



**Parco Scientifico e Tecnologico della Liguria**

**Studo di fattibilita'**

**"Trasferimento di tecnologie alle PMI di La Spezia  
operanti nel settore delle lavorazioni del titanio"**

**Appendice**

# **Leghe a Memoria di Forma Caratteristiche ed Applicazioni**

**Ottobre 2000**

**Autore: Vincenzo Arrichiello**

[www.vincenzoarrichiello.com](http://www.vincenzoarrichiello.com)



## Indice

1. Introduzione.....	1
2. Cenni storici.....	2
3. Materiali.....	3
4. Caratteristiche micro e macroscopiche .....	4
4.1. Memoria di forma (monodirezionale).....	5
4.2. Effetto pseudoelastico (superelastico).....	6
4.3. Memoria di forma bidirezionale .....	7
4.4. Capacita' di smorzamento.....	7
5. Proprieta' funzionali .....	9
6. Applicazioni.....	11
6.1. Giunti, dispositivi di fissaggio e connettori.....	11
6.2. Attuatori .....	12
6.2.1. Esempi di realizzazioni .....	13
6.3. Smart Materials .....	16
6.4. Sistemi di smorzamento.....	17
6.5. Dispositivi biomedicali.....	18
6.6. Dispositivi micro-elettromeccanici .....	20
6.7. Applicazioni varie .....	21
7. Referenze bibliografiche.....	22



## **1. Introduzione**

La definizione Leghe a Memoria di Forma e' utilizzata per descrivere un gruppo di leghe metalliche aventi la principale caratteristica di poter presentare uno stato di deformazione pseudo-permanente, suscettibile di essere eliminata mediante un processo termico.

La Leghe a Memoria di Forma son quindi capaci di riassumere, dopo aver subito una deformazione, la conformazione e le dimensioni della condizione precedente la deformazione.

Il ripristino della condizione pre-deformazione e', generalmente, attivato da un opportuno aumento di temperatura.

Oltre alla caratteristica di reversibilita' termica della deformazione, le LMF presentano anche altre caratteristiche, quali il comportamento superelastico, e la capacita' di generare elevate forze in fase di recupero della forma, che risultano di notevole interesse per possibili applicazioni industriali.



## **Parco Scientifico e Tecnologico della Liguria**

### **2. Cenni storici**

Le prime osservazioni del fenomeno risalgono al 1932, ma la reale attività di ricerca metallurgica e lo studio di possibili applicazioni ha avuto inizio solo in seguito alla scoperta, nel 1962, del fenomeno nelle leghe equiatomiche di Titanio-Nichel presso il Naval Ordnance Laboratory della US Navy (da questo deriva la tipica denominazione di tali leghe: NitiNOL).

L'avanzamento della comprensione del fenomeno ha portato, negli anni seguenti, alla individuazione di numerose altre leghe che presentano il fenomeno della memoria di forma; tuttavia le leghe di Titanio Nichel sono quelle che meglio si prestano ad applicazioni pratiche e quindi sono quelle sulle quali si sono concentrati gli sforzi di sviluppo e sfruttamento commerciale.

Soprattutto negli ultimi anni la disponibilità di materiali con caratteristiche di qualità in costante miglioramento, ha reso possibile lo sviluppo di numerosi prodotti per svariati settori di applicazione; la presenza di sbocchi commerciali ha, a sua volta, stimolato la ricerca innescando un processo sinergico che rende il settore fortemente evolutivo.



### 3. Materiali

Il fenomeno della memoria di forma si manifesta in molti tipi di leghe, tra le quali le principali sono elencate nella seguente tabella, con indicazione di alcuni parametri caratteristici

Tavola 1: Leghe a Memoria di Forma

Lega	Composizione	Campo della temperatura di trasformazione °C	Isteresi di trasformazione (appross.) °C
Ag-Cd	44/49 at.% Cd	-190 to -50	15
Au-Cd	46.5/50 at.% Cd	30 to 100	15
Cu-Al-Ni	14/14.5 wt.% Al 3/4.5 wt.% Ni	-140 to 100	35
Cu-Sn	approx. 15 at.% Sn	-120 to 30	
Cu-Zn	38.5/41.5 wt.% Zn	-180 to -10	10
Cu-Zn-X (X = Si,Sn,Al)	a few wt.% of X	-180 to 200	10
In-Ti	18/23 at.% Ti	60 to 100	4
Ni-Al	36/38 at.% Al	-180 to 100	10
Ni-Ti	49/51 at.% Ni	-50 to 110	30
Fe-Pt	approx. 25 at.% Pt	approx.-130	4
Mn-Cu	5/35 at.% Cu	-250 to 180	25
Fe-Mn-Si	32 wt.% Mn, 6 wt.% Si	-200 to 150	100

(da: K. Shimizu, T.Tadaky; Shape Memory Alloys, H.Funakubo, Ed. Gordon and Breach Science Publishers, 1987)

In pratica, tuttavia, solo pochi di queste hanno avuto uno sviluppo di tipo commerciale, quelle a base di rame (Cu-Zn, Cu-Sn, Cu-al-Ni) e quelle a base di Nichel-Titanio (Ni-Ti).

Le leghe a base di Ni-Ti sono utilizzate attualmente per la maggioranza delle applicazioni (circa 90%) nonostante risultino piu' costose e di piu' difficile lavorazione; questo e' dovuto principalmente ai seguenti fattori:

- maggiore resistenza meccanica
- migliore stabilita'
- migliore resistenza all'ambiente
- disponibilita' in fili e lamine sottili
- biocompatibilita'

In particolare l'ultima caratteristica ha avuto un ruolo fondamentale nel rendere possibili una ampia gamma di applicazioni biomedicali

## 4. Caratteristiche micro e macroscopiche

La capacità di un materiale di presentare l'effetto della memoria di forma è principalmente dipendente dalla possibilità di tale materiale di presentarsi, in alcune condizioni, in una particolare configurazione microscopica detta fase martensitica, ed in altre in una differente configurazione detta fase austenitica (detta anche beta o "parent").

