

Leghe a memoria di forma: Introduzione alla fenomenologia e aspetti applicativi

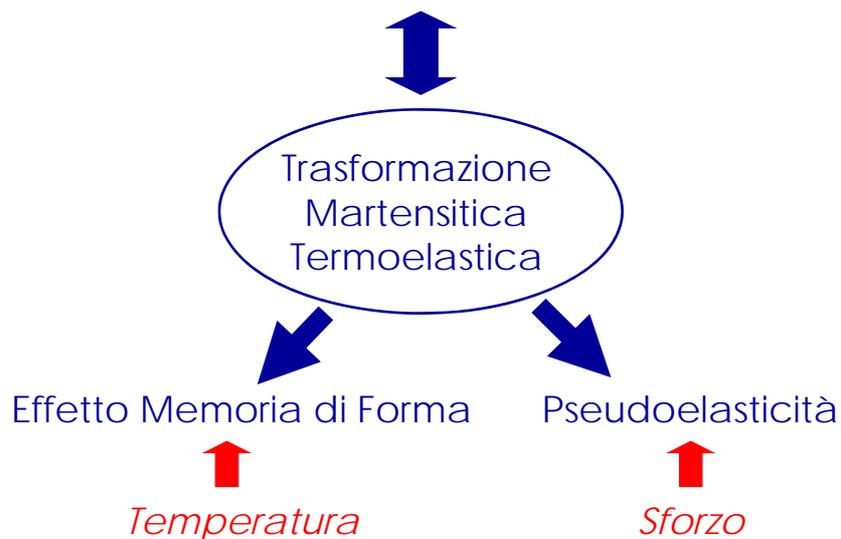
Elena Villa

Università di Modena e Reggio Emilia
Nano Lab-Smart Materials
20 dicembre 2011



Unità di Lecco

LEGHE A MEMORIA DI FORMA

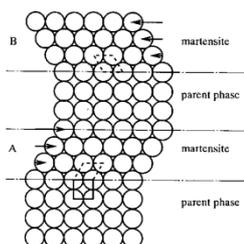


Unità di Lecco

TRASFORMAZIONE MARTENSITICA TERMOELASTICA TMT

- 1° Ordine
- Atermica
- Non diffusiva
- Reversibile

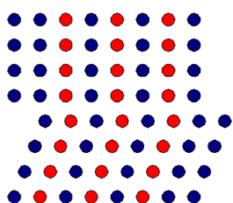
Le TMT sono caratterizzate da un movimento cooperativo di atomi che porta una struttura di partenza (genitrice o parent) ad una struttura prodotta detta genericamente Martensite



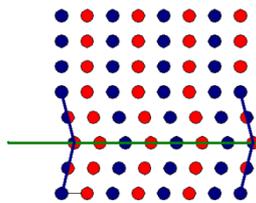
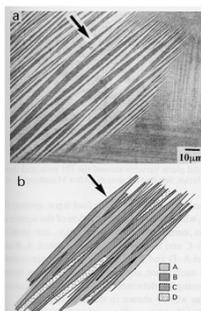
Le TMT sono un sottoinsieme delle più generali trasformazioni martensitiche

Nelle TMT vi è un costante bilancio tra forze termodinamiche di tipo chimico (componente termica) e di tipo meccanico (componente elastica)

