Leghe metalliche a memoria di forma

Versione: 28/06/2012

I materiali di NANOLAB, inclusa la presente guida, sono proprietà degli autori di NANOLAB (www.nanolab.unimore.it) e distribuiti con licenza Creative Commons 3.0

Metalli intelligenti

Leghe a memoria di forma o **metalli intelligenti (**in inglese **smart metals)** sono espressioni usate per indicare una serie di composti metallici che, deformati meccanicamente, presentano la curiosa proprietà di tornare alla forma originale quando vengono scaldati al di sopra di una certa temperatura. Inoltre, il metallo può essere 'programmato' per assumere una forma desiderata, proprietà che lo rende particolarmente utile per molte applicazioni tecnologiche. Tra di essi il Nitinolo è uno di quelli più utilizzati.

Il **Nitinolo** (NiTi) è un composto intermetallico: due elementi, Nickel e Titanio, sono mescolati nel **rapporto stechiometrico** di circa 1:1. Dal punto di vista cristallino, gli atomi di Ni e Ti si dispongono sullo stesso reticolo, alternandosi (vedi fig.1)

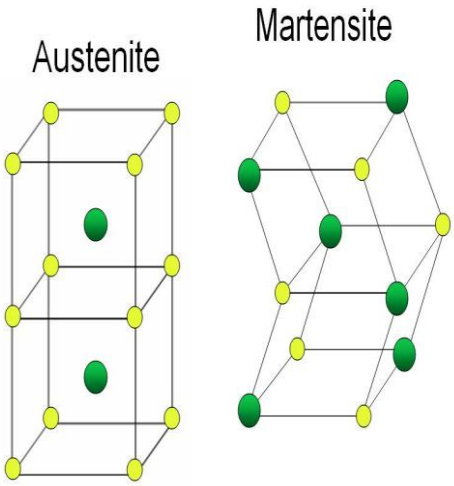


Fig.1 Disposizione degli atomi di Ni e Ti nelle due fasi. Qui la fase martensitica è rappresentata nella configurazione "twinned". Per gentile concessione di MRSEC-IEG

Transizioni di fase Austenite - Martensite

La maggior parte dei solidi ha un'unica struttura cristallina, ma il NiTi ne ha due! Il passaggio dall'una all'altra costituisce una vera e propria **transizione di fase allo stato solido**, analoga in molti aspetti alla **transizione solido-liquido**. Come in quest'ultimo caso, infatti, il passaggio tra due stati della materia è indotto dalla variazione di **temperatura**, dalla **forza** applicata, o da una combinazione dei due fattori. [3]

[3] Si vedrà tuttavia che vi sono anche notevoli differenze rispetto ai passaggi di stato classici (non si tratta di un

La caratteristica distintiva di una transizione di fase è il brusco cambiamento di una o più proprietà fisiche. Le proprietà macroscopiche di un materiale infatti dipendono fortemente dalla struttura cristallina, pertanto una sua seppur lieve modificazione può portare a materiali anche molto diversi tra loro.

Un esempio familiare è quello del **Carbonio** (Fig. 2): un cristallo di Carbonio con la struttura tetraedrica (ogni atomo è al centro di un tetraedro ai cui vertici siedono altri atomi) costituisce il **diamante**, un materiale trasparente, isolante e dalle eccezionali proprietà di resistenza meccanica. Ma il Carbonio può ugualmente presentarsi nella forma cristallina della **grafite**, in cui gli atomi si dispongono su da strati debolmente legati tra loro, dando luogo ad un materiale di colore nero, friabile e debolmente conduttore. Diamante e grafite sono diverse **forme allotropiche** del Carbonio.[4] Ogni struttura è stabile in un determinato intervallo di pressione e temperatura. Tuttavia, in genere una volta che il cristallo si è formato con una specifica forma cristallina (per esempio, il diamante si forma solo a pressioni molto elevate) è molto difficile fargli cambiare forma modificando semplicemente pressione e temperatura. In questo caso, le diverse strutture cristalline sono dette **metastabili**.