Tipicamente la fase martensitica si presenta a temperatura inferiore, mentre quella austenitica si presenta a temperatura superiore.

La fase martensitica presenta la peculiare caratteristica di potere presentare diverse "varianti" cristallografiche caratterizzate da una diversa orientazione del reticolo cristallino; viceversa la fase austenitica può presentare una sola forma cristallografica.

La applicazione di sollecitazioni esterne al materiale in fase martensitica, può indurre una deformazione che, almeno entro un certo campo di ampiezza, è di tipo pseudoplastico, ossia è ottenuta mediante una riorganizzazione delle varianti che privilegia quelle con orientamento "favorevole" alla direzione dello stress applicato.

La forma deformata così ottenuta risulta stabile nella fase martensitica, ma se la temperatura del materiale viene aumentata fino a superare la temperatura di trasformazione, al passaggio nella fase austenitica il materiale è "obbligato" a riacquisire la forma originaria.

La trasformazione martensitica appartiene alla tipologia delle "displacive transformations" che comportano la riorganizzazione degli atomi in una diversa struttura cristallina ma senza presentare i fenomeni di migrazione a largo raggio tipici delle "diffusional transformations".

La trasformazione martensitica può essere indotta sia da una variazione della temperatura che dalla applicazione di una azione meccanica.

Il tipico andamento della trasformazione indotta dalla variazione di temperatura è rappresentato in figura 1

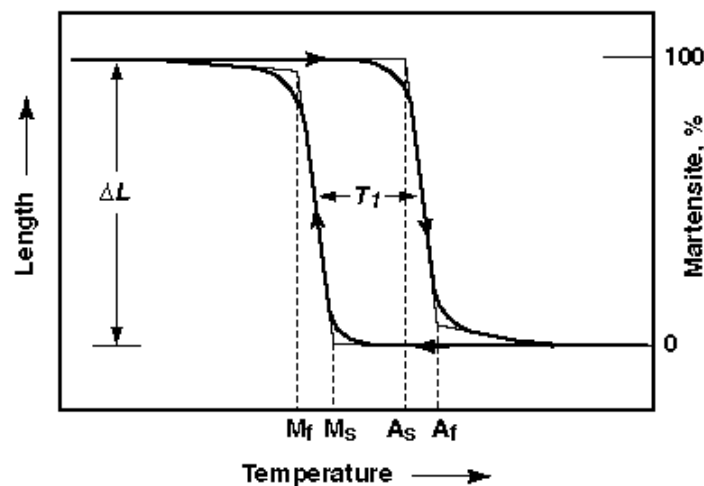


Fig.1: Trasformazione tipica in funzione della temperatura di un campione sottoposto a carico costante durante un ciclo di raffreddamento e riscaldamento. (da [1])

T1: isteresi della trasformazione,

Ms: Temperatura di inizio della trasformazione in fase martensitica

Mf: Temperatura di completamento della trasformazione in fase martensitica

As: Temperatura di inizio della trasformazione in fase austenitica

Af: Temperatura di completamento della trasformazione in fase austenitica

E' da sottolineare che l'andamento ciclico della variazione di lunghezza al variare della temperatura, si verifica in conseguenza della applicazione di una sollecitazione esterna.

Infatti in assenza di sollecitazioni applicate, la trasformazione dalla fase austenitica a quella martensitica si realizza, per la maggior parte delle LMF, senza significativa variazione di dimensione.

## 4.1. Memoria di forma (monodirezionale)

Nel passaggio dalla fase austenitica alla fase martensitica, dato che la trasformazione si verifica progressivamente nel materiale, per ciascun elemento in fase di trasformazione e' imposto il mantenimento delle caratteristiche dimensionali; questo e' ottenuto mediante un processo di accomodamento che comporta la disposizione del materiale in strati con varianti ad orientamento alternato del reticolo (twinning).

La applicazione di una sollecitazione esterna puo' generare una deformazione permanente provocando un orientamento preferenziale (detwinning) degli strati; questo meccanismo di riarrangiamento permette la deformazione con bassi livelli di sollecitazione applicata.

Se il materiale viene portato ad una temperatura adeguata, ha luogo la trasformazione nella fase austenitica che e' associata ad una sola struttura e quindi riporta il materiale nella forma originaria.

Questo fenomeno e' detto di memoria di forma monodirezionale in quanto si verifica una sola volta nel passaggio dalla fase martensitica a quella austenitica.

Affinche' il processo possa essere ripetuto e' necessario, dopo aver riportato il materiale, mediante raffreddamento, nella fase martensitica, applicare una sollecitazione capace di indurire la deformazione.

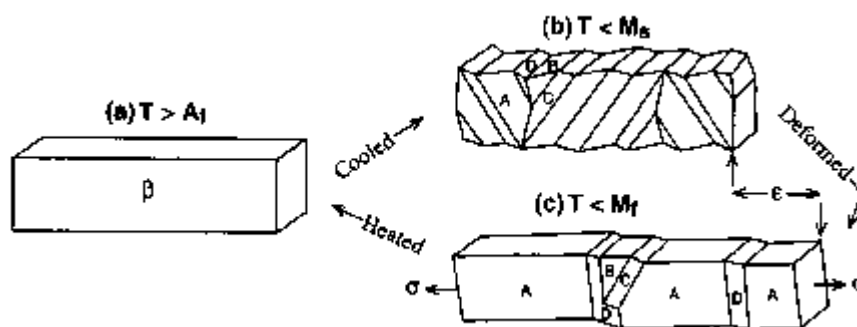


Fig.2: (a) cristallo in fase Beta. (b) A,B,C e D: varianti auto-accomodanti (twin-related) dopo raffreddamento e trasformazione nella fase martensitica (c) A seguito della applicazione di una sollecitazione la variante A diviene dominante. A seguito di riscaldamento, il materiale ritorna alla fase Beta e recupera la forma originaria.