Accomodazione

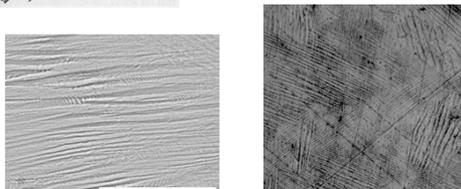


Accomodazione per SLIP



Accomodazione per TWIN

Grandi deformazioni
Reversibilità



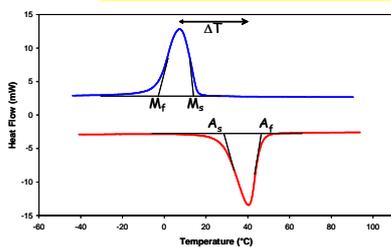
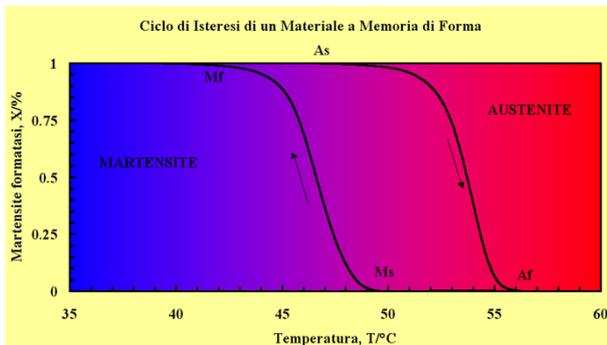
TMT ed Effetto Memoria di Forma

Forma memorizzata grazie a trattamento termico
 Deformazione per movimento dei twins
 $T_B < T_D \rightarrow$ ISTERESI
 Reversibilità cristallografica della trasformazione

TMT e Pseudoelasticità

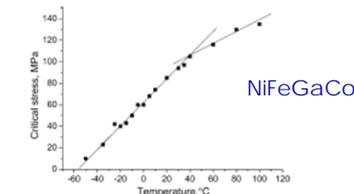
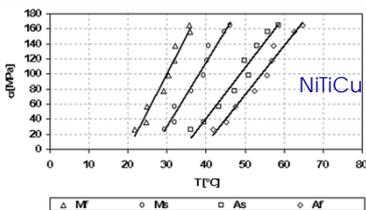
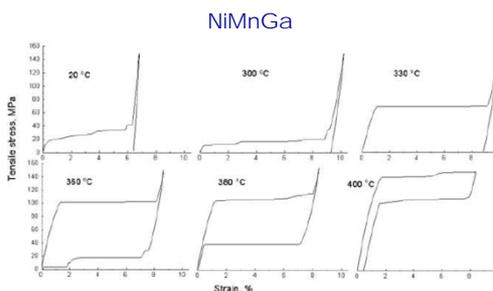
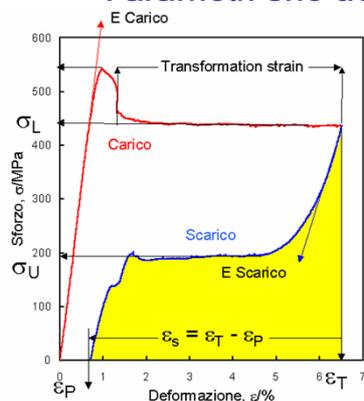
Condizioni isoterme
 Deformazione e recupero a sforzo costante
 carico > scarico \rightarrow ISTERESI
 Equivalenza termodinamica tra
 temperatura e sforzo quali driving forces

Parametri che definiscono TMT (Effetto a Memoria di Forma)



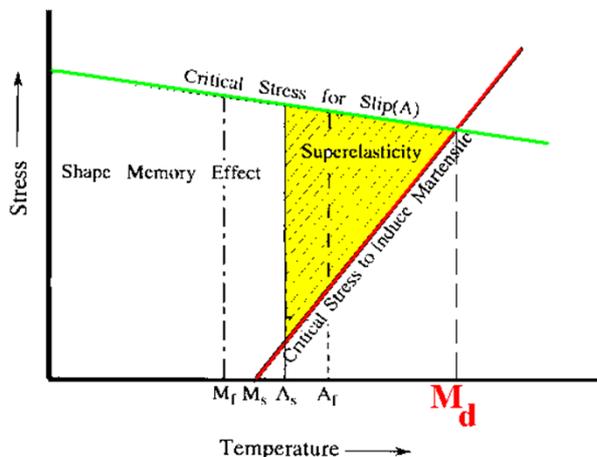
- Ms - Martensite Start
- Mf - Martensite Finish
- As - Austenite Start
- Af - Austenite Finish

