

INFLUENZA DELLA SALDATURA LASER SUL COMPORTAMENTO A MEMORIA DI FORMA A DUE VIE DI UNA LEGA NiTi

A. Falvo, F. Furgiuele, C. Maletta, R. Lucente

Nel presente lavoro è riportato lo studio del comportamento funzionale di un giunto saldato in lega NiTi a memoria di forma. In particolare, sono stati analizzati gli effetti della saldatura laser Nd:YAG sul comportamento a memoria di forma a due vie (Two Way Shape Memory Effect, TWSME) di una lega Ni- 51 at.% Ti, attraverso un confronto sistematico con i risultati relativi al materiale non saldato. Il TWSME è stato indotto nel materiale attraverso un opportuna procedura di training, che consiste nella ripetizione di cicli termomeccanici; successivamente, sono stati misurati i cicli di isteresi (temperatura-deformazione) caratteristici del TWSME. Sono stati valutati, inoltre, gli effetti del numero di cicli di training e delle deformazioni plastiche, che si generano nel materiale durante il processo di training, sul comportamento a memoria di forma del materiale. I risultati mostrano come il comportamento funzionale, e in particolare il TWSME, sia parzialmente preservato nel materiale saldato che, comunque, presenta valori di deformazioni plastiche maggiori rispetto al materiale base.

PAROLE CHIAVE: leghe a memoria di forma, memoria di forma, saldatura laser, caratterizzazione materiali

INTRODUZIONE

Le leghe a memoria di forma (Shape Memory Alloys, SMA) a base di Nickel e Titanio hanno avuto, negli ultimi anni, un crescente utilizzo nell'industria meccanica, biomedica, automobilistica e aerospaziale, grazie alle loro proprietà funzionali, quali la memoria di forma (Shape Memory Effect, SME) e la superelasticità (Superelastic effect, SE) [1-2]. Queste caratteristiche derivano dalla trasformazione martensitica termoelastica attraverso la quale il materiale passa da una fase martensitica stabile a basse temperature, $T < M_f$ (temperatura di martensite finish), ad una fase austenitica stabile ad alte temperature, $T > A_f$ (temperatura di austenite finish). La trasformazione può essere attivata tramite variazione di temperatura o, in determinate condizioni, tramite l'applicazione di un carico meccanico.

La memoria di forma a due vie (Two Way Shape Memory Effect, TWSME) è un'altra particolare proprietà grazie alla quale il materiale è capace di ricordare una forma geometrica ad alte temperature ($T > A_f$) ed una a basse temperature ($T < M_f$) [1].

Sottoponendo il materiale a cicli termici tra le temperature di trasformazione, questo è in grado di modificare la sua forma, in maniera totalmente reversibile, tra le due memorizzate. Questa proprietà, a differenza della memoria di forma e della superelasticità, intrinseche nel materiale, si ottiene solo in seguito a cicli di "training" durante i quali si genera nel materiale uno stato tensionale interno che guida, quando viene innescato il passaggio di fase, la formazione di varianti martensitiche preferenzialmente orientate. Da un punto di vista macroscopico, questo si traduce in una variazione di forma durante il riscaldamento ed il raffreddamento del materiale.

A causa della difficile lavorabilità con le comuni tecnologie, la realizzazione di componenti di geometria complessa diviene possibile solo mediante saldatura. D'altra parte, le proprietà meccaniche e funzionali delle leghe NiTi risultano fortemente influenzate dagli effetti termici e dalla contaminazione chimica associati al processo di saldatura. Un'accurata conoscenza di questi effetti, quindi, risulta essenziale al fine di realizzare componenti saldati che abbiano caratteristiche meccaniche e funzionali tali da consentirne il pratico utilizzo.

In tale ambito la saldatura laser, ed in particolare quella con sorgente Nd:YAG, risulta particolarmente appropriata per questa classe di materiali, per via della loro elevata precisione e della ridotta zona termicamente alterata (Heat Affected Zone, HAZ) [3-4].

