

High performance shape memory effect (HP-SME): un innovativo percorso termo-meccanico per lo sviluppo di attuatori SMA ad elevate prestazioni

R. Casati, C.A. Biffi, M. Vedani, A. Tuissi

Recentemente è stato proposto un percorso termo-meccanico innovativo per l'utilizzo di leghe a memoria di forma basato sul ciclaggio termico della martensite indotta da sforzo. Questo fenomeno viene chiamato High Performance Shape Memory Effect (HP-SME). Questa soluzione consente di utilizzare elementi austenitici con un notevole incremento del carico necessario al funzionamento dell'attuatore a memoria di forma e di mantenere una elevata capacità del materiale di recupero della deformazione. Attuatori basati su questo principio mostrano proprietà funzionali migliorate rispetto agli attuatori convenzionali basati sull'effetto a memoria di forma (Shape memory effect, SME). In questo lavoro vengono riportati i risultati dei test di recupero della deformazione a carico costante di fili sottili austenitici e confrontati con quelli di fili martensitici dello stesso diametro.

Parole chiave: Trasform. di fase - Metallurgia fisica

INTRODUZIONE

I materiali a memoria di forma (Shape Memory Alloy - SMA) sono materiali funzionali in grado di recuperare elevate deformazioni sfruttando una trasformazione martensitica che avviene allo stato solido senza diffusione. Essa avviene mediante il passaggio, reversibile, da una struttura ad alta simmetria, detta austenite, ad una a simmetria inferiore, detta martensite. La trasformazione martensitica viene definita mediante quattro temperature caratteristiche, che indicano la temperatura di inizio e fine trasformazione diretta da austenite a martensite (M_s e M_f), e inversa da martensite ad austenite (A_s e A_f). Il cambiamento di fase può essere provocato da una variazione di temperature del materiale nell'intervallo di trasformazione, o dall'applicazione di un carico al di sopra di un valore critico. La fase martensitica e quella austenitica possono coesistere

in due intervalli di temperatura: (i) $M_f < T < M_s$ quando il materiale è sottoposto ad un raffreddamento da una temperatura superiore a A_f ; oppure (ii) $A_s < T < A_f$ quando il materiale è sottoposto ad un riscaldamento a partire da una temperatura inferiore a M_f [1,2] (Fig. 1). A seguito di un carico applicato ad un materiale a memoria di forma, la fase martensitica viene stabilizzata e le relative temperature di trasformazione si alzano, in accordo con la relazione di Clausius-Clapeyron [3]. In funzione del tipo di fase stabile a temperatura ambiente in assenza di carico applicato, i materiali a memoria di forma vengono generalmente distinti in due categorie. Il primo gruppo è rappresentato da quelle leghe che presentano la fase martensitica a temperatura ambiente ($T < M_f$); di conseguenza, queste leghe possono essere sfruttate per il cosiddetto "effetto a memoria di forma" (Shape Memory Effect - SME) [4-10]. Un esempio sono le leghe NiTi eccedentarie in titanio. Quando questi materiali vengono caricati mediante un peso o una molla fino a un valore di carico superiore ad un valore critico, la deformazione procede per movimento dei twin che si accomodano lungo alcune direzioni preferenziali. In questo caso, la martensite viene detta "detwinned". Successivamente, a seguito di un riscaldamento al di sopra di A_f , la martensite si trasforma in austenite, con conseguente recupero della forma originale. L'effetto di memoria di forma (SME) è rappresentato dallo schema di Fig. 2. Se il materiale viene raffreddato fino ad una temperatura al di sotto di M_f , la microstruttura che si viene a formare è la martensite auto-accomodata. Al contrario, nel caso in cui recupero della deformazione fino alla forma originale viene effettuato sotto l'effetto di un carico, il materiale produce

R. Casati, M. Vedani

Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica
Via La Masa, 1 - Milano, Italy

C.A. Biffi, A. Tuissi

CNR-ENI Istituto per l'Energetica e le Interfasi,
C.so Promessi Sposi 29 - 23900 Lecco