Parametri che descrivono la Pseudoelasticità

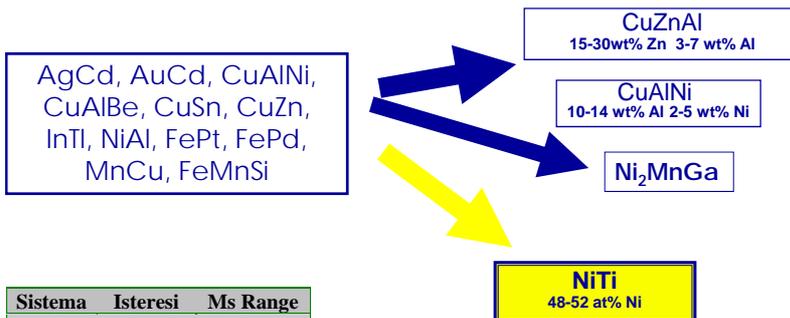


$$\frac{d\sigma}{dT} = - \frac{\Delta S^{P \rightarrow M}}{\varepsilon^{P \rightarrow M}} = - \frac{\rho \cdot \Delta H^{P \rightarrow M}}{T_0 (F) \varepsilon^{P \rightarrow M}}$$

Sintesi comportamento meccanico



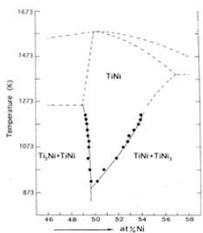
Leghe SMA (Shape Memory Alloys)



Sistema	Isteresi	Ms Range
NiTi	20-30 °C	-60/60 °C
NiTiCu	5-10°C	30°C/50 °C
AgCd	15°C	-80°C
CuZnAl	10°C	-20/50°C
CuAlNi	35°C	80/130 °C
NiTiNb	40-120°C	-20/-50°C

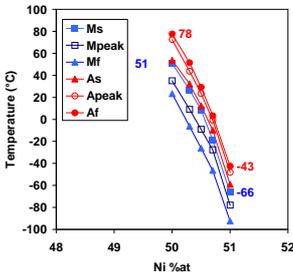
NiTi PRINCIPALI PROPRIETA'
 Recupero libero sino all' 8%
 Generazione di sforzi elevati: 400 MPa
 Elevata resistenza alla corrosione
 Biocompatibilità
 Lavorabilità
 Sistemi ternari derivati (NiTiCu, NiTiHf)

Il sistema NiTi



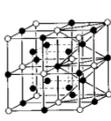
Temperature (K)

at% Ni

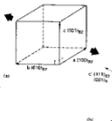


Temperature (°C)

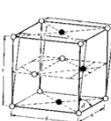
Ni %at



Fase B2



Fase R



Fase B19'

Modulo di Young (GPa)	75-85 (A)	25-35 (M)
Sforzo di snervamento (MPa)	200-700 (A)	70-150 (M)

- Il NiTi è un sistema intermetallico
- E' stabile a temperatura ambiente ma ha un intervallo di esistenza molto ridotto
- Sensibile alle contaminazioni da Ossigeno
- Influenza della stechiometria sulle temperature di trasformazione
- **Dipendenza dalla storia termomeccanica**
- Buona lavorabilità a caldo, difficile a freddo
- Lavorabilità all' utensile difficoltosa
- Eccellente resistenza alla corrosione
- Buona resistenza al ciclaggio (10^3 - 10^5 cicli)

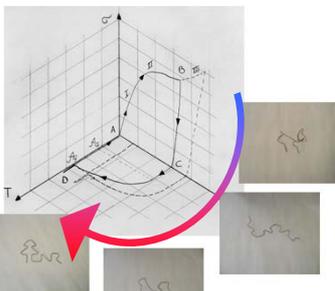


Unità di Lecco

Applicazioni: principi generali

Recupero libero

Al materiale è richiesto semplicemente di generare uno spostamento



Parametri di progetto

Temperature di trasformazione $[M_s, M_f, A_s, A_f]$

Deformazione plastica residua

Applicazioni

Gadget, Dimostratori, Interruttori termici, Dispositivi autoespandenti

Recupero vincolato

Al materiale è impedito il recupero di forma ed esso genera un sforzo di recupero



$T < M_f$ $T > A_f$

- Elevati sforzi di serraggio
- Uniformità radiale del serraggio
- Elevata tolleranza dimensionale
- Elevata elasticità residua della connessione

Parametri di progetto

Temperature di trasformazione $[M_s, M_f, A_s, A_f, M_d]$

"Stress rate" $[d\sigma/dT]$

Sforzo di recupero

Deformazione plastica residua.