A. Falvo, F. Furgiuele, C. Maletta

Dipartimento di Meccanica, Università della Calabria,
ponte P. Bucci cubo 44C

R. Lucente

ENEA, Centro Ricerche della Trisaia, Rotondella (MT)

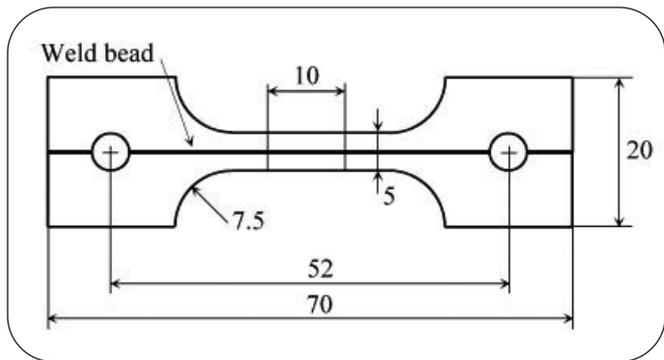


Fig. 1

Geometria e dimensioni dei provini (dimensioni in mm).
Specimen for thermo-mechanical cycle (dimensions in mm).

Negli ultimi anni molte attività di ricerca sono state indirizzate alla caratterizzazione sperimentale dei giunti saldati in lega NiTi [2-4]; in questi lavori sono stati analizzati gli effetti della saldatura sullo SME e l'SE, nonché sulle proprietà meccaniche del giunto, mentre non sono stati analizzati gli effetti della saldatura sul training del materiale e quindi sul TWSME.

L'obiettivo del presente lavoro consiste nel valutare le modificazioni indotte dalla saldatura laser Nd:YAG sul comportamento meccanico e funzionale di lamine in lega Ni-51 at.% Ti, con particolare riferimento al TWSME. Inoltre, i giunti saldati sono stati analizzati attraverso osservazioni al microscopio ottico e prove di microdurezza Vickers, al fine di valutare le modificazioni microstrutturali indotte dal processo di saldatura. Il TWSME è stato indotto, nei provini con e senza saldatura, attraverso una procedura di training, che consiste nella ripetizione di cicli termomeccanici composti da una fase di carico meccanico, una fase di scarico, un successivo riscaldamento oltre la temperatura Af e un raffreddamento al di sotto di Mf. Gli effetti indotti dalla saldatura sono stati valutati attraverso il confronto sistematico tra i risultati ottenuti dai provini con e senza saldatura.

MATERIALE ED ESPERIMENTI

Il materiale utilizzato per realizzare i provini è una lega Ni-51 %at. Ti, sotto forma di lamine con spessore di 1.15 mm e prodotte per laminazione a freddo con riduzione dello spessore del 22%. Le lamine sono state saldate attraverso un laser Nd:YAG (HAAS HL 2006 D, USA), operante in modalità continua, utilizzando i seguenti parametri: Diametro spot = 0.6 mm; Velocità di saldatura = 1.6 m/min; Potenza media = 1 kW. Al fine di evitare la contaminazione del giunto, il processo di saldatura è stato eseguito in atmosfera inerte a base di argon, utilizzando un'apposita camera di protezione [6].

Sia i provini saldati che quelli non saldati sono stati sottoposti ad un trattamento termico di 700°C per 20 min, al fine di ridurre le tensioni residue indotte dalla lavorazione a freddo e dal processo di saldatura, oltre che ottenere una completa struttura martensitica a temperatura ambiente.

I provini utilizzati per le prove meccaniche sono stati realizzati per elettroerosione, al fine di ridurre gli effetti termici e meccanici della lavorazione sulle proprietà del materiale [5]. In Fig.1 è mostrata la geometria con le relative dimensioni dei provini utilizzati, inoltre è riportato il cordone di saldatura realizzato nei provini saldati; al fine di valutare, indipendentemente dalla base di misura, il comportamento del giunto saldato, il cordone è stato realizzato coincidente con l'asse di carico del provino.