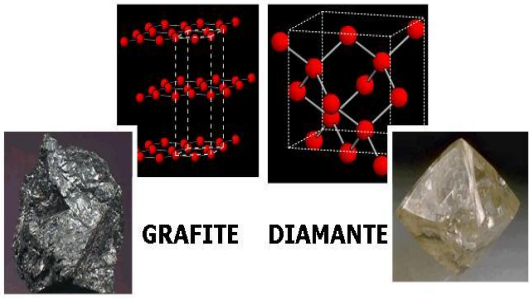


Fig.2 Grafite e diamante hanno la stessa composizione chimica essendo fatti di soli atomi di carbonio. La oro struttura cristallina è però profondamente diversa.

Per gentile concessione di GeoLab e Ludoteca Scientifica http://www.ludotecascientifica.it/

Nel caso del Nitinolo, invece, si può indurre il passaggio tra le due strutture variando la temperatura in un intervallo facilmente realizzabile in laboratorio. Le forme cristalline del Nitinolo sono due:

- **Austenite:** è la fase stabile ad alta temperatura. E' caratterizzata da un reticolo a **simmetria cubica a corpo centrato (BCC)**, in cui gli atomi cioè occupano i vertici di due reticoli cubici compenetrati. Il materiale in questa fase è duro e difficilmente deformabile.
- **Martensite:** è la fase stabile a bassa temperatura. Ha una **struttura cristallina monoclina distorta**, molto meno simmetrica del tipo BCC. E' caratterizzata da grande flessibilità e dalla capacità di essere facilmente deformata senza che tuttavia tale deformazione sia permanente, Infatti, questa fase si forma e si accomoda in forma *twinned*, ovvero speculare rispetto ad un piano ideale tra due celle, non creando difetti irreversibili nel reticolo cristallino. Questa struttura a *twins* è pertanto facilmente deformabile, aprendosi nella forma detwinned come il mantice di una fisarmonica e, non avendo creato difetti di

fenomeno diffusivo, non vi è una temperatura caratteristica, bensì un intervallo di temperature, …).

[4] Il Carbonio ha varie altre forme allotropiche, come i nanotubi e i fullereni, di grande interesse tecnologico

slittamento dei piani reticolari, è reversibile. Nella fase martensitica, perciò, il materiale sottoposto a uno sforzo meccanico è in grado di sopportare un alto grado di deformazione senza tuttavia rompere i legami chimici.

Poiché la trasformazione tra Austenite e Martensite è reversibile, alzando la temperatura il materiale esegue la trasformazione cristallina inversa e riprende la forma regolare e rigida della Austenite, indipendentemente dalla deformazione eventualmente subita nella fase Martensite. Si manifesta cioè **l'effetto di memoria di forma SME (Shape Memory Effect)**.

Analizziamo in maggiore dettaglio come possono avvenire i cambiamenti da una fase all'altra.

a)Austenite-Martensite non deformata tramite variazione di temperatura

In seguito ad un brusco raffreddamento in assenza di carichi o pressioni, cioè se non interviene uno sforzo meccanico, il materiale si trasforma da Austenite in Martensite non deformata, il cui reticolo cristallino è nella fase *twinned*. Riscaldando si opera la trasformazione inversa .

La transizione di fase non si presenta con il classico gradino ad una specifica temperatura. Non vi è cioè una trasformazione isoterma dipendente dal tempo, in cui, alla temperatura caratteristica, il calore fornito/ceduto viene utilizzato per trasformare una certa quantità di sostanza da una fase all'altra, come avviene nel caso dell'acqua che si trasforma in ghiaccio. Nella trasformazione Austenite-Martensite non deformata la trasformazione di fase si può dire completata solo quando tutti i domini si sono trasformati nella fase *twinned*, e ciò avviene con continuità, iniziando ad una precisa temperatura $\mathbf{M^s}$ e finendo ad un'altra $\mathbf{M^f}$. Abbassando la temperatura non si ha un accrescimento delle zone di martensite già formate, ma piuttosto la creazione di nuove.[5] Al di sotto di Mf si avrà il 100% di martensite ed il processo risulterà concluso.