Corresponding author:

riccardo.casati@polimi.it

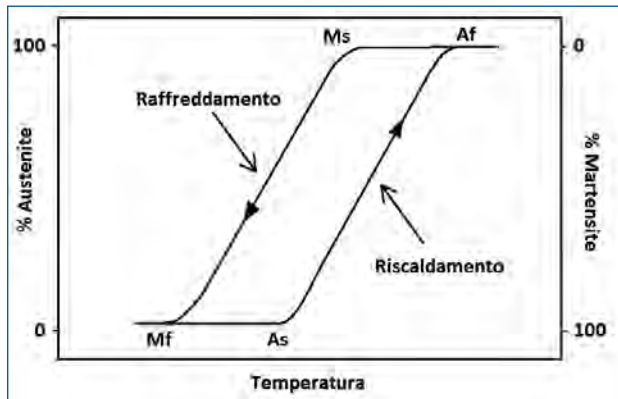


Fig. 1 Schema delle temperature di trasformazione caratteristiche delle SMA.

Fig. 1 Schematic of the transformation temperatures of SMAs.

lavoro meccanico utile [1,2]. Questo effetto SME viene generalmente utilizzato nel campo degli attuatori e dei micro-attuatori. Il percorso termo-meccanico di un attuttore che sfrutta l'effetto SME è rappresentato in Fig. 3 mediante due linee tratteggiate che racchiudono un'area del grafico di colore azzurro.

Il secondo gruppo, invece, fa riferimento alla proprietà detta pseudo-elasticità oppure super-elasticità (Superelastic Effect - SE), caratteristica delle leghe NiTi eccedentarie in nichel [11-15]. L'austenite è la fase stabile a temperatura ambiente. Se un materiale SMA viene sottoposto all'azione di un carico superiore ad un certo valore critico, la trasformazione martensitica viene indotta. La martensite così generata viene chiamata martensite indotta da sforzo (Stress Induced Martensite - SIM). A seguito della fase di rimozione del carico applicato, la martensite viene generata nuovamente (Fig. 4). Questi materiali superelastici sono largamente impiegati nel settore biomedicale, per applicazioni come lo stent coronarico, e nel campo dello smorzamento delle vibrazioni meccaniche ed acustiche.

Entrambe le tipologie di materiali che mostrano lo SME oppure la SE sono state largamente studiate sia dal punto di vista degli aspetti fondamentali sia dai punti di vista degli aspetti più funzionali e ingegneristici. Recentemente è stato proposto un nuovo approccio per utilizzare le proprietà dei materiali a memoria di forma, in cui è stato possibile ottenere delle proprietà funzionali superiori rispetto a quanto ottenuto in passato mediante il classico impiego di questa classe di materiali. In particolare, è stato mostrato come una lega NiTi superelastica possa mostrare l'effetto a memoria di forma, richiesto per il suo impiego come attuttore, imponendo cicli termici alla SIM. Quando un materiale austenitico viene caricato sopra uno stress critico, la SIM viene indotta e la deformazione del materiale procede a stress quasi costante (plateau superelastico). Quando la SIM viene riscaldata sopra Af sotto l'effetto di un carico costante, essa si ritrasforma in austenite. Infatti, avviene una trasformazione martensitica e la struttura austenitica viene generata consentendo il recupero della deformazio-

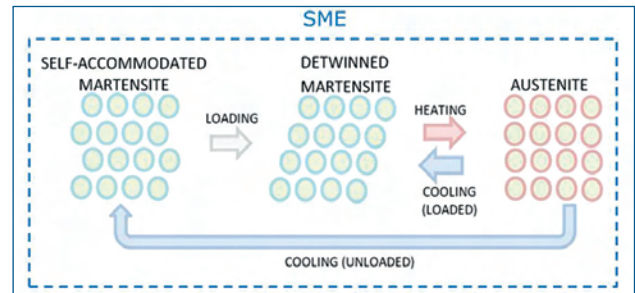


Fig. 2 Schema dell'effetto di memoria di forma (SME).

Fig. 2 Schematic of the shape memory effect (SME).