## 4.2. Effetto pseudoelastico (superelastico)

Oltre che per effetto termico, la fase martensitica può anche essere ottenuta, ad una temperatura leggermente maggiore di  $A_f$ , mediante applicazione di una azione meccanica che provochi una deformazione del materiale (stress-induced martensite).

Dopo il raggiungimento di un livello di tensione critico, ha inizio la trasformazione in martensite, la deformazione ulteriore fino alla completa trasformazione, avviene ad un livello di tensione circa costante (stress plateau).

Dopo il completamento della trasformazione di fase, la applicazione di tensione ulteriore provoca la deformazione prima elastica e poi plastica della austenite.

Se la deformazione viene limitata al livello corrispondente all'inizio della deformazione plastica, la trasformazione risulta reversibile e quindi, in corrispondenza di un livello di tensione inferiore a quello che ha indotto la trasformazione in martensite, si ha la trasformazione inversa con ritorno alla situazione iniziale.

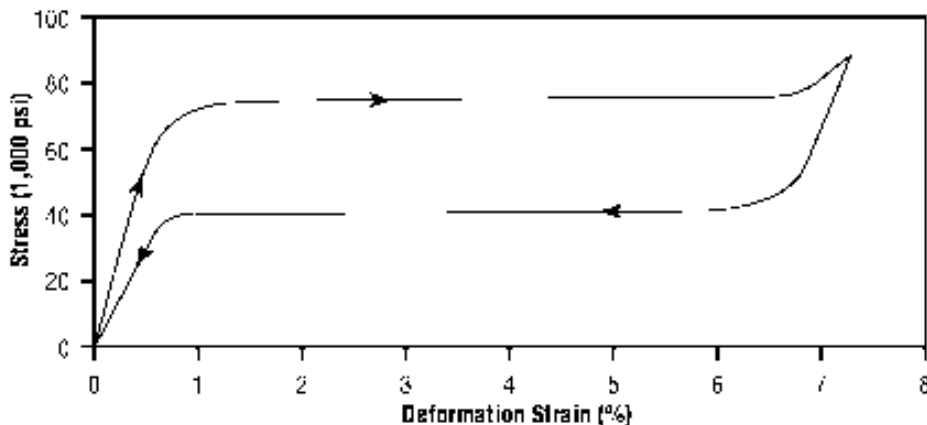


Fig.3 Tipico comportamento superelastico del NiTi in fase di applicazione e rimozione di una tensione esterna (da [3])

Questo fenomeno, per quanto funzionalmente simile ad un effetto elastico, è, in realtà, dovuto ad una trasformazione di fase ed è descritto con il termine di superelasticità o di pseudoelasticità.

La deformazione reversibile che può essere prodotta dal fenomeno di superelasticità può raggiungere un'ampiezza pari all' 8% della dimensione iniziale; se si tiene conto che la deformazione elastica nei materiali metallici ordinari è tipicamente limitata allo 0.2%, il motivo della denominazione di superelasticità appare evidente.



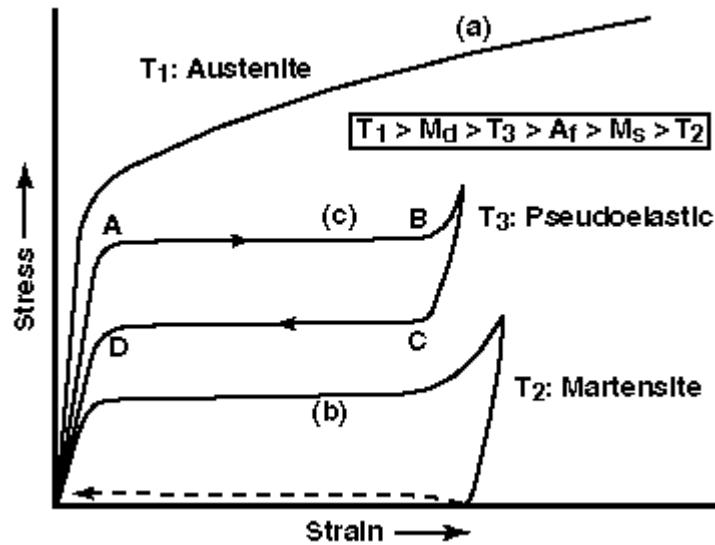


Fig.4 Tipiche curve stress-strain a differenti temperature relativamente alla trasformazione; (a) mostra il comportamento austenitico, (b) quello martensitico e (c) quello pseudoelastico (da [1])

### 4.3. Memoria di forma bidirezionale

Sottoponendo il materiale ad un adeguato trattamento termomeccanico (training), e' possibile realizzare delle condizioni di microstress interno che privilegiano la formazione di una specifica variante di orientamento nel passaggio alla fase martensitica.

In tal modo anche a questa fase e' associata una specifica condizione di forma.

Il materiale cosi' trattato manifesta l'effetto di memoria di forma bidirezionale, in quanto assume una di due forme predefinite al variare della temperatura.

### 4.4. Capacita' di smorzamento

La capacita' di un materiale di trasformare parte della energia meccanica, tipicamente relativa a moti vibrazionali o a carichi impulsivi, in una forma di energia differente, generalmente energia termica per effetti dissipativi.

Un parametro diffusamente utilizzato per descrivere la capacita' di smorzamento di uno specifico materiale e' il fattore di perdita, definito come:

$$\eta = \Delta W / 2 * \pi * W$$

ove

W = energia applicata

$\Delta W$  = energia dissipata

Il fattore di perdita e' tipicamente riferito a condizioni nelle quali la deformazione e lo stress applicato ritornano al valore iniziale, ossia e' escluso l'intervento di fenomeni di deformazione plastica.



## Parco Scientifico e Tecnologico della Liguria

La maggior parte dei materiali strutturali comunemente utilizzati, presenta un fattore di perdita molto limitato, almeno ai livelli di stress generalmente associati con il fenomeno di vibrazione. I fattori di perdita dei più diffusi materiali metallici variano dal 1% di acciai, bronzi e leghe di alluminio, al 3% di alcune ghise.