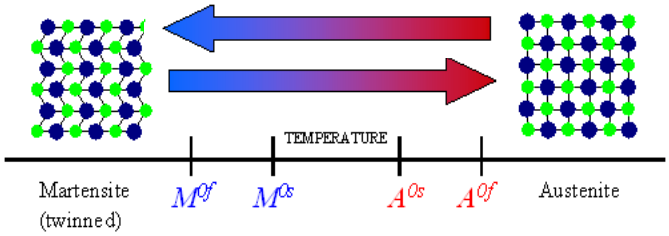


Fig.3 Cambiamento di fase indotto dalla sola variazione di temperatura: Austenite- Martensite non deformata. Sono individuati gli intervalli di temperatura dei cambiamenti di fase. Per gentile concessione di Texas A&M University, Department of Aerospace Engineering.

Per il nitinolo si definiscono ben quattro temperature caratteristiche che costituiscono gli estremi di due intervalli (Vedi fig.3):

$\mathbf{M^s}$ temperatura martensitica iniziale, è la temperatura alla quale inizia il processo di trasformazione da Austenite a Martensite;

$\mathbf{M^f}$ temperatura martensitica finale, alla quale il processo di trasformazione è ormai completato;

[5] Vedi li filmato

http://www.youtube.com/watch?v=OQ5lVjYssko&feature=related

A^s temperatura austenitica iniziale, alla quale inizia il processo inverso, da Martensite ad Austenite;

A^f temperatura austenitica finale, in cui il processo di trasformazione è completato.

Notare che non c'è sovrapposizione tra le temperature, a differenza ad es. della temperatura di liquefazione/solidificazione, che presenta lo stesso valore indipendentemente dal verso della trasformazione. Un'altra differenza rispetto ad acqua-ghiaccio è che in una trasformazione di questo tipo non vi è alcun apparente cambiamento macroscopico del campione. Tuttavia, esistono grandezze macroscopiche, tra le quali il **suono** e la **resistività elettrica**, che permettono di identificare la fase in cui esso si trova.

Fig.4 Le pareti di una camera anechoica ricordano un po' i diversi orientamenti dei domini martensitici. Sono progettate per evitare riflessioni del suono assorbendo tutta l'energia. Fonte Wikipedia

Il cambiamento nella propagazione del suono è molto evidente se si ha a disposizione una barretta di Nitinolo. Battendo con un oggetto rigido il Nitinolo nella fase martensitica si produce un suono sordo, mentre nella fase austenitica si produce un suono più cristallino. L'onda sonora infatti viaggia praticamente indisturbata, senza impedimenti nella struttura cristallina regolare dell'Austenite, mentre nella Martensite i confini tra le regioni con diverse orientazioni agiscono come deflettori e smorzatori per le vibrazioni meccaniche. Ciò produce complessivamente un suono soffocato ed ottuso.

Analogamente, la resistività elettrica è in genere maggiore nei cristalli caratterizzati da maggior disordine o comunque da una minore simmetria. La fase martensitica, perciò, presenta una maggiore resistività, dovuto al disordine costituito dal cambio di orientazione delle celle del reticolo.

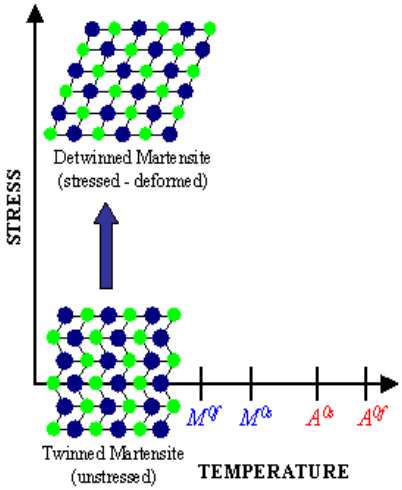


Fig.5 Cambiamento indotto da sforzo meccanico. Per gentile concessione di Texas A&M University, Department of Aerospace Engineering. http://smart.tamu.edu/

b)Martensite non deformata - Martensite deformata tramite sforzo meccanico

Supponiamo ora di applicare uno sforzo meccanico al Nitinolo nello stato martensitico non deformato. Il materiale può passare ad uno stato deformato attraverso un processo di *detwinning* del cristallo. Rilasciando il carico il materiale rimane deformato ma se la lega è al di sotto della temperatura di transizione non ci sono danni permanenti e riscaldandola al di sopra di Af riprenderà la forma originale non deformata.

