

HIGH PERFORMANCE SHAPE MEMORY EFFECT (HP-SME): UN INNOVATIVO PERCORSO TERMO-MECCANICO PER LO SVILUPPO DI ATTUATORI SMA AD ALTE PRESTAZIONI

R. Casati ^{a,*}, C.A. Biffi ^b, M. Vedani ^a, A. Tuissi ^b

^a Politecnico di Milano, Via La Masa, 1 Milano, Italy

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

ABSTRACT

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 ciclaggio termo-meccanico di fili sottili austenitici e confrontati con quelli di fili martensitici dello stesso diametro.

INTRODUZIONE

I materiali a memoria di forma (Shape Memory Alloys -SMAs) sono materiali funzionali in grado di recuperare elevate deformazioni attraverso 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 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 [1-3]. 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 [1]. 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 [1-2]. 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). Un esempio sono le leghe NiTi eccedentarie in titanio. Quando questi materiali vengono caricati con un peso o una molla fino a un valore di carico superiore ad un valore critico, la deformazione procede per movimento dei twin, portando ad un fenomeno di auto-accomodamento della martensite 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. 1. 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 lavoro meccanico utile [1-3]. Questo effetto SME viene generalmente utilizzato nel campo degli attuatori e dei micro-attuatori.

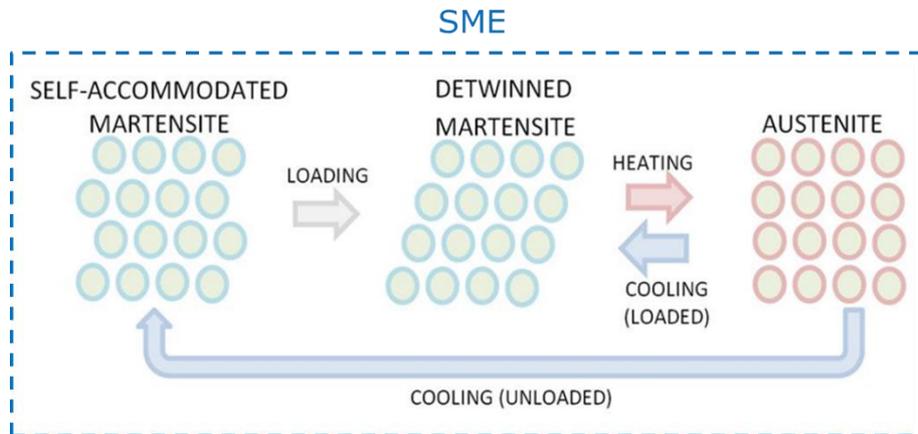


Fig. 1 Schema dell'effetto di memoria di forma (SME)

Il secondo gruppo, invece, fa riferimento alla proprietà detta pseudo-elasticità oppure super-elasticità (Superelastic Effect - SE), caratteristica delle leghe NiTi eccedentarie in nichel. 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 (Figura 2). 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.

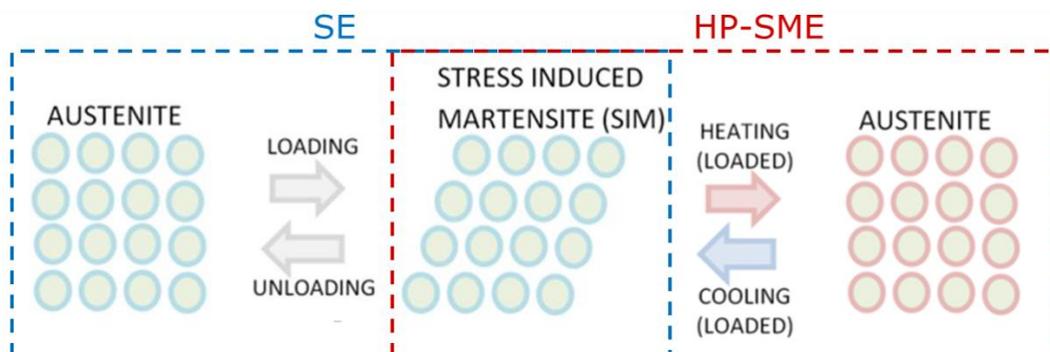


Figura 2 Effetto superelastico e HP-SME

Entrambe le tipologie di materiali che mostrano lo SME oppure la SE sono stati largamente studiati sia dal punto di vista degli aspetti fondamentali sia dai punti di vista degli aspetti più funzionali e ingegneristici [1-2]. 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 attuatore, 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 A_f 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 deformazione macroscopica. Infine, quando il materiale viene raffreddato fino a temperatura ambiente, la SIM viene prodotta nuovamente e la deformazione nuovamente indotta (Fig. 2). Per distinguere dall'effetto memoria di forma tradizionale, questo effetto è stato denominato High Performance Shape Memory Effect (HP-SME) [4-5]. 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 ($Ni_{49}Ti_{51}$ at.% e $Ni_{50.8}Ti_{49.2}$ at.%), sono state prodotte mediante un forno in vuoto ad induzione magnetica (Vacuum Induction Melting -VIM ; mod. Balzers VSG10) in atmosfera inerte di Argon, a partire da elementi puri [6]. I due lingotti (di dimensione pari a circa $70 \times 70 \times 160$ mm³) sono stati forgiati, laminati a caldo e successivamente trafilati a freddo, ottenendo fili da 80 μ m 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 $Ni_{49}Ti_{51}$ martensitico a temperatura ambiente e a 800 MPa per il filo in $Ni_{50.8}Ti_{49.2}$ austenitico a temperatura ambiente. I risultati sono mostrati in Fig. 3 nei due diagrammi Stress-Strain-Temperatura. La curva rossa di sinistra mostra chiaramente 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 $Ni_{49}Ti_{51}$ martensitico sono riportati sempre in Fig.3 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 $Ni_{50.8}Ti_{49.2}$ 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 ($A_s = 88^\circ C$, $A_f = 89^\circ C$, $M_s = 38^\circ C$ e $M_f = 34^\circ C$). Viceversa, le temperature caratteristiche del filo martensitico sotto l'effetto di un carico costante sono molto più estese ($M_s = 90^\circ C$, $M_f = 54^\circ C$, $A_s = 89^\circ C$ e $A_f = 130^\circ C$). 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 più brevi di azionamento, un ripristino della forma più rapido, minori amperaggi, minori consumi energetici e minori ingombri.