I materiali viscoelastici tipicamente presentano elevati fattori di perdita ma, per contro, non hanno caratteristiche di resistenza tali da permetterne l'impiego come materiali strutturali, e quindi devono essere utilizzati in associazione con materiali ad alta resistenza.

La ricerca nel settore delle LMF ha permesso, recentemente di mettere a punto alcuni materiali che abbinano a buone caratteristiche di resistenza meccanica elevati valori del fattore di perdita e quindi elevate capacità di smorzamento; queste leghe vengono tipicamente chiamate "hidamet" (high damping metal).

I meccanismi che generano le elevate capacità di smorzamento delle LMF sono raggruppabili in alcune principali tipologie:

- Smorzamento per attrito interno nella fase martensitica  
è sostanzialmente riconducibile a movimenti di interfacce nella struttura del materiale (interfacce tra varianti martensitiche e "twin boundaries"); la capacità di smorzamento tende ad aumentare con la ampiezza di deformazione (sono state effettuate sperimentazioni fino ad ampiezze di strain di  $6 \cdot 10^{-6}$ )
- Smorzamento per attrito interno nel corso della trasformazione  
Un valore massimo dei fenomeni di attrito interno si verifica nel corso della trasformazione, sia in fase di aumento che di diminuzione della temperatura; a temperatura costante il fattore di perdita risulta di un valore intermedio tra quello delle due fasi, in funzione della rispettiva percentuale di presenza nella lega.
- Smorzamento per attrito interno nella fase austenitica  
La fase austenitica presenta, di per sé, limitate capacità di smorzamento, tuttavia un interessante comportamento agli effetti dello smorzamento si manifesta quando interviene il fenomeno di pseudoelasticità; in queste condizioni, la dimensione del ciclo sforzo-deformazione (fig.3) fornisce una misura della capacità di smorzamento.

## 5. Proprieta' funzionali

Le proprieta' funzionali specifiche delle leghe a memoria di forma che risultano di prevalente interesse dal punto di vista applicativo possono essere quindi cosi' brevemente riepilogate:

### **1. Effetto memoria monodirezionale**

In questo caso viene "memorizzata" solo la forma ad alta temperatura; quando il materiale e' nella fase martensitica puo' essere facilmente portato ad assumere una qualsiasi forma mediante una deformazione, apparentemente di tipo plastico, con il solo limite che non venga superato un livello di deformazione limite (circa 8%)

Il materiale recupera la deformazione ritornando alla forma ad alta temperatura se viene riscaldato oltre la temperatura di transizione.

L'effetto e' detto monodirezionale in quanto solo la forma ad alta temperatura puo' essere ripristinata per effetto termico, mentre per ottenere la forma a bassa temperatura e' necessario applicare una azione meccanica esterna.

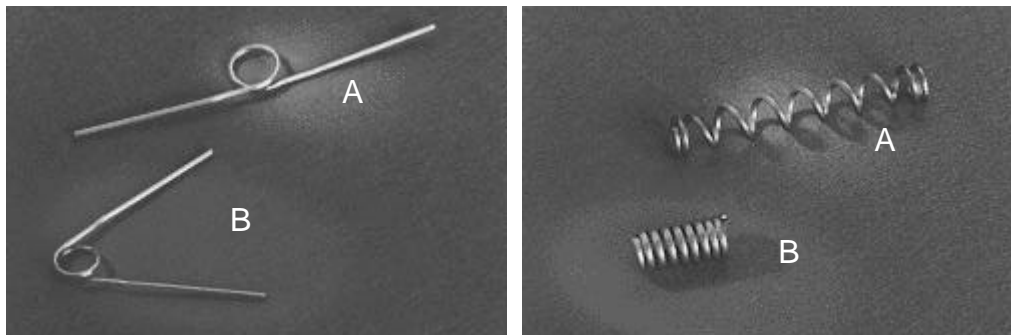


Fig.5 Variazione di forma di elementi in Lega a Memoria di Forma, a bassa temperatura (B) ed alta temperatura (A) (da [5])

### **2. Effetto memoria bidirezionale**

Questo effetto puo' essere ottenuto mediante un particolare procedimento termomeccanico in fase di produzione.

Vengono memorizzate due forme, una a bassa temperatura ed una ad alta temperatura, la trasformazione tra le due forme avviene per solo effetto termico, senza applicazione di forze

### **3. Generazione di forza**

Se si impedisce al materiale di ritornare alla forma ad alta temperatura (austenitica) quando viene portato ad una temperatura superiore a quella di transizione, e' possibile ottenere la generazione di una forza.

La forza generata in questo modo, detta forza di recupero di forma puo' essere di elevata intensita'.



#### **4. Produzione di lavoro**

Se durante il recupero di forma viene applicata una forza esterna con direzione opposta a quella nella quale avviene la deformazione del materiale, è possibile ottenere la generazione di lavoro meccanico.

#### **5. Effetto superelastico**

Questo effetto non richiede variazioni di temperatura; il materiale nella forma austenitica può essere deformato mediante applicazione di una forza esterna, quando questa viene rimossa il materiale ritorna alla forma originaria; la deformazione reversibile che può essere ottenuta è di notevole ampiezza (circa 8%).

#### **6. Capacità di smorzamento**

Le leghe a memoria di forma presentano sia nella fase martensitica che in quella austenitica, elevate capacità di smorzamento.

Queste sono dovute a due distinti fenomeni: per la fase martensitica la capacità di smorzamento è dovuta prevalentemente a fenomeni di attrito interno, per la fase ad alta temperatura, dipende prevalentemente da fenomeni di dissipazione nel ciclo di isteresi tra deformazione e recupero superelastici.



### **6. Applicazioni**

La tecnologia delle Leghe a Memoria di Forma, per quanto possa ormai vantare un buon numero di applicazioni di ragionevole rilevanza commerciale, e' da considerarsi ancora in una fase di rapido sviluppo, con un campo di possibili applicazioni commerciali sicuramente destinato ad ampliarsi ulteriormente nei prossimi anni.