Applicazioni

Accoppiamento meccanico

Serraggio per tubi e cavi

Rock Breaker



Unità di Lecco

Applicazioni: principi generali

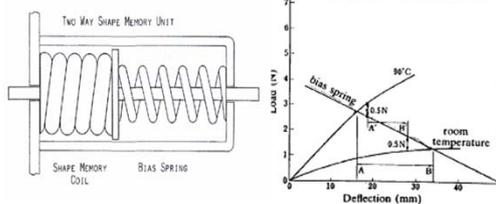
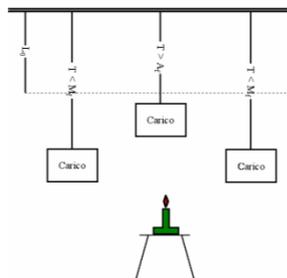
Attuatori

Il materiale viene fatto recuperare contro un vincolo mobile (ad esempio una molla di richiamo e/o un peso) ottenendo lavoro. Il vincolo che impedisce il recupero è in grado di immagazzinare energia promuovendo il "reset" della configurazione iniziale.

Funzione doppia sensore-attuatore

Parametri di progetto

Temperature di trasformazione [Ms, Mf, As, Af]
 "stress rate" [dσ/dT]
 sforzo di recupero
 corretto dimensionamento della forza di recupero

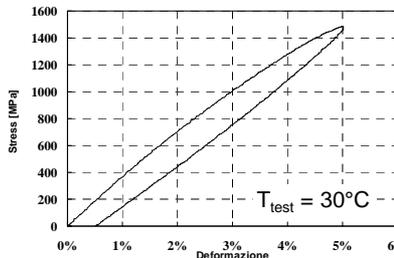
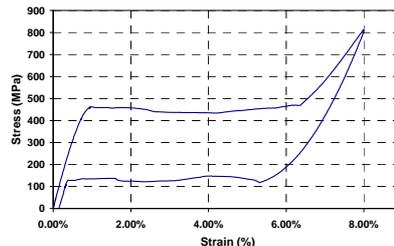
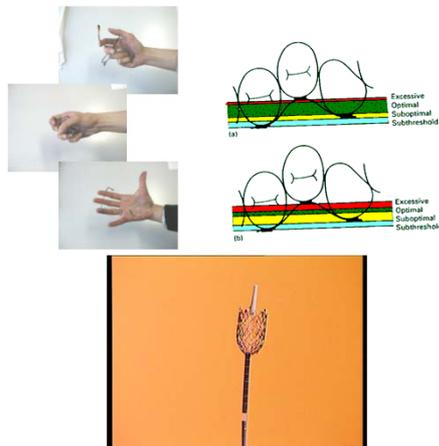


Molla-contromolla

Applicazioni: principi generali

Pseudoelasticità e Superelasticità

Applicazioni isoterme che sfruttano la corrispondenza termodinamica tra sforzo e temperatura



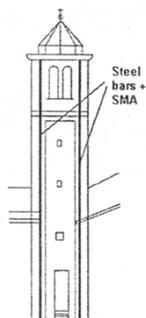
Applicazioni: principi generali

Smorzamento di vibrazioni: HIDAMETS

Grazie alla microstruttura martensitica e alle proprietà pseudoelastiche si realizzano applicazioni che dissipano energia e sostengono grandi deformazioni. In adeguate condizioni i MMF esibiscono capacità di smorzamento del 90%



Campanile Chiesa di S. Giorgio a Trignano



Applicazioni

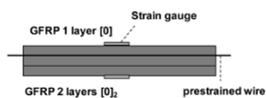
Barre e tiranti accoppiati anche a elementi in acciaio per costituire sistemi antisismici
Strutture composite con frequenza di risonanza variabili