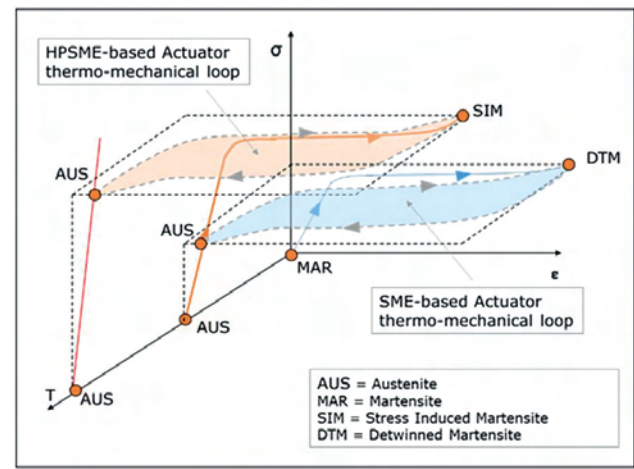


Fig. 3 Schema di funzionamento dell'HPSME e dello SME.

Fig. 3 Working diagram of the HPSME and SME.

ne macroscopica. Infine, quando il materiale viene raffreddato fino a temperatura ambiente, la SIM viene prodotta nuovamente e la deformazione nuovamente indotta (Fig. 4). Per distinguere dall'effetto memoria di forma tradizionale, questo effetto è stato denominato High Performance Shape Memory Effect (HP-SME) [16,17]. Il percorso termo-meccanico di un attuttore che sfrutta l'effetto l'HP-SME è rappresentato in Fig. 3 mediante due linee tratteggiate che racchiudono un'area del grafico di colore rosa.

L'obiettivo di questo lavoro consiste nel mostrare il funzionamento dell'High Performance Shape Memory Effect mediante il ciclaggio termico di un filo superelastico a temperatura ambiente sottoposto a carico costante. I risultati ottenuti con il filo superelastico sono stati confrontati con quelli relativi a un filo martensitico utilizzato in modo convenzionale, cioè sfruttando l'effetto di memoria di forma SME.

MATERIALI E METODI SPERIMENTALI

Due leghe, le cui composizioni sono (Ni₄₉Ti₅₁ at.% e Ni_{50.8}Ti_{49.2} at.%), sono state prodotte mediante un forno in vuoto ad induzione magnetica (Vacuum Induction

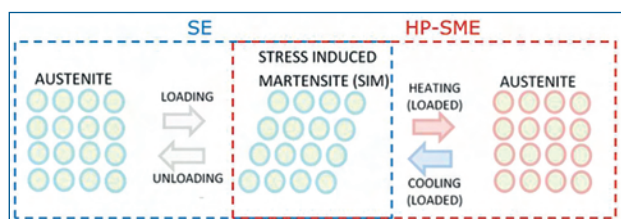


Fig. 4 Schema dell'effetto superelastico e HP-SME.

Fig. 4 Schematic of the superelastic effect and of the HP-SME.

Melting -VIM ; mod. Balzers VSG10) in atmosfera inerte di Argon, a partire da elementi puri [18]. I due lingotti (di dimensione pari a circa 70 x 70 x 160 mm³) sono stati forgiati, laminati a caldo e successivamente trafilati a freddo, ottenendo fili da 80 µm di diametro. Prove di recupero della deformazione a stress costante (250 e 800 MPa) sono state eseguite mediante DMA TA Q800 in un range di temperatura compreso tra 20 e 170 °C.

DISCUSSIONE DEI RISULTATI E CONCLUSIONI

Sono state eseguite delle prove di recupero della deformazione sotto carico costante a 250 MPa per il filo in Ni49Ti51 martensitico a temperatura ambiente e a 800 MPa per il filo in Ni50.8Ti49.2 austenitico a temperatura ambiente. I risultati sono mostrati in Fig. 5 nei due diagrammi Stress-Strain-Temperatura. La curva rossa di sinistra mostra evidentemente il funzionamento dell'HPSME. Il filo austenitico è stato caricato in direzione assiale fin sopra il plateau relativo alla trasformazione diretta da austenite a SIM (800 MPa). Quindi, il materiale è stato scaldato fino a 120 °C, mantenendo costante il carico applicato, in questo step la fase austenitica viene nuovamente prodotta e la deformazione imposta recuperata. Raffreddando poi il materiale fino a temperatura ambiente il materiale trasforma nuovamente la sua struttura in SIM e la deformazione viene reimposta.