I principali campi di applicazione delle Leghe a Memoria di Forma, allo stato attuale, sono:

- Giunti, dispositivi di fissaggio e connettori
- Attuatori
- Smart materials
- Sistemi di smorzamento
- Dispositivi biomedicali
- Dispositivi micro-elettromeccanici
- Applicazioni varie

#### **6.1. Giunti, dispositivi di fissaggio e connettori**

In questo tipo di applicazioni viene sfruttata la capacita' dei materiali a memoria di forma di generare una forza di notevole intensita' quando il ritorno alla forma ad alta temperatura e' meccanicamente impedito.

Il giunto viene realizzato con dimensioni tali da presentare, quando si trova nella forma ad alta temperatura, una adeguata interferenza con le parti da fissare.

Per consentire il montaggio, il giunto viene portato nella fase martensitica mediante refrigerazione e dilatato opportunamente.

Una volta montato, il giunto viene lasciato ritornare alla temperatura ambiente; in tal modo ha luogo la trasformazione di fase ed il giunto tende a ritornare alla forma ad alta temperatura; dato che questo recupero e' impedito dalla interferenza con le parti da fissare, viene generata una tensione che realizza la azione di fissaggio.

La principale differenza dei giunti in LMF rispetto a quelli convenzionali crimpati, e' rappresentata dal persistere della azione attiva di serraggio anche dopo la messa in opera.

Naturalmente la temperatura di transizione della lega utilizzata deve risultare inferiore a quella minima di impiego previsto, per evitare che, a bassa temperatura, possa verificarsi un indesiderato allentamento del giunto.

Questo tipo di giunti e' utilizzato da tempo nell'industria aerospaziale per l'accoppiamento di tubi di impianti idraulici (giunti Cryofit e Betalloy, Raychem Corp.); la diffusione e' limitata prevalentemente dal costo elevato e dai limiti del campo termico ammesso (tipicamente da -20°C a +200°C).

Un impiego analogo a quello della giunzione di condotte idrauliche, di recente introduzione, riguarda il serraggio delle guaine schermanti su connettori e giunti in impianti elettrici di veicoli militari terrestri.

A questo gruppo di applicazioni si possono ricondurre anche i connettori elettrici a forza di inserimento nulla (ZIF, Zero Insertion Force), che permettono il facile inserimento dei contatti



## Parco Scientifico e Tecnologico della Liguria

quando sono portati a bassa temperatura, ma a temperatura ambiente esercitano una forte presa sul contatto.

### 6.2. Attuatori

Durante la fase di recupero della forma ad alta temperatura, un elemento di materiale a memoria di forma è in grado di produrre lavoro meccanico; infatti se ad esso è applicata una azione esterna che si oppone al recupero di forma, la forza di recupero e la variazione di forma hanno la stessa direzione e quindi danno luogo alla generazione di lavoro meccanico (positivo).

Tra i principali vantaggi presentati dagli attuatori basati sull'impiego di elementi a memoria di forma si possono citare:

– Semplicità del meccanismo:

il dispositivo può essere progettato in modo da sviluppare direttamente la azione richiesta, senza richiedere elementi di trasmissione e collegamento.

– Funzionamento senza attrito, pulito, silenzioso, e senza generazione di scintille:

gli attuatori a memoria di forma non richiedono l'uso di componenti ausiliari basati su fenomeni di attrito (ad es. ingranaggi), e quindi escludono la generazione di polveri, inoltre permettono un funzionamento senza vibrazioni e silenzioso; la assenza della possibilità di generazione di scintille li rende adatti all'impiego in presenza di sostanze infiammabili.

– Elevato rapporto potenza/peso:

soprattutto per attuatori di piccole dimensioni e peso (< 100g)

Per conto le principali limitazione degli attuatori a memoria di forma risultano:

– Bassa efficienza energetica:

la efficienza energetica degli attuatori a memoria di forma risulta fortemente dipendente dalla configurazione adottata e dal tipo di deformazione utilizzata; il caso più favorevole si ha con elementi filiformi caricati a tensione, in quanto questa configurazione consente un ottimale utilizzo del materiale che opera in condizioni di sollecitazione uniformi. Configurazioni che ingenerano una distribuzione dello stress non uniforme realizzano un peggiore utilizzo del materiale e quindi risultano meno efficienti.

– Limitata banda passante (di attuazione):

questa limitazione deriva principalmente dalla durata della fase di raffreddamento, infatti, mentre il riscaldamento può essere ottenuto in modo abbastanza rapido, ad esempio applicando una corrente elettrica al materiale, il raffreddamento è limitato dalle capacità di smaltire il calore nell'ambiente, generalmente per conduzione e convezione.

– Deterioramento e fatica:

la applicazione di sollecitazioni di elevata entità e di deformazioni di elevata ampiezza possono generare alterazioni nella struttura cristallina; quindi, dove sia richiesto poter realizzare un numero elevato di cicli, risulta necessario operare con livelli di deformazione e sollecitazione ridotti.



## Parco Scientifico e Tecnologico della Liguria

Il riscaldamento dell'elemento attivo puo' essere realizzato o mediante un fluido che lambisce l'elemento o mediante la applicazione di energia.

Il primo caso e' tipico delle applicazioni nelle quali la attivazione e' indotta dal raggiungimento di una determinata temperatura nell'ambiente che circonda l'attuatore (ad. es. termostati).

Nel secondo caso la energia puo' essere applicata o per via induttiva o per via resistiva, mediante circolazione di corrente nell'elemento stesso; il metodo resistivo risulta generalmente preferito non solo in conseguenza del fatto che le caratteristiche elettriche di molte LMF lo rendono di facile implementazione, ma anche perche' genera una piu' uniforme distribuzione della temperatura nel materiale, evitando la generazione di tensioni interne.

### 6.2.1. Esempi di realizzazioni

Gli attuatori basati su componenti a memoria di forma trovano applicazione in una ampia gamma di settori, da quello aerospaziale a quello degli elettrodomestici.