Unità di Lecco

Applicazioni: principi generali

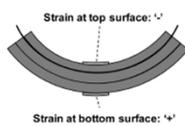
Fili o nastri SMA + polimeri, resine, materiali laminati di vario genere e anche metalli leggeri come l'alluminio



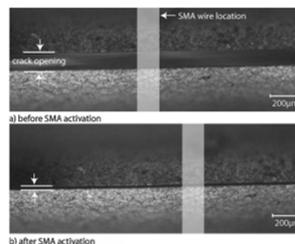
Damping (frequenza di risonanza e pseudoelasticità) e resistenza all'impatto

Electric heating

Morphing



Self-healing



Unità di Lecco

Applicazione

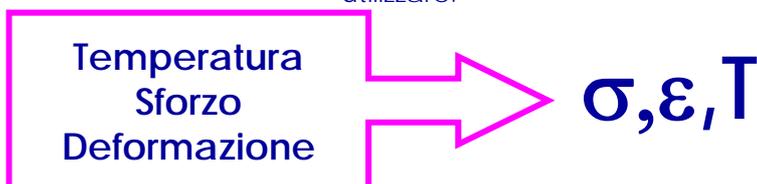
Il progettista deve prendere confidenza con parametri propri dei MMF (descrittori chiave, spazio σ, ϵ, T)

Salvo poche situazioni il materiale non ha standard di riferimento

Modellizzazione difficile

E' fondamentale sapere COSA si vuole, COME chiederlo, come CONTROLLARE che si sia ricevuto quello che si voleva.

Scelta della composizione, dello stato termomeccanico e delle caratterizzazioni da utilizzare.



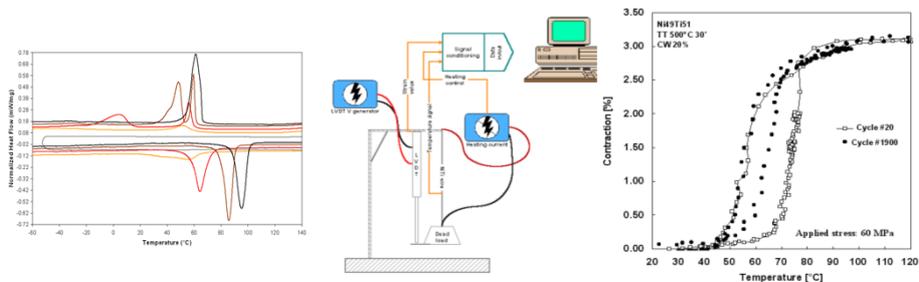
Unità di Lecco

Come caratterizzare il materiale

Analisi DSC: Temperature di transizione, verifica della microstruttura, dell'omogeneità della composizione chimica della presenza di difettosità. Consente di valutare gli effetti dei trattamenti termici e prevedere le modifiche alle proprietà meccaniche per la correlazione esistente tra le due grandezze. Meglio caratterizzare prima il materiale solubilizzato, confronto successivo con il materiale TQ (visibilità romboedrica)

Prove meccaniche: sforzi di carico e scarico, moduli, deformazione residua, Md, Prove dinamiche e Prove a fatica

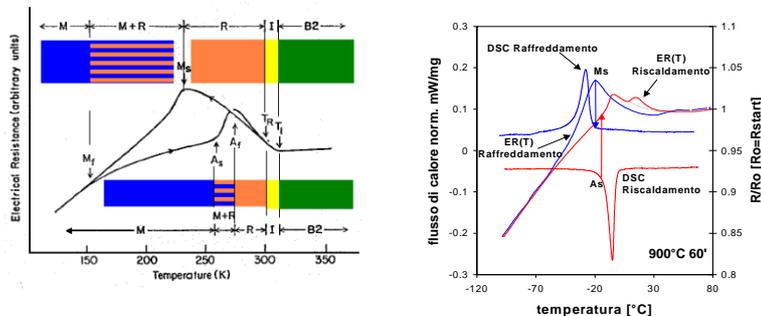
Attenzione alle velocità di test e al controllo della T. Misure di deformazione a carico costante al variare di T