c)Austenite – Martensite deformata

E' anche possibile assistere alla trasformazione, raffreddando il materiale sotto carico, che porti

direttamente dalla fase austenitica alla fase martensitica deformata (*detwinned*), . Si possono osservare allungamenti anche molto grandi dell'ordine del 5-8% (I metalli normalmente hanno un allungamento elastico inferiore all'0,5%). Ricaldando il materiale poi a temperatura superiore ad A^f, il materiale si porterà al completo recupero della forma originale, esercitando un lavoro

Inoltre se variamo gli sforzi applicati si vedrà che le **temperature di transizione** dipendono fortemente dal carico applicato. A carichi maggiori corrispondono temperature di transizione maggiore. In genere si assume una relazione lineare. Sebbene ci sia uno spostamento di tutte le temperature, l'ampiezza degli intervalli M^s-M^f e A^s-A^f rimane sostanzialmente inalterata (Fig.6).

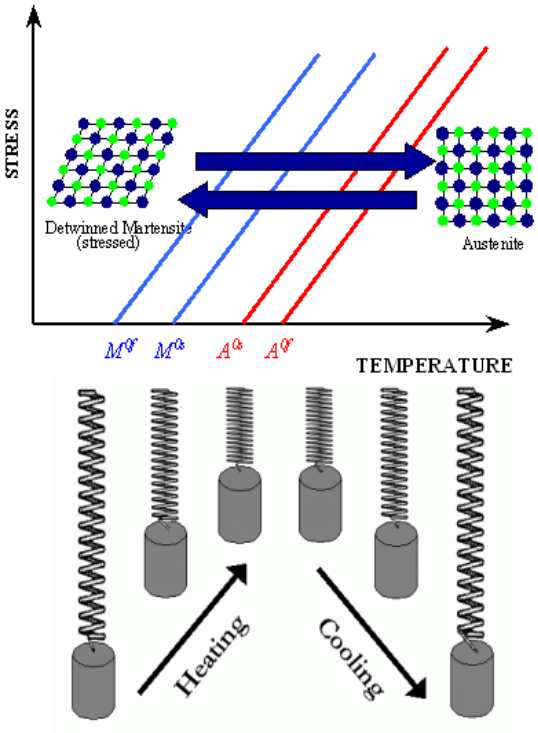


Fig.6 Cambiamento di fase indotto dalla variazione di temperatura con carico applicato: Austenite- Martensite deformata. Per gentile concessione di Texas A&M University, Department of Aerospace Engineering.

d)Austenite-Martensite completamente deformata indotta da solo sforzo meccanico

Se si parte da Nitinolo in fase di Austenite a temperatura costante e superiore ad A^f (temperatura a cui tutti domini sono austenitici) e si applica uno sforzo meccanico è possibile indurre una trasformazione di fase ottenendo Martensite *detwinned* con il conseguente raggiungimento di notevoli allungamenti (fino al 10%). Al successivo rilascio del carico, la nuova fase diventa instabile ed il materiale recupera la sua forma originale. Diversamente dal fenomeno della memoria di forma non è necessario alcun aumento di temperatura perché ciò avvenga. Il materiale cioè sembra elastico: per questo si parla di **effetto pseudoelastico** o, impropriamente, di **superelasticità**. Una opportuna proporzione nella composizione chimica della lega permette di ottenere materiali superelastici a temperatura ambiente.

I passaggi di fase osservati alla scala atomica

La trasformazione martensitica si realizza attraverso piccoli spostamenti atomici collettivi che vanno a modificare il reticolo cristallino. Questi spostamenti avvengono su piani ed in direzioni ben definite senza che si abbiano fenomeni diffusivi (e quindi mutamenti chimici con dipendenza dal tempo). Gli spostamenti atomici collettivi producono una modificazione della forma solo all'interno di ciascun cristallo senza che su scala macroscopica sia possibile osservare alcuna variazione di forma. Infatti la Martensite *twinned* che si ottiene è costituita da diversi cristalli

placchettiformi che, grazie alla loro varia orientazione, danno una deformazione complessiva nulla. Si parla di varianti auto-compensanti. Il parametro che ha maggiore influenza sulle proprietà della lega è la composizione chimica della stessa. Cambiando le proporzioni di Nickel e Titanio è anche possibile cambiare la temperatura di transizione. Una piccolissima differenza nel rapporto tra i due elementi permette alla temperatura di transizione della Austenite di andare da -50°C a + 95°C, aprendo il campo a diverse possibilità di utilizzo, dallo spazio al corpo umano. In genere per materiali progettati per l'utilizzo a temperatura ambiente si ha un 56% di Nichel contro un 44% di Titanio, con temperatura di transizione tra i 50 /70°C .