Tra le realizzazioni piu' note si possono citare:

#### **Frangibolt**

Si tratta di un sistema di sgancio per applicazioni aerospaziali sviluppato per permettere la sostituzione dei bulloni esplosivi.

Questi sono stati tradizionalmente impiegati nel settore aerospaziale per effettuare il rilascio di apparati esterni (ad es. antenne) su satelliti dopo il posizionamento in orbita.

Il sistema Frangibolt realizza la rottura dell'elemento di fissaggio mediante l'allungamento di un collare di LMF attivato dall'aumento di temperatura prodotto da un riscaldatore elettrico.

I principali vantaggi rispetto ai bulloni esplosivi son costituiti da: assenza di pericolo durante il montaggio e l'impiego, possibilita' di riutilizzo, affidabilita' di funzionamento.

Data la relativa semplicita', il sistema Frangibolt ha un costo contenuto che ne rende possibile l'utilizzo anche in applicazioni industriali e civili (sistemi antincendio)[TiNi Aerospace, Inc.].

#### **Frangivalve**

Si tratta di un sistema derivato dal Frangibolt per la sostituzione delle pirovalvole (valvole azionate mediante carica esplosiva)[TiNi Aerospace, Inc.].

#### **Sistema di pretensionamento di perni**

Il pretensionamento del perno e' ottenuto mediante la espansione, attivata termicamente, di un distanziale in LMF; il pretensionamento viene realizzato senza applicare sforzi di taglio sul perno [SINTEF Petroleum Research]

#### **Passaggio a livello per ferromodellismo**

L'utilizzo di un attuatore in LMF per la movimentazione delle sbarre dei modelli di passaggi a livello permette di ottenere una riduzione di dimensioni ed un movimento piu' realistico rispetto alle versioni attuate con solenoide [Brawa]



## **Parco Scientifico e Tecnologico della Liguria**

### **Attuatore per serranda di chiusura di aspiratore**

Un elemento in LMF operante a flessione, genera il movimento di apertura e chiusura della serranda esterna dell'aspiratore, ed e' in grado di mantenerla in posizione chiusa anche in presenza di vento.

### **Attuatori per la fratturazione della roccia**

Sistema per fratturazione delle rocce mediante attuatori a memoria di forma per la estrazione di materiali lapidei, da utilizzarsi in sostituzione alle cariche esplosive [D'Appolonia S.p.A., Genova]

Un gruppo numeroso di applicazioni riguarda dispositivi che utilizzano, per la attivazione, il calore reso disponibile dal processo stesso:

### **Concealed Sprinkler**

Spruzzatore antincendio con copertura; lo spruzzatore e' nascosto da una copertura con funzione estetica. la copertura e' mantenuta in posizione da una molla in LMF che ne provoca il distacco ad una temperatura leggermente inferiore a quella di entrata in funzione dello spruzzatore [Viking Corp.]

### **Valvola di sicurezza termica per impianti di distribuzione gas domestici ed industriali**

La valvola interviene, attivata dal calore, in caso di incendio interrompe la erogazione del gas per prevenire la fuoriuscita di gas che potrebbe alimentare ulteriormente l'incendio .

### **Dispositivi di sblocco porte tagliafuoco**

I dispositivi sono attivabili direttamente dal calore e sono ripristinabili manualmente, quindi possono essere periodicamente sottoposti a verifica di funzionamento.

### **Thermoloc<sup>®</sup>**

Il sistema Thermoloc e' un sistema di chiusura di sicurezza per contenitori da sterilizzazione; la attivazione del blocco puo' essere ottenuta solamente sottoponendo il contenitore al processo di sterilizzazione. All'apertura del contenitore il blocco viene disattivato; al blocco e' associata una segnalazione che indica la condizione sigillato-nonsigillato.[Wagner]

### **Chiusura di sicurezza per forni**

Il dispositivo utilizza una coppia di molle contrapposte, una in materiale convenzionale ed una in LMF, per azionare il perno di chiusura.

A bassa temperatura prevale l'effetto della molla convenzionale, mentre ad alta temperatura prevale l'effetto della molla in LMF, portando il perno in posizione di chiusura.





## Parco Scientifico e Tecnologico della Liguria

### **Interruttore termico per bollitore**

La molla in LMF che aziona l'interruttore elettrico della resistenza, e' attivata dal vapore prodotto quando l'acqua raggiunge la temperatura di ebollizione

### **Dispositivo di regolazione della temperatura dell'aria aspirata per motori a combustione interna**

L'azionamento dei dispositivi per la regolazione della temperatura dell'aria aspirata per motori a combustione interna e' tipicamente realizzato mediante termoattuatori a paraffina, l'utilizzo di una molla in LMF permette di migliorare il tempo di risposta e la precisione di regolazione.

### **Valvola automatica per macchina da caffe'**

La valvola e' azionata da una molla in NiTi che ne attua l'apertura quando l'acqua ha raggiunto una predefinita temperatura, in modo che si mescoli alla polvere di caffe' nelle condizioni ottimali [Carioca, Japan]

### **MemrySafe**

E' un dispositivo di sicurezza per impedire la erogazione di acqua a temperatura troppo elevata in impianti sanitari; la attivazione e' prodotta dal riscaldamento dell'attuatore in LMF indotto dal fluido stesso.

### **FireCheck**

Sistema di intercettazione di emergenza, in caso di incendio, di linee di alimentazione di combustibili controllate da valvole pneumatiche.

### **Sistema di compensazione della viscosita' dell'olio**

Sistema sviluppato per compensare l'effetto della variazione di temperatura dell'olio nelle trasmissioni automobilistiche (Daimler-Benz, Germany)

### **Attuatori automatici di sistemi di aereazione**

Elementi in LMF sono utilizzati in diverse applicazioni per la movimentazione delle serrande di sistemi di aereazione in modo automatico controllato dalla temperatura ambiente



### 6.3. Smart Materials

La definizione Smart Materials accomuna una ampia tipologia di materiali con caratteristiche e capacita' molto diversificate.