I cicli termomeccanici sono stati eseguiti utilizzando una macchina di prova materiali (Instron 8500, USA), equipaggiata con una cella di carico da 5 kN e una fornace (MTS 653, USA) per il controllo della temperatura. La deformazione locale del materiale è stata misurata utilizzando un estensometro con una base di misura di 10 mm, mentre la temperatura è stata misurata con una termocoppia di tipo J (Fe/Cu-Ni). Carico, deformazione e temperatura sono stati rilevati con continuità tramite un sistema di acquisizione composto da un personal computer, equipaggiato con una scheda National Instruments (DAQ PCI-MIO16-E-1) controllata tramite un'interfaccia sviluppata in ambiente Labview® 7.0.

La procedura di training, eseguita per indurre il TWSME nel materiale, è stata eseguita attraverso la ripetizione di opportuni cicli termomeccanici. In Fig. 2 è mostrato un esempio di ciclo di training così composto: (1) applicazione di una deformazione monoassiale (velocità di 0.06 min⁻¹) fino ad un valore $\epsilon_{tr}=3.5\%$, che è la deformazione di training; (2) scarico completo e rilievo della deformazione residua ϵ_r ; (3) riscaldamento al di sopra della temperatura di fine austenite (Af), per attivare lo SME, e rilievo della deformazione recuperata ϵ_{re} e di quella plastica ϵ_p ; (4) raffreddamento al di sotto della temperatura di fine martensite (Mf) e rilievo della deformazione legata al TWSME ϵ_{tw} .

RISULTATI E DISCUSSIONE

Caratterizzazione meccanica e trattamento termico

La Fig. 3 mostra gli effetti del trattamento termico (700 °C per 20 min), sia sul materiale base, Fig. 3a), che sul saldato, Fig. 3b), attraverso un confronto delle curve tensione deformazione, ottenute per un valore di deformazione totale $\epsilon_{tot}=3.5\%$.

La Fig. 3a) mostra come la risposta meccanica del materiale base sia fortemente influenzata dal trattamento termico. In particolare, i provini non trattati presentano un comportamento pseudoelastico, anche se lo stress plateau, caratteristico della trasformazione A?M indotta dalla tensione, non è chiaramente evidente per via dell'elevato grado di incrudimento subito durante la laminazione a freddo; in seguito al trattamento termico, il materiale assume una completa struttura martensitica, come appare evidente dalla presenza dello stress plateau relativo al meccanismo di orientamento delle varianti martensitiche, noto come detwinning [1], da cui scaturisce il com-

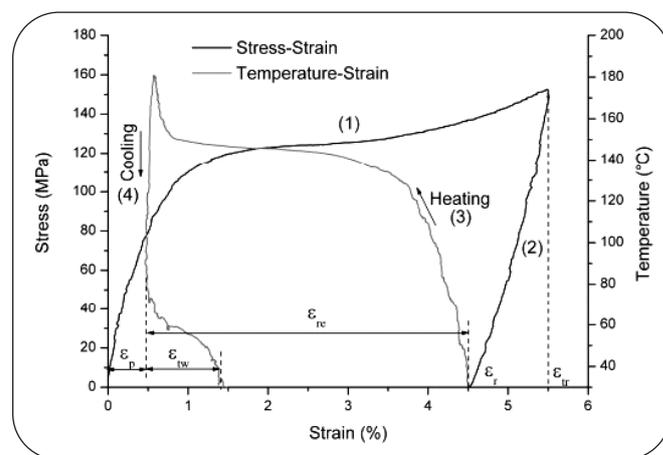


Fig. 2

Schematizzazione del ciclo termo-meccanico di training: (1) Fase di carico; (2) Fase di scarico; (3) Riscaldamento a $T > A_f$; (4) Raffreddamento a $T < M_f$.

Schematization of the training cycle: (1) Loading path; (2) Unloading path; (3) Heating to $T > A_f$; (4) Cooling to $T < M_f$.