Per un confronto diretto, i risultati sperimentali relativi al filo in Ni49Ti51 martensitico sono riportati sempre in Fig. 5 utilizzando le stesse scale della curva relativa al filo austenitico sopra descritta. La curva nera di destra mostra il comportamento tipico di un attuatore a memoria di forma basato sul riscaldamento/raffreddamento della martensite "detwinnata" sotto l'azione costante di una forza assiale. Il filo martensitico viene inizialmente caricato a temperatura ambiente fino a 250 MPa. Mantenendo applicato il carico, un ciclo termico è stato effettuato tra la temperatura ambiente e 170 °C. I risultati dimostrano che un filo di lega Ni50.8Ti49.2 austenitico può essere utilizzato come attuatore a sollecitazioni di lavoro molto più elevate (800 MPa) rispetto a quelle utilizzate per gli attuatori convenzionali basati su leghe martensitiche di NiTi (250 MPa). Le trasformazioni dirette e inverse relative al filo austenitico si verificano in maniera netta sia fase di riscaldamento che di raffreddamento (As = 88 °C, Af = 89 °C, Ms = 38 °C e

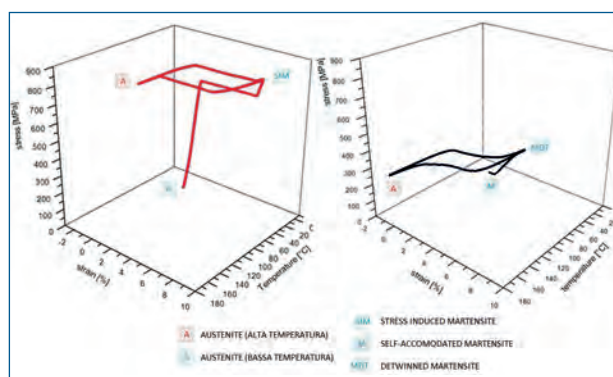


Fig. 5 Test di recupero della deformazione effettuati su un filo austenitico di Ni50.8Ti49.2 sfruttando l'effetto HP-SME e su un filo martensitico di Ni49Ti51 sfruttando lo SME [16].

Fig. 5 Strain recovery tests performed on an austenitic Ni50.8Ti49.2 wire by exploiting the HP-SME and on a martensitic Ni49Ti51 wire by exploiting the SME [16].

Mf = 34 °C). Viceversa, le temperature caratteristiche del filo martensitico sotto l'effetto di un carico costante sono molto più estese (Ms = 90 °C, Mf = 54 °C, As = 89 °C e Af = 130 °C). Il filo austenitico si è inoltre dimostrato in grado di recuperare deformazioni più ampie (6,2 %) rispetto al filo martensitico (5,8 %). Mediante l'HPSME, nuovi attuatori a memoria di forma con prestazioni migliorate possono essere progettati con diametro inferiore rispetto ai convenzionali attuatori basati sullo SME a parità di carico applicato. Questo implica vantaggi ai fini pratici come ad esempio, tempi ridotti di azionamento, un ripristino della forma più rapido, valori di corrente di attuazione inferiori con conseguente aumento dell'efficienza energetica dell'attuatore e minori ingombri.