In generale gli Smart Material presentano la capacita' di rilevare particolari condizioni (di sollecitazione, ambientali, etc.), la capacita' di modificare alcune delle proprie caratteristiche (di forma, strutturali, etc.) o entrambe tali possibilita'.

Allo stato attuale, la possibilita' di utilizzo delle LMF nella realizzazione di Smart Materials, sembra presentare le maggiori probabilita' verso alcune specifiche applicazioni:

– Accordo della energia mediante tensionamento attivo:

dei fili in LMF sono integrati, vincolati, nel composito; se questo vibra alla frequenza di risonanza, mediante riscaldamento dei fili e' possibile indurre uno stato di tensione nel materiale e provocare una modifica della caratteristica di risonanza.

– Controllo attivo di forma:

l'azione di elementi in LMF integrati nella struttura di un materiale composito e' impiegata per generare una modifica della forma del manufatto. Un esempio tipico di questa applicazione e' il profilo alare a sezione modificabile (SMAAC, Shape Memory Alloy Adjustable Camber control surface)

– Modifica modale attiva:

dei fili di LMF sono integrati nella struttura del materiale composito senza essere vincolati agli estremi. Quando in questi elementi, mediante riscaldamento, viene indotta la trasformazione di fase, la consistente variazione del modulo elastico genera una modificazione dei modi di vibrazione del manufatto.

– Miglioramento della resistenza a fatica ed agli urti (capacita' di autoriparazione):

la integrazione nella struttura del materiale composito di fili superelastici precaricati ha la potenzialita' di contrastare la propagazione delle fratture; un'altra soluzione prevede la integrazione di fili martensitici stirati la cui contrazione potrebbe essere attivata mediante riscaldamento.

– Riduzione attiva delle tensioni:

elementi in LMF in fase martensitica, integrati in varie possibili forme (fili, fogli sottili, fibre, etc.) possono realizzare una riduzione dello stato di tensione derivante da diverse possibili cause quali: condizioni di scarico, shock termico o differenze di coefficiente di espansione termica.

La applicazione delle LMF negli Smart Materials costituisce un settore ritenuto suscettibile di notevole espansione, tuttavia allo stato attuale non esistono significativi esempi di realizzazioni di rilevanza economica.



### 6.4. Sistemi di smorzamento

Le capacita' di smorzamento dimostrata dalle LMF, associata alle buone caratteristiche di resistenza meccanica, ha stimolato la ricerca di applicazioni con differenti finalita', tra le quali:

- riduzione del rumore
- smorzamento di vibrazioni
- aumento della resistenza ai carichi impulsivi.

I settori di applicazione di sistemi di smorzamento con elementi in LMF comprendono:

- utensili
- attrezzi sportivi
- componenti per sistemi aerospaziali
- protezioni antisismiche
- protezioni balistiche

Un tipico esempio di applicazione volta alla riduzione della rumorosita' e' quella dell'utilizzo di LMF per la realizzazione dei dischi per lame di seghe circolari.

Esempi di applicazioni per lo smorzamento delle vibrazioni si sono avuti sia nel settore degli attrezzi sportivi (racchette da tennis, sci, mazze da golf) che nel settore aerospaziale.

Un settore di impiego recentemente studiato nell'ambito di un progetto di ricerca europeo, e' quello dei dispositivi di protezione antisismica degli edifici.

Il progetto MANSIDE (Memory Alloys for New Seismic Isolation and Energy Dissipation Devices), del programma Brite Euram (Contract BRPR-CT95-0031), e' stato dedicato allo studio, sperimentazione e validazione di dispositivi di protezione antisismica basati sull'impiego di LMF; in particolare sono state approfondite le potenzialita' di sfruttamento del fenomeno della pseudoelasticita' per l'assorbimento della energia sismica nelle strutture.

Un ulteriore promettente campo di impiego delle LMF e' quello delle protezioni balistiche; per tale applicazione risulta vantaggiosa la capacita' delle LMF di smorzare rapidamente l'onda d'urto e nel contempo di offrire buone caratteristiche di resistenza meccanica.



### 6.5. Dispositivi biomedicali

Il settore delle applicazioni biomedicali e' quello sicuramente di maggiore rilevanza per le LMF, sia dal punto di vista storico che da quello dell'importanza economica.

Un ruolo di fondamentale importanza per il successo in questo settore deriva dalle eccellenti caratteristiche di biocompatibilita', resistenza alla corrosione e citocompatibilita' delle leghe Titanio Nichel, che ne fanno un materiale ideale per dispositivi destinati all'impianto nel corpo umano.

Si tratta, in effetti di un settore ad altissima specializzazione che viene qui sommariamente trattato solamente per esigenze di completezza.

Una importante famiglia di dispositivi biomedicali e' basata sull'effetto memoria di forma, tra questi si possono citare:

- stent per la dilatazione di vasi sanguigni soggetti a stenosi:

lo stent e' raffreddato e portato in forma compressa in modo da ridurre le dimensioni e renderne possibile l'inserimento in posizione mediante catetere; una volta rilasciato, per effetto della temperatura corporea, lo stent si espande applicando in modo progressivo una forza radiale sulla parete del vaso

- filtri per emboli per la prevenzione dell'embolia polmonare (Simon Nitinol Filter):

il filtro viene inserito mediante un catetere mentre viene mantenuto a bassa temperatura, una volta posizionato nella vena cava, esposto alla temperatura corporea si espande assumendo la conformazione a filtro

- ancoraggi per sutura (Mitek):

sono utilizzati per il collegamento di tendini e legamenti al tessuto osseo mediante un ancoraggio che si espande dopo essere stato inserito in un foro praticato nell'osso; sono stati utilizzati per la prima volta nel 1989 ed attualmente sono disponibili in 25 varianti per diverse applicazioni

La caratteristica di superelasticita', che consente di applicare forze circa costanti anche in presenza di deformazione, e' largamente utilizzata in ortopedia per la realizzazione di sistemi di ancoraggio e fissaggio di impianti e per la immobilizzazione di fratture.