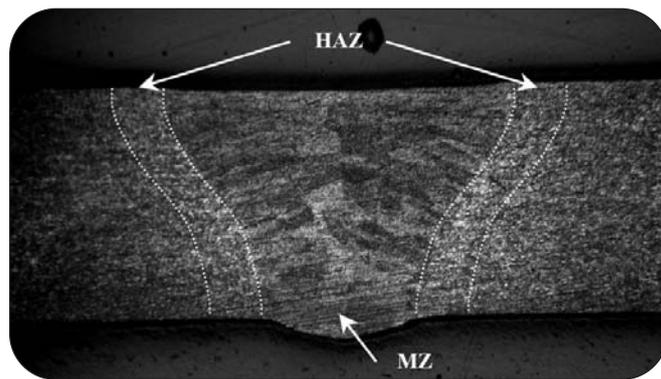
portamento a memoria di forma delle leghe NiTi.

Le curve in Fig. 3b) mostrano come il materiale saldato, sia prima che dopo il trattamento termico, presenti il tipico comportamento meccanico della struttura martensitica; pertanto, il trattamento non risulta avere grosse influenze sul comportamento meccanico del materiale se non in termini di un leggero appiattimento dello stress plateau, dovuto probabilmente ad un rilassamento delle tensioni residue generate durante il processo di saldatura.

Il confronto dei risultati mostra, inoltre, un incremento delle tensioni di detwinning tra materiale base e saldato, da 130 MPa a 220 MPa, come conseguenza delle modificazioni microstrutturali indotte dal processo di saldatura.

In Fig. 4 è mostrata una micrografia della sezione del cordone di saldatura. La figura mostra chiaramente come la zona fusa (MZ, Molten Zone), che presenta una larghezza media di 1.2 mm, sia caratterizzata da una struttura colonnare con grani di grossa dimensione, mentre la zona termicamente alterata (HAZ, Heat Affected Zone), avente una larghezza media di 0.3 mm, presenta grani di dimensione più elevata rispetto al materiale base.

Le misure di microdurezza Vickers, eseguite su una sezione trasversale del cordone utilizzando un carico di 500 g, hanno fornito un valore di 270 HV0.5 per il materiale base, di 292 HV0.5 per la zona termicamente alterata e 314 HV0.5 nella zona fusa; la maggiore durezza misurata nella zona saldata giustifica l'incremento di rigidità rilevato nei provini saldati e quindi l'aumento della tensione di detwinning.

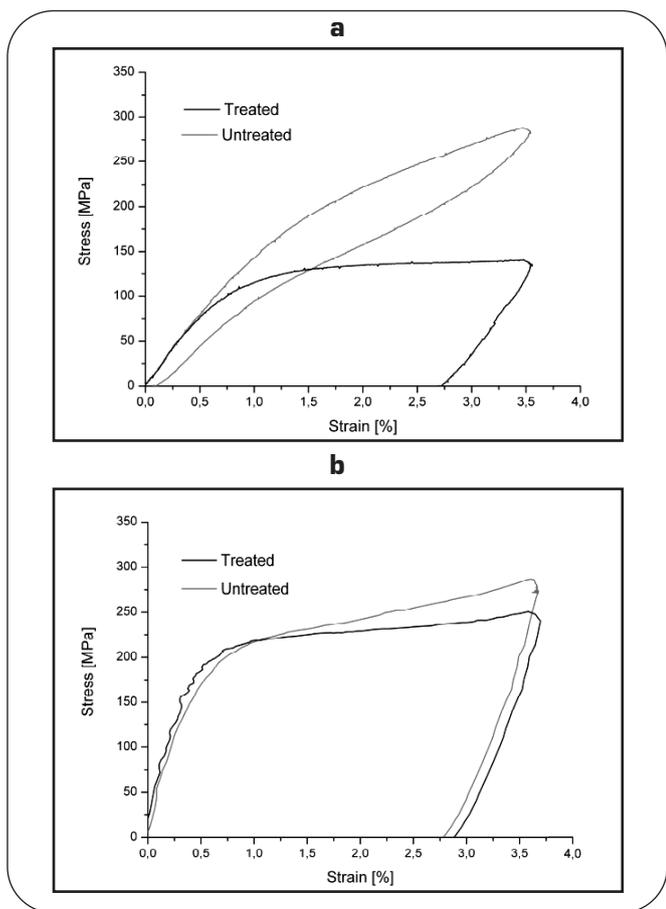


▲ Fig. 4 **Micrografia della sezione della saldatura.**
Micrograph of a weld bead transversal section.