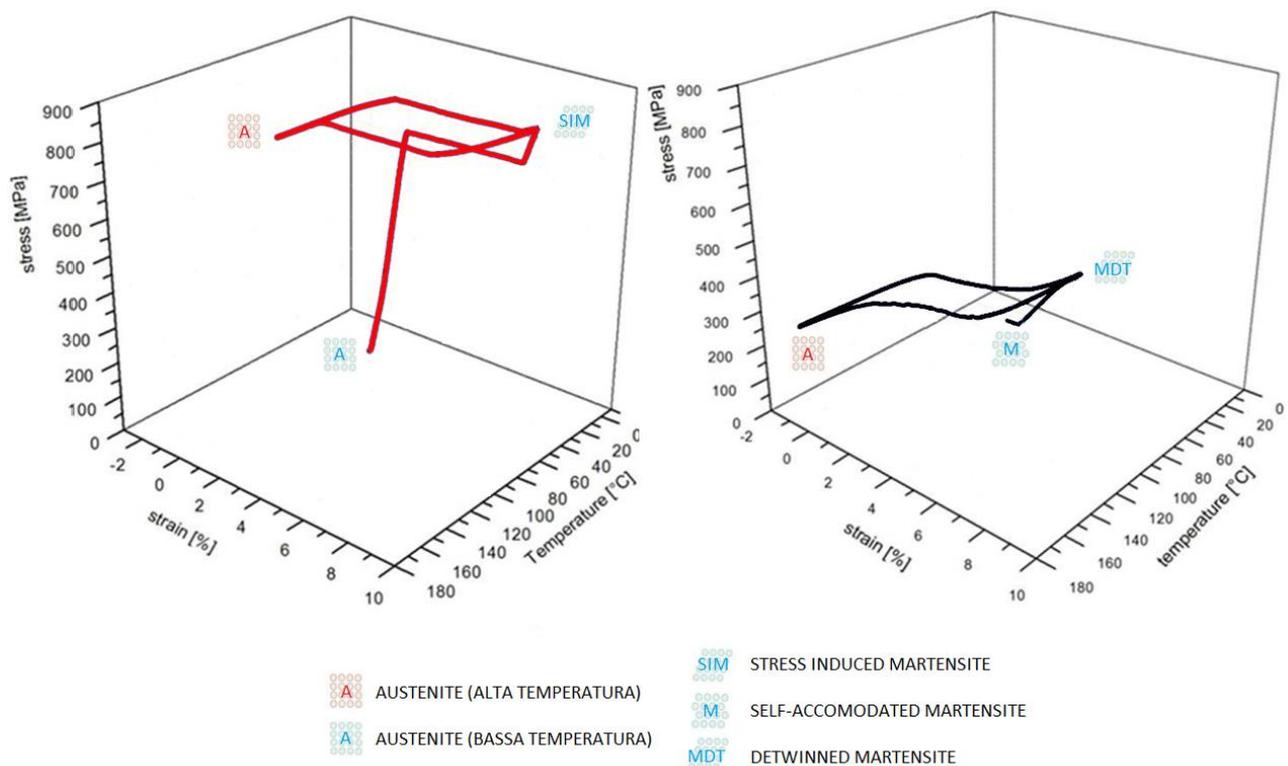


Figura 4 Test di recupero della deformazione effettuati su un filo austenitico di $Ni_{50.8}Ti_{49.2}$ sfruttando l'effetto HP-SME e su un filo martensitico di $Ni_{49}Ti_{51}$ sfruttando lo SME.

BIBLIOGRAFIA

[1] K. Otsuka, X. Ren "Physical metallurgy of TiNi-based shape memory alloys", Progress in Material Science, 50, 511–678 (2005).

- [2] K. Otsuka, C. M. Wayman Shape Memory Materials Cambridge University Press (1998).
- [3] H. Funakubo "Shape Memory Alloys", *Robotica*, 6, 259-259.
- [4] R. Casati, M. Vedani, A. Tuissi "Thermal cycling of stress induced martensite for High Performance Shape Memory Effect", *Scripta Materialia*, 80, 13-16 (2014).
- [5] 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).
- [6] S. Besseghini, A. Tuissi, E. Olzi, F. Cito, G. Carcano *Vuoto Sci Tecnol*, 26 (1997) 5-9
- [7] R. Casati, F. Passaretti, A. Tuissi *Proc Eng*, 10 (2011) 3423-3428.
- [8] R. Casati, A. Tuissi *JMEP*, 21 (2012) 2633-2637