Un altro campo di applicazione nel settore biomedicale e' rappresentato dalla costruzione di strumenti per procedure endoscopiche, nelle quali vengono principalmente sfruttate le caratteristiche di superelasticita'

Tra le applicazioni piu' recenti ed in fase di forte espansione si possono citare:

- Fili per ortodonzia (archwires):

sono realizzati in materiale superelastico. Rispetto a quelli in materiale convenzionale, presentano il vantaggio di applicare una forza che varia in modo limitato in conseguenza del movimento dei denti; pertanto possono operare per un periodo piu' lungo senza che



## Parco Scientifico e Tecnologico della Liguria

sia necessario procedere ad un ritensionamento. Di conseguenza, essendo necessario un numero inferiore di interventi dell'ortodontista, il costo del trattamento risulta ridotto. Un ulteriore, non secondario effetto deriva dal fatto che la forza applicata ai denti e', nella fase iniziale, di entita' ridotta con un conseguente miglioramento del livello di comfort del paziente.

– Sistemi di movimentazione per riabilitazione fisiatrica:

sono dispositivi che impiegano attuatori in LMF per effettuare operazioni di movimentazione assistita di arti soggetti a paralisi per mantenere in efficienza il sistema neuromuscolare; la attivazione degli elementi di attuazione puo' essere effettuata mediante la circolazione di acqua a temperature opportune.



### 6.6. Dispositivi micro-elettromeccanici

Il settore dei dispositivi micro-elettromeccanici (MEMS, Micro Electro Mechanical System) e' relativamente recente ma sta mostrando un elevato impegno nella ricerca e sviluppo di dispositivi.

La potenzialita' di applicare tecniche di produzione di massa per la realizzazione di questi dispositivi, con il conseguente effetto di ridotti costi di produzione, rende verosimile la prospettiva in un elevato sviluppo futuro del settore

Tra le prime realizzazioni disponibili a livello commerciale si possono citare i componenti fluidici sviluppati dalla TiNi Alloy Company:

- microvalvole pneumatiche
- microvalvole per liquidi
- regolatori di pressione miniaturizzati
- microvalvole a controllo proporzionale

Questa societa' ha sviluppata una tecnica basata sull'impiego di elementi in LMF TiNi in film sottile; in questo modo gli elementi a memoria di forma possono essere realizzati ed integrati su substrati in silicio utilizzando tecniche di deposizione per film sottile (sputtering), tecniche di micromachining e tecniche per la produzione di componenti microelettronici

Un altro settore in fase di sviluppo ma con interessanti prospettive di sviluppo e' quello dei dispositivi per microrobotica, tra i quali si possono citare:

- microgripper per la manipolazione di lenti di piccolissime dimensioni (diam. 0.35 mm)
- microposizionatore lineare

Il campo di applicazione previsto per questo tipo di dispositivi e' quello del microassemblaggio.

Alcuni prototipi di questi apparati sono stati realizzati dai ricercatori della Scuola Politecnica Federale di Losanna.

Di particolare interesse risulta la tecnica utilizzata che permette la realizzazione di componenti monolitrici che non richiedono, quindi, operazioni di assemblaggio.



### 6.7. Applicazioni varie

Le particolari caratteristiche delle LMF ben si adattano ad una svariata gamma di applicazioni in prodotti "consumer", quali ad esempio:

– montature per occhiali:

per questa applicazione viene sfruttata la proprietà di superelasticità delle LMF; in questo modo è possibile realizzare montature per occhiali con eccezionali caratteristiche di resistenza alla deformazione e che, nel contempo, risultano particolarmente confortevoli da indossare.

– antenne per telefoni cellulari:

l'impiego di un filo superelastico in LMF consente alle antenne retraibili della maggior parte dei telefoni cellulari, di sopportare, senza deformazione permanente, anche deformazioni accidentali di grande entità.

– elementi di rinforzo per reggiseni:

gli elementi di rinforzo per reggiseni in LMF superelastica consentono una notevole deformabilità e confort, analoga a quella dei rinforzi in Nylon, ma offrono la capacità di supporto di quelli in acciaio. Inoltre gli elementi di rinforzo in LMF non sono soggetti a deformazioni permanenti durante il lavaggio.

– filo da pesca:

Il filo da pesca in LMF presenta una migliore resistenza alla corrosione rispetto a quello in acciaio, mentre, in confronto a quello di Nylon, presenta una migliore resistenza alla potenziale recisione da parte dei denti dei pesci e richiede una minore sezione a parità di resistenza. Inoltre eventuali attorcigliamenti possono essere facilmente rimossi mediante riscaldamento.



### 7. Referenze bibliografiche

- [1] D.E. Hogson, M.H. Wu, R.J. Biermann; Shape Memory Alloys, Technical publication of Shape Memory Applications, Inc., Santa Clara, Ca, USA
- [2] J. Van Humbeeck: General Aspects of Shape Memory Alloys, Brite-Euram MANSIDE Project, Final Workshop Proceedings
- [3] Shape Memory Applications, Inc.; website: <http://www.sma-inc.com>
- [4] Nitinol Solutions, Product brochure, Raychem Corporation
- [5] AMT, Advanced Materials and Technologies; website: <http://www.amtbe.com/>
- [6] M. Nicoletti: MANSIDE presentation: Introduction: Project Overview, Brite-Euram MANSIDE Project, Final Workshop Proceedings
- [7] A. Melzer, D. Stockel: Using Shape Memory Alloys, Medical Device Technology, May 1995
- [8] A.D. Johnson, V.V. Martynov: Applications of Shape-Memory Alloy thin film, TiNi Alloy Company, San Leandro, Ca, 94577 USA, website: <http://www.sma-mems.com>
- [9] Y. Bellouard, R. Clavel, R. Gotthardt, J.E. Bidaux, T. Sidler: A new concept of monolithic shape memory alloy micro-devices used in micro-robotics; Proceedings of Actuator'98-6 International Conference on New Actuators, Bremen, Germany, June 1998