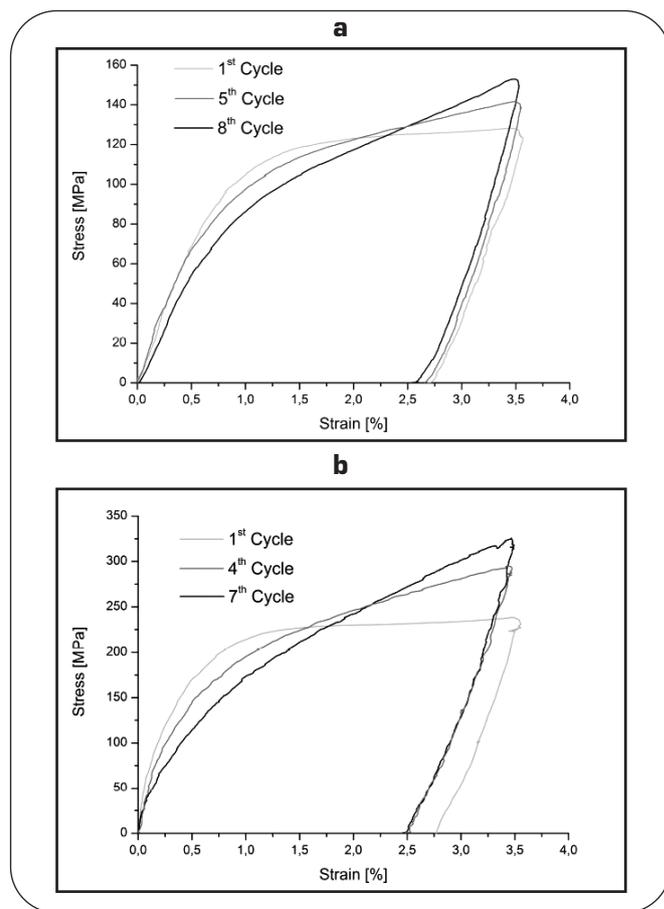
Training e TWSME

Le curve tensione-deformazione rilevate durante il training termomeccanico del materiale per una deformazione di training $\epsilon_{tr}=3.5\%$ sono riportate in Fig. 5, sia per il provino non saldato, Fig. 5a), che per quello saldato, Fig. 5b).

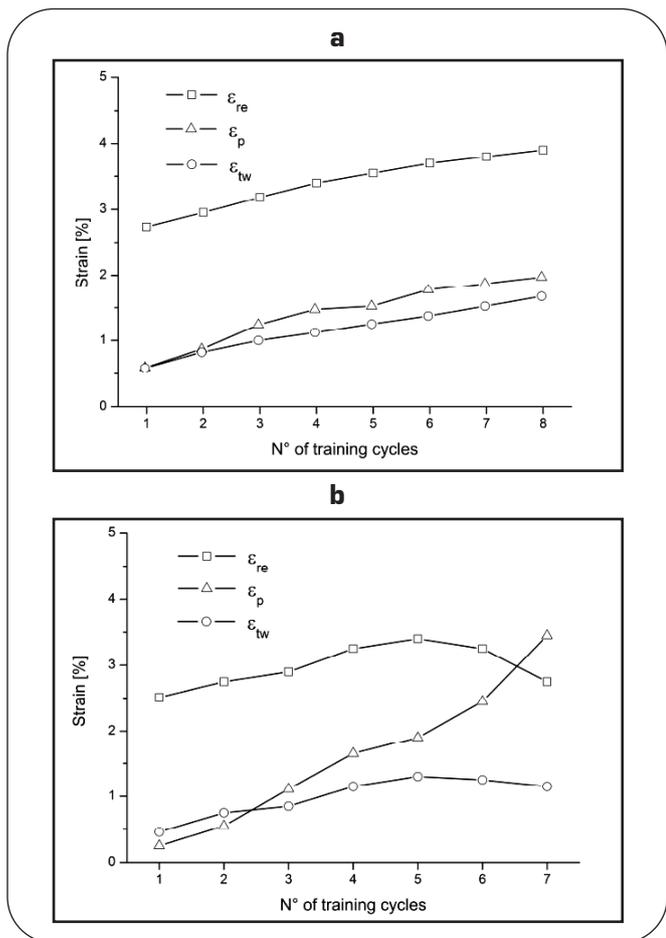
Sono stati eseguiti otto cicli di training sui provini non saldati e sette su quelli saldati, al fine di evitarne la rot-