Dare una nuova memoria al NiTi (*training*)

Non solo i " **metalli intelligenti"** possono **ricordare** la forma originaria ,ma addirittura possono essere addestrati a "memorizzarne" una nuova. Per capire come questo avviene, ricordiamo che gli atomi di Nickel e Titanio all'interno di una delle molte regioni cristalline, dette "grani", in fase austenitica sono quasi perfettamente allineati. Come in ogni cristallo, sono inevitabilmente presenti alcuni difetti, chiamati **dislocazioni**.

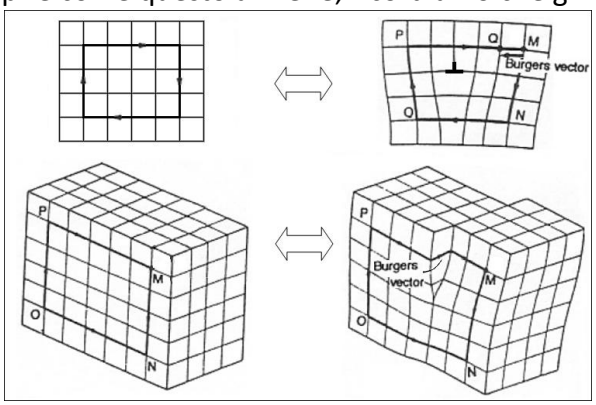
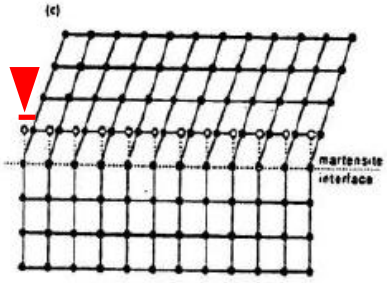


Fig. 8 Formazione di una dislocazione in reticolo in due dimensioni (in cui la dislocazione corrisponde a "sfilare" parzialmente un piano atomico) e in tre dimesnsioni. Per formare una dislocazione gli atomi devono rompere i propri legami e formarne di nuovi

Le dislocazioni consistono in uno spostamento di un piano cristallino prodotto, per esempio, da un intenso sforzo meccanico che induce una deformazione. La deformazione è infatti resa possibile proprio dalla formazione di dislocazioni. La formazione di una dislocazione implica che alcuni legami chimici vengano rotti. Questi difetti perciò richiedono una elevata energia per essere prodotti e, una volta generati, hanno una elevata stabilità.

Sebbene percentualmente difetti di questo tipo siano pochissimi rispetto al numero di piani atomici del cristallo, sono proprio essi, assieme ai confini dei grani e ai precipitati, a dare all'Austenite le sue proprietà di memoria, fissandone la forma macroscopica. Infatti, tali difetti sono energeticamente stabili e rimangono invariati tra la fase austenitica e la fase martensitica poiché, come si è visto, tale trasformazione avviene senza rottura e riarrangiamento dei legami chimici. Perciò il metallo in fase martensitica sottoposto ad un moderato riscaldamento torna alla sua forma originaria, caratterizzata dalla specifica configurazione di difetti nella fase austenitica.

Per dare al metallo una nuova memoria è necessario creare un nuovo insieme di difetti. Questo può essere ottenuto scaldando il materiale a circa 500°C da 10' a 60'. L'energia termica così fornita eccita gli atomi e libera le dislocazioni. Nel successivo raffreddamento gli atomi si accomodano in posizioni di più bassa energia, creando la nuova serie di difetti compatibili con la forma imposta al materiale. La forma può essere ridefinita più volte ripetendo semplicemente il processo di



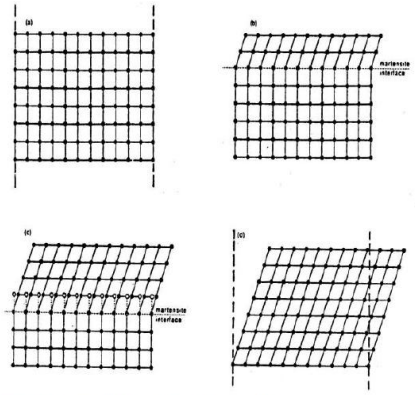


Fig7. Minimi spostamenti coordinati collettivi non diffusivi nella transizione da Austenite a Martensite.

riscaldamento. Una volta raffreddata il pezzo può essere piegato e deformato e con un successivo riscaldamento moderato (cioè ad una temperatura molto inferiore a quella utilizzata per fissare la forma) riescono in parte o totalmente a recuperare la forma.