BIBLIOGRAFIA

- [1] K. Otsuka, C. M. Wayman Shape Memory Materials Cambridge University Press (1998).
- [2] H. Funakubo "Shape Memory Alloys", Robotica, 6, 259-259.
- [3] P.Wollants, M.De Bonte,L.Delaye and J.R. Roos Thermodynamical analysis of the work performance of a martensitic transformation under stressed conditions, Z.Metallk.,70 issue (1979) 146
- [4] R. Casati, M. Vedani, S. Gialannella, A. Tuissi "Electrical Pulse Shape Setting of Very Thin Ni49Ti51 Wires for Shape Memory Actuators", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 23, Issue 7, (2014) 2487-2490.
- [5] R. Casati, M. Vedani, S. Tofail, C. Dickinson, A. Tuissi "On the preparation and characterization of thin NiTi shape memory alloy wires for MEMS" Fracture and Structural Integrity, vol.23 (2013) 7-12.
- [6] J. Mohd Jani , M. Leary, A. Subic , M. A. Gibson A re-

- view of shape memory alloy research, applications and opportunities *Materials and Design* 56 (2014) 1078–1113 .
- [7] R. Casati, A. Tuissi, S. Belochapkin, C. Dickinson, S. Tofail “Thin NiTi wires with reduced thermal hysteresis for shape memory actuators” *Functional Material Letters*, vol. 5, Issue 1 (2012) 1250009.
- [8] R. Casati, F. Passaretti, A. Tuissi “Effect of electrical heating conditions on functional fatigue of thin NiTi wire for shape memory actuators” *Procedia Engineering*, vol. 10 (2011) 3423-3428.
- [9] L. Sun, W.M. Huang, Z. Ding, Y. Zhao, C.C. Wang, H. Purnawali, C. Tang Stimulus-responsive shape memory materials: A review *Materials & Design* Volume 33, January 2012, Pages 577–640.
- [10] R. Casati, A. Tuissi “Effect of current pulses on fatigue of thin NiTi wires for shape memory actuators” *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 21. Issue 12 (2012) 2633-2637.
- [11] C. Maletta, E. Sgambitterra, F. Furgiuele, R. Casati, A. Tuissi “Fatigue properties of a pseudoelastic NiTi alloy: Strain ratcheting and hysteresis under cyclic tensile loading” *International Journal of Fatigue*, 66 (2014) 78–85.
- [12] Biscarini A, Mazzolai G, Tuissi A. Enhanced Nitinol Properties for Biomedical Applications *Recent Patents on Biomedical Engineering* 2008;1:180- 196.
- [13] C. Maletta, E. Sgambitterra, F. Furgiuele, R. Casati, A. Tuissi “Fatigue of pseudoelastic NiTi within the stress-induced transformation regime: a modified Coffin-Manson approach”. *Smart materials and structures*, vol. 21, Issue 11 (2012) 112001.
- [14] Tuissi, P. Bassani, R. Casati, M. Bocciolone, M. Carnevale, A. Colina, A. Lo Conte, B. Previtali, “Application of SMA composites in the collectors of the railway Pantograph for the Italian High Speed Train” *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 18, Issue 5-6 (2009) 612-619.
- [15] T. Duerig, A. Pelton, D. Stöckel An overview of Nitinol medical applications *Materials Science and Engineering A*, 273-275 (1999), pp. 149–160
- [16] R. Casati, M. Vedani, A. Tuissi “Thermal cycling of stress induced martensite for High Performance Shape Memory Effect”, *Scripta Materialia*, 80, 13-16 (2014).
- [17] R. Casati, C.A. Biffi, M. Vedani, A. Tuissi “High performance shape memory effect in nitinol wire for actuators with increased operating temperature range”, *Functional Materials Letters*, 1450063 (2014).
- [18] S. Besseghini, A. Tuissi, E. Olzi, F. Cito, G. Carcano *Vuoto Scienza e Tecnologia*, 26 (1997) 5-9

High performance shape memory effect (HP-SME): an innovative thermo-mechanical path for improved SMA actuators

Keywords: Phase transformation - Physical metallurgy

A novel thermo-mechanical path to achieve extraordinary high-stress recovery shape memory effect has been recently proposed. This phenomenon was called High Performance Shape Memory Effect (HP-SME) and relies on thermal cycling of stress induced martensite. By HP-SME, a new class of shape memory actuators can be designed considering alloys that are commonly employed at room or body temperature as superelastic materials. In this work, the HP-SME is extensively described and the results of thermo-mechanical tests carried out on thin austenitic Ni-rich NiTi wires are reported and compared with those of martensitic Ti-rich NiTi wires.