▲ Fig. 3 **Curve tensione-deformazione prima e dopo il trattamento termico sul provino: a) non saldato; b) saldato.**
Stress strain response of the thermally treated material and untreated one: (a) base material; (b) welded material.



▲ Fig. 5 **Curve tensione-deformazione rilevate durante il training del provino: a) non saldato; b) saldato.**
Stress-strain curves during thermo-mechanical training: (a) base material; (b) welded material.



▲
Fig. 6

ϵ_{tw} , ϵ_{re} e ϵ_p in funzione del numero di cicli di training del provino: a) non saldato; b) saldato.
Two way strain (ϵ_{tw}), recovery strain (ϵ_{re}) and plastic strain (ϵ_p) versus the number of training cycles: (a) base material; (b) welded material.

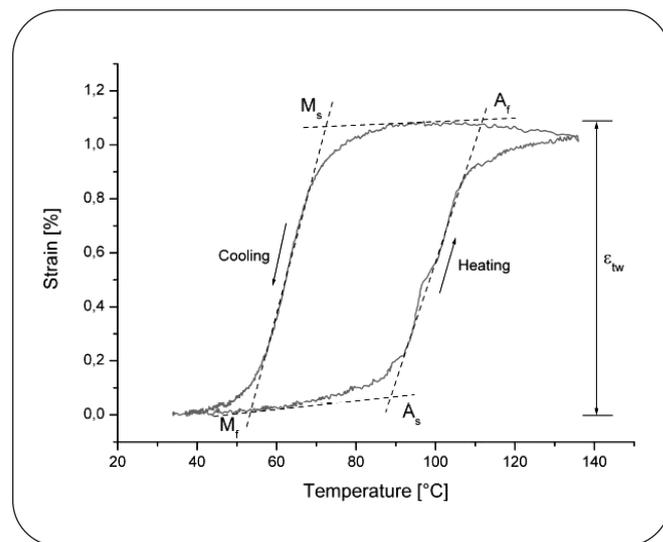
tura per via degli elevati valori di tensione e deformazione raggiunti. Nelle Fig. 5 vengono riportate le curve relative al primo, ad un intermedio e all'ultimo ciclo di training, e i risultati mostrano un comportamento simile tra il materiale base e quello saldato. In particolare, all'aumentare dei cicli di training si assiste ad un incrudimento del materiale e ad una diminuzione della tensione di detwinning, come conseguenza della progressiva stabilizzazione di varianti martensitiche preferenzialmente orientate; ad ogni ciclo si osserva una riduzione delle deformazioni legate al meccanismo di detwinning ed un corrispondente incremento delle deformazioni elastiche

della martensite orientata oltre che delle deformazioni plastiche. Dai risultati appare evidente, infine, come questi fenomeni siano più marcati nel materiale saldato, come conseguenza delle modificazioni microstrutturali indotte nel materiale dal processo di saldatura, che favoriscono lo sviluppo di deformazioni plastiche nella zona fusa. Queste osservazioni sembrano confermate dai risultati relativi

alle misure di ϵ_{tw} , ϵ_{re} e ϵ_p riportate in Fig. 6 in funzione del numero di cicli di training.