La storia del Nitinolo

La storia del Nitinolo è particolarmente interessante perchè ancora una volta dimostra come alcune grandi scoperte nascano collegando eventi anche casuali con la curiosità, l'immaginazione e la creatività.

Negli anni 30 A. Olander (Svezia) osserva la proprietà di recuperare la propria forma originaria da parte di leghe di Oro e Cadmio (AuCd).

Nel 1950 Chang e Read (Columbia University, USA) osservano questo movimento inusuale e il cambiamento di struttura del cristallo AuCd tramite la diffrazione a raggi X. A seguito di ciò si scoprono altre leghe con comportamento simile, tra cui Indio-Titanio.

Nel 1963 viene osservato tale effetto nel Nickel-Titanio. Presso il Nickel-Titanium Naval Ordinance Lab (da cui il nome Nitinol) William Bucher sta sviluppando nuovi materiali metallici per la punta del veicolo di rientro dell'US Navy Polaris, quando una delle barre cade producendo un suono diverso dalle altre. Preoccupato di eventuali difetti nella colata, Bucher indaga ulteriormente rendendosi conto che tutto dipende dalla temperatura e non dal materiale: la stessa barra a temperatura diversa produce una nota differente. Sempre casualmente un suo collega avvicina la fiamma dell'accendino ad un filo di nitinolo producendone il ritorno alla forma originaria: è la prima manifestazione dello SME (Shape Memory Effect).

Si studiano poi leghe di rame-alluminio, ferro-titanio, nickel-alluminio. Il nitinolo e leghe di rame-zinco-alluminio diventano i materiali preferiti per le SME perché di costo contenuto, con una grande capacità di variare sostanzialmente la propria forma e per la facilità di fabbricazione. Oggi il Nitinolo copre circa il 90% del mercato.

Oltre a queste qualità il Nitinolo è anche biocompatibile (l'AuCd è tossico): non reagisce con acqua e ossigeno corrodendosi o arrugginendo nel tempo, si contrae in modo simile alle fibre muscolari, può sopportare un grande sforzo, e può cambiare la sua struttura cristallina in prossimità della temperatura ambiente. Le prime due caratteristiche lo rendono particolarmente adatto per

utilizzarlo all'interno del corpo umano in applicazioni biomedicali.

Applicazioni

Alcuni fenomeni caratteristici rendono gli SME particolarmente utili in applicazioni tecnologiche:

a)Memoria di forma

Le proprietà di memoria di forma hanno reso il Nitinolo un materiale ideale in ambiti molto diversi tra loro, dalle missioni spaziali (Clementine, Pathfinder e molti altri) alle decorazioni floreali (farfalle e libellule animate), dagli stent vascolari utilizzati per garantire il flusso sanguigno nelle arterie otturate, agli attuatori (tendini artificiali) per microrobot operanti tramite effetto Joule. L'estrema flessibilità del nitinolo trova impiego anche nelle antenne dei cellulari, negli apparecchi ortodontici, nelle montature di occhiali, nelle placche per saldare fratture ossee, come attuatori per regolare la temperatura nelle caffettiere o negli impianti domestici di

