kriging and application, Comput. Methods Appl. Mech. Eng., Vol 151, 1998, pp. 545-558
- ⁸ Liu Y., Xie Z., Van Humbeeck J., Delaey L.: Asymmetry of stress-strain curves under tension and compression for NiTi shape memory alloys, Acta Materialia, Vol 46, No 12, pp. 4325- 4338, 1998
- ⁹ Plietsch, R., Ehrlich K.: Strength differential effect in pseudoelastic NiTi shape memory alloys, Acta Materialia, Vol 45, No 6, 1997, pp. 2417-2424
- ¹⁰ Sittner P., Stalmans R., Tokuda M.: An algorithm for prediction of the hysteretic responses of shape memory alloys, Smart Mater Struct, Vol 9, 2000, pp. 452–465
- ¹¹ Kantola L. et. al: Investigating SMA Actuators and SMA Actuated Smart Structures, Project Report, Oulu, Finland, 2004
- ¹² Leppäniemi A.: Shape memory alloys - applications and commercial aspects, <http://www.ac.tut.fi/aci/courses/76527/Seminars2000/SMA.pdf>, 7.12.2004
- ¹³ Waram T.: Actuator design using shape memory alloys, Canada, 1993, ISBN 0-9699428-0-X
- ¹⁴ Memory Metalle GmbH, Info Sheet No 4, Selected Properties of NiTi-based Alloys, http://www.memory-metalle.de/html/03_knowhow/PDF/MM_04_properties_e.pdf, 7.12.2004
- ¹⁵ Images SI Inc., <http://www.imagesco.com/catalog/nitinol/index.html#nitiwire>, 7.12.2004

Merja Sippola, tutkija

VTT Technical Research Centre of Finland
P.O. Box 1000, FIN-02044 VTT, Finland
Email: merja.sippola@vtt.fi

Tomi Lindroos, tutkija

VTT Technical Research Centre of Finland
P.O. Box 1000, FIN-02044 VTT, Finland
Email: tomi.lindroos@vtt.fi

Marjaana Peltonen, tutkija

VTT Technical Research Centre of Finland
P.O. Box 1000, FIN-02044 VTT, Finland
Email: marjaana.peltonen@vtt.fi