La ϵ_{tw} , come mostrato in Fig. 6 a), aumenta all'aumentare del numero di cicli di training nel materiale base, così come ϵ_{re} e ϵ_p . In particolare, ϵ_{tw} aumenta dallo 0.6% nel primo ciclo all'1.7% all'ottavo ciclo, mentre, ϵ_{re} e ϵ_p passano dal 2.7% al 3.9% e dallo 0.6% al 2%, rispettivamente. Un comportamento simile si osserva nei primi cinque cicli di training del provino saldato dove ϵ_{tw} e ϵ_{re} aumentano, dallo 0.5% all' 1.3% e dal 2.5% al 3.4% rispettivamente, per poi decrescere all'aumentare dei cicli di training, come conseguenza dell'elevato aumento della ϵ_p .

Le temperature caratteristiche di trasformazione, sia del provino non saldato che di quello saldato, riportate in Tab. 1, sono state misurate dopo il trattamento di training a partire dai cicli d'isteresi caratteristici del TWSME, utilizzando il metodo delle tangenti così come schematizzato in Fig. 7. Il materiale saldato mostra un



▲
Fig. 7

Ciclo di isteresi e misura delle temperature di trasformazione.
Hysteresis loops and measurement of the transformation temperatures.

	Mf	Ms	As	Af
Provino non saldato	50	64	80	95
Provino saldato	54	70	90	112

▲
Tab. 1

Temperature di trasformazione [°C].
Transformation temperatures [°C].

incremento sistematico in tutte le temperature caratteristiche come conseguenza delle modificazioni indotte dalla saldatura nella microstruttura del materiale. In particolare, l'aumento della dimensione dei grani, comporta un aumento dell'energia necessaria ad innescare la trasformazione e, quindi, un aumento delle temperature caratteristiche.

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono stati analizzati gli effetti della saldatura laser Nd:YAG sul comportamento meccanico e funzionale di lamine in lega Ni-51 % at.Ti. Per valutare il comportamento del giunto saldato, indipendentemente dalla base di misura, sono stati realizzati provini con il cordone coincidente con l'asse di carico. Particolare attenzione è stata rivolta alla caratterizzazione del TWSME, indotto nel materiale attraverso l'esecuzione di opportuni cicli di training. All'aumentare di questi ultimi si assiste ad un incrudimento del materiale, dovuto sia alla stabilizzazione della martensite che allo sviluppo di deformazioni plastiche, e alla diminuzione della tensione di detwinning.

Essendo il materiale policristallino, lo sviluppo di deformazioni plastiche si verifica non solo alla fine della fase elastica della martensite orientata, ma anche durante la fase di sviluppo del detwinning. Questi effetti sono più evidenti nel materiale saldato in cui il comportamento a

memoria di forma appare sensibilmente ridotto, come conseguenza delle modifiche indotte dalla saldatura nella microstruttura del materiale. Dai risultati ottenuti si può asserire che la saldatura laser Nd:YAG sia una valida tecnologia per la realizzazione di componenti in lega NiTi comportando, comunque, una sensibile riduzione nelle prestazioni funzionali rispetto ai componenti non saldati.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Schwartz, Encyclopedia of Smart Materials, John Wiley & Sons, Canada, USA, 2002, pp. 951-964.
- [2] T. Haas, A. Schuessler, in: W. van Moorleghem, P. Besselink, D. Aslanidis (Eds.), Proc. Europ. Conf. on Shape Memory and Superelasticity Technologies, SMST, Antwerp, Belgium, 1999, p. 103.
- [3] A. Tuissi, S. Besseghini, T. Ranucci, F. Squatrito, M. Pozzi, Material Science and Engineering A 273-275 (1999) 813.
- [4] A. Falvo, C. Maletta, F. M. Furgiuele, Material Science and Engineering A 412 (2005) 235-240.
- [5] W. Theisen, A. Shuermann, Material Science and Engineering A 378 (2004) 200.
- [6] A. Falvo, C. Maletta, F. Cognini, in: L. Vergani, C. Colombo, S. Foletti, M. Vimercati (Eds.), proc. XXIV Italian Conf. on Stress Analysis, AIAS, Milano, Italy, 2005. p. 169, (in Italian).