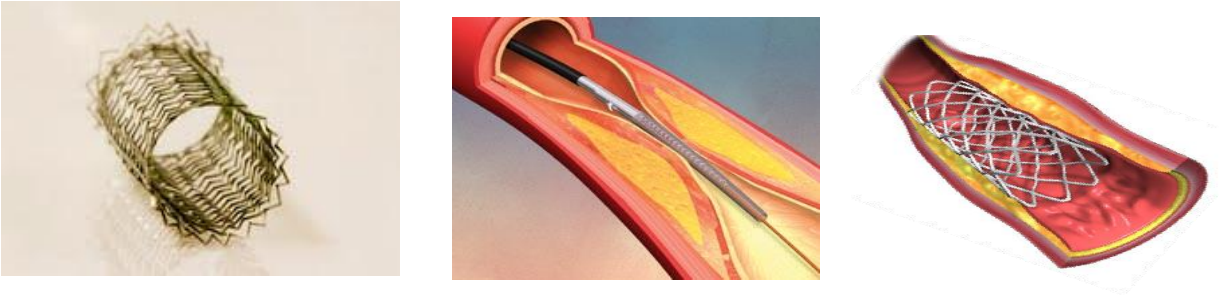


Fig. 9. Da sinistra : uno stent in nitinolo con la tipica struttura a maglia intreccita (immagine di Joe Muskin , Illinois University of Urbana Champaign). Lo stent è introdotto ancora chiuso all'interno dei vasi che rischiano l'occlusione (al centro). Qui si espandono attivati dalla temperatura corporea (destra).

miscelazione dell'acqua , in manicotti autoserranti per tubazioni o rivetti per chiodature, etc. Risultano poi molto interessanti singoli elementi SME in grado di funzionare contemporaneamente come sensore termico, amplificatore e attuatore. Un esempio di applicazione di successo si ha nella apertura automatica delle finestre delle serre. La forza di richiamo generata nel recuperare la forma è elevatissima.

b)Contrazione per riscaldamento

A differenza della maggior parte dei metalli il nitinolo anziché espandersi si contrae se riscaldato e lo fa con un movimento circa 100 volte maggiore di quello che si registra mediamente nella dilatazione/contrazione termica metallica. Questa proprietà è stata sfruttata soprattutto nell'uso di fili sottilissimi di nitinolo come "muscoli artificiali" in applicazioni robotiche. Esiste addirittura un prototipo di muscolo cardiaco operato da fili di nitinolo. In questi casi il riscaldamento si ottiene per effetto Joule col passaggio di correnti bassissime.

c)*Superelasticità o pseudo elasticità*

Molte applicazioni infine non prevedono lo sfruttamento del fenomeno di SME, bensì l'effetto

pseudoelastico, ad esempio per lo smorzamento delle vibrazioni in apparati meccanici particolarmente sollecitati (quali piedistalli di macchinari o bussole di trapani) o addirittura per proteggere gli edifici in caso di terremoti. Il Nitinolo e' infatti in grado di dissipare energia e sopportare grandi deformazioni reversibili. Grazie al suo comportamento superelastico quando viene allungato il nitinolo immagazzina energia, che viene poi restituita nel processo inverso. Questa lega può arrivare ad immagazzinare fino a 42 MJm^{-3}, da 4 a 50 volte più di quanto immagazzinabile negli acciai.

Le applicazioni di maggior successo della superelasticità sono quelle in cui la temperatura è controllata, come ad esempio nell'interno del corpo umano, vista anche l'elevatissima biocompatibilità. In ortodonzia, dopo una deflessione iniziale tornano alla configurazione di partenza esercitando una forza continua e leggera con minor disagio del paziente.

Un filo di nitinolo superelastico a temperatura ambiente viene usato come sonda guida-cateteri per la sua flessibilità e resistenza alle piegature, con enorme vantaggio rispetto ai fili di acciaio inossidabile. Sono anche state realizzate sonde di localizzazione e prelievo tessuti anche seguendo cammini complessi permettendo così una chirurgia non invasiva. Massiccio infine l'uso nelle montature di occhiali.

d) Capacità di smorzamento delle vibrazioni meccaniche (rumore)

In particolare si è osservato un massimo di smorzamento in prossimità di M^s e A^s. Lo smorzamento è molto alto in un largo intervallo di temperature, ma una volta raggiunta la fase martensitica completa cala considerevolmente. Si ritiene che l'effetto di dissipazione sia legato alla fase di transizione stessa ed alla quantità del materiale trasformato nell'unità di tempo. Sostanzialmente cioè lo smorzamento risulta massimo nella fase più caotica e disordinata (un po' come accade anche per la resistività)