Unità di Lecco

Come caratterizzare il materiale

Resistenza elettrica: misura sensibile della trasformazione.
Possibilità di eseguirla contemporaneamente ad altre misure



Analisi microscopica: SEM e ottica. Visualizzazione di impurezze, difettosità, cause di frattura

Aspetti applicativi 1

Fusione: controllo complesso della composizione e quindi delle T di trasformazione (intervallo di temperature accettabili per l'applicazione per garantire la ripetibilità, controllo della storia termomeccanica). Controllo delle impurezze

Lavorazione complessa: no grandi superfici (riscaldamento e omogeneità di attuazione)

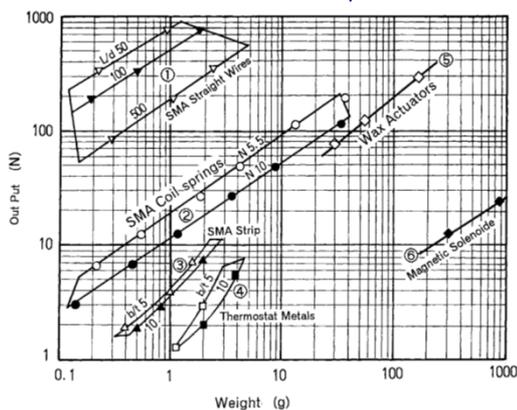
Saldatura: estremamente difficoltosa la saldatura eterologa (crimpaggio)

Verifica con prototipi: spesso necessaria, fenomeno complesso da modellizzare

Aspetti applicativi 2

Isteresi: Non corrispondenza in T tra azione e reset dell'attuatore.
Possibilità di riduzione. Fase R per alcune scelte

Attuazione: riscaldamento \rightarrow controllo delle masse
Velocità di risposta $> 10^{-3}$ s



Massima efficienza
come
microattuatori



Unità di Lecco

Aspetti applicativi 3

Fatica

Strettamente legata all'entità della deformazione e al controllo delle impurezze.

10 cicli	8%
10^2 cicli	6%
10^5 cicli	4%

No prove accelerate

Modifica delle temperature di trasformazione, delle proprietà meccaniche e funzionali (effetto due vie, ampiezza del ciclo di isteresi) legata al semplice ciclaggio termico attraverso la regione di trasformazione (Favorita la superelasticità)

Il degrado delle proprietà di recupero di forma e/o di pseudoelasticità dovute al ciclaggio sotto sforzo, a deformazione imposta o in temperatura sia all'interno che attraverso la regione di trasformazione.

Possibilità di stabilizzazione della trasformazione (TT termici sotto carico)



Unità di Lecco

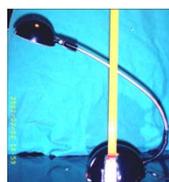
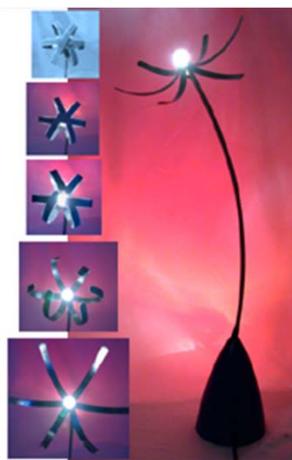
Memoria di forma a due vie

Possibilità di far recuperare al materiale un forma prestabilita non solo in riscaldamento (Austenite) ma anche in raffreddamento (Martensite), tramite particolari trattamenti termomeccanici (training)

Forze e deformazioni modeste in raffreddamento (non superano il 2%).
Migliori risultati con ARSME, variazione di curvatura di nastri sottili

Poco stabile-Difficile ripetibilità

Recupero libero



Unità di Lecco

Conclusioni

Leghe SMA : materiali funzionali
complessi ma ricchi

Necessità di approfondire gli aspetti
teorici e tecnologici

Campo ancora aperto per leghe
tradizionali, nuove leghe e compositi



Unità di Lecco