ABSTRACT

EFFECT OF LASER WELDING ON THE TWSME OF A NITI ALLOY

Keywords: shape memory alloys, shape memory effect, laser welding, material characterization

NiTi shape memory alloys (SMAs) have seen growing use in recent years for their special functional properties, namely shape memory effect (SME) and superelasticity effect (SE), which are due to the martensitic transformation and its reversion. Two-way shape memory effect (TWSME) is another particular property since the material is able to remember a geometrical shape at high temperature, above austenite finish temperature (A_f), and another shape at low temperature, below martensite finish temperature (M_f). This functional property can be induced by proper training procedures, through the repetition of thermo-mechanical cycles which produce a dislocation structure. This structure creates an anisotropic stress field which benefits the formation preferentially oriented martensite variants, resulting in a macroscopic shape change between the characteristic transformation temperatures. Due to the poor workability of NiTi alloys, suitable welding techniques must be used to obtain devices and components with complex geometries. Moreover, the

mechanical and the functional behaviour of NiTi alloys are strongly influenced by the thermal effects and chemical contamination associated with the welding process. An accurate knowledge of the modifications induced by the welding is essential to design complex shaped miniaturized parts in many branches of engineering.

In the present paper the functional behaviour of NiTi welded joints was investigated. In particular, the influence of Nd:YAG laser welding on TWSME of a Ti rich NiTi alloy was analyzed through a systematic comparison between welded and unwelded materials. The experimental investigations were carried out using Ni-51 at.% Ti sheets, 1.15mm in thickness, which were produced by cold-rolling with a thickness reduction of about 22%.

Both base and welded materials were thermally treated, at 700 °C for 20 min, in order to relax the residual stresses, generated by the cold working and welding process, and to obtain a complete martensitic structure at room temperature. Both base and welded specimens were produced according to the shape and dimensions shown in Fig. 1, by electro-discharge machining. In order to understand the effects of laser welding on the functional behaviour of the material, the welded specimens were made, as shown in Fig. 1, with a weld bead in the direction of the load axis.

The TWSME was induced through a proper training procedure,

which consists in the repetition of several thermo-mechanical cycles. In Fig. 2 an example of thermo-mechanical cycle is shown, which consists in a mechanical load, up to a training deformation, and a subsequent thermal cycle between the transformation temperatures. The effects of the number of cycles and plastic strains, which develop during the training process, were also investigated.

The welding process was executed by means of a Nd:YAG laser source (HAAS HL 2006 D, USA) operating in continuous mode, using the following parameters: spot diameter = 0.6 mm; welding rate = 1.6 m/min; average power = 1 kW. In order to avoid the oxidation of the joint the welding process was carried out in an inert argon atmosphere, by using a shielding chamber. The quality of the welded joints was analysed by microscopic observations of a weld bead transversal section, as shown in Fig. 4; the micrograph shows a general enlargement of the grain size in the welded zone and a columnar structure in the molten zone. In Fig. 5 the stress-strain curves for the first, an intermediate and last thermo-mechanical cycle, measured during the training process, are reported. Both materials show a similar behaviour: when increasing the number of

training cycles an hardening is observed, resulting in large stress level, together with a decrease in the stress for the onset of the detwinning, and this effect is more evident in the welded material. The results of the experimental measurements show that the TWSME is partially preserved in the welded material, however, as reported in Fig. 6, higher values of plastic strains, with respect to the unwelded one, are observed. In particular, the two way shape memory strain in the base material increases with increasing the number of training cycles, while the welded specimens exhibit an increase in the first five cycles and a subsequent decrease with further increasing the number of cycles, as a consequence of the strong increase in the plastic deformations. The results show that the Nd:YAG laser welding is a suitable joining technique for the realization of NiTi smart actuator; however, a reduction of the overall performance, with respect to the base material, is observed, resulting in smaller values of two way shape memory strains and higher values of plastic deformations. Further investigations could be made to study the thermal stability of the TWSME in NiTi welded joints, which are subjected to many thermal cycles.