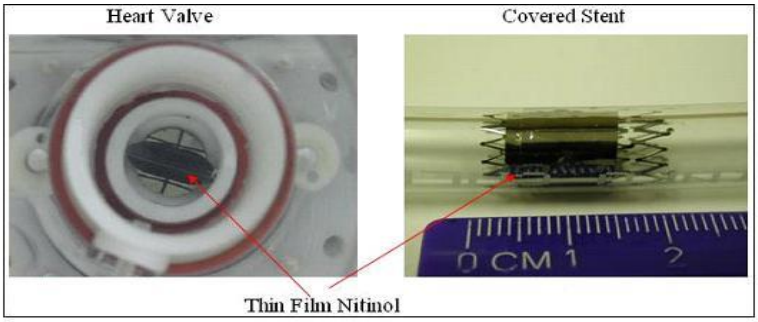


Fig. 10 Foto di alcune applicazioni del film di nitinolo progettate e realizzate alla UCLA (Los Angeles, CA, USA): valvola cardiaca (sin) e uno stent ricoperto dal film di Nitinolo (destra)
Per gentile concessione di Center for Advanced Surgical and Interventional Technology (CASIT) www.casit.ucla.edu

Inoltre si è notato che lo smorzamento esercitato dalle martensiti dipende dalla ampiezza delle sollecitazioni esercitate. Per sollecitazioni piccole lo smorzamento è dovuto allo spostamento delle dislocazioni mentre per sollecitazioni maggiori allo spostamento delle interfacce glissili presenti tra le placchette.

Recentemente sono stati realizzati anche **film sottili di nitinolo**. Mediante un processo di **sputtering**, uno strato di NiTi spesso da 0,2 a 50 micron viene depositato su un substrato. Successivamente viene staccato dal supporto, mantenendo le proprietà di memoria di forma del Nitinolo massivo. La velocità di

raffreddamento (che è in genere un aspetto critico) è molto alta grazie alla ampia superficie di scambio ed al minimo spessore. Può essere interessante il suo uso in meccanismi di precisione: microattuatori, valvole interruttori e sistemi integrati elettromeccanici.

Ulteriori materiali di approfondimento

- Video
  - http://www.youtube.com/watch?v=OQ5lVjYssko&feature=related video al microscopio elettronico dei movimenti dei domini martensitici al variare della temperatura. University of Tokyo.
  - http://www.youtube.com/watch?v=qZsozvf1pD8
    Courtesy of DoITPoMS, The University of Cambridge. Released under Creative Commons Attribution-Non-Commercial-Share Alike license
  - Una alternativa ai filmati può essere la simulazione http://www.smaterial.com/SMA/simulation/md_simul/MD_start.html

- In italiano:
  - Colombo - "Teoria e applicazioni delle SMA 1998" dispense in Italiano scaricabili al link www.ing.unitn.it/~colombo/LEGHE.../SMAs.pdf
  - Lorenzetti Cesare "Introduzione alle leghe a memoria di forma" 2000
  - www.ui.torino.it/allegati/21790
  - http://www.endodonziamauroventuri.it/Le%20leghe%20in%20nichel-titanio.htm

- In Inglese
  - http://smart.tamu.edu/overview/smaintro/simple/definition.html Texas smart lab da cui sono state prese molte delle figure che illustrano le transizioni di fase.
  - http://www.nitinol.com/media/reference-library/048.pdf
  - http://www.nitinol.com/media/reference-library/011.pdf SMART materials per applicazioni mediche.
  - nano film http://nanopatentsandinnovations.blogspot.com/2010/03/high-strength-vacuum-deposited-shape.html
  - heat engine a base di due molle di nitinolo; imagesco è anche uno dei fornitori di nitinolo http://www.imagesco.com/nitinol/files/heatengine2.pdf
  - Otsuka review on SMA 1989 scaricabile a http://www.nims.go.jp/ferroic/Rev-intermet.pdf
  - http://mrsec.wisc.edu/Edetc/background/memmetal/index.html
  - http://aml.seas.ucla.edu/home.htm

- Libri con molti esempi di possibili applicazioni e progetti per la classe
  - "Smart wire and its applications "Cave J, Jarvis J Gatsby Technical Education Projects 1997
  - "More applications for smart wire and other forms of shape memory alloy" Day J

Gatsby Technical Education Projects 1998
- “Muscle Wires Project Book” Gilbertson R G Mondo-tronics.inc 2000