



Full field displacement measurements of notched pseudoelastic specimens

Misure a pieno campo degli spostamenti in prossimità di intagli in leghe pseudoelastiche

L. Bruno, F. Furgiuele, C. Maletta

Department of Mechanical, Energy and Management Engineering, University of Calabria, Rende (Italy)
bruno@unical.it

ABSTRACT. Nickel-Titanium (NiTi) based shape memory alloys exhibit phase transition mechanisms and, consequently, common theories on mechanics of materials cannot be directly applied. Furthermore, local transformations near geometric discontinuities significantly affect crack formation and propagation mechanisms, under both static and cyclic loading conditions. A full field displacement measurement technique have been used in this investigation, which is based on the Digital Image Correlation (DIC) method, to analyze notched NiTi specimens. In particular, Single Edge Notch (SEN) specimens, obtained from a commercial pseudoelastic NiTi sheet, have been investigated. The localized stress-induced phase transformation mechanisms near the notch root have been analysed.

SOMMARIO. I meccanismi di trasformazione di fase nelle leghe a memoria di forma a base di Nichel e Titanio (NiTi) non permettono la diretta applicazione delle teorie della meccanica dei materiali, comunemente adottate per le tradizionali leghe metalliche. Inoltre, l'attivazione locale della trasformazione di fase modifica in maniera sostanziale i meccanismi di formazione e propagazione dei difetti, sia sotto l'azione di carichi statici che ciclici. Nel presente lavoro è stata messa a punto una tecnica a pieno campo, basata sulla correlazione digitale di immagine (DIC, Digital Image Correlation), per la misura delle deformazioni in provini in lega NiTi contenenti discontinuità geometriche. In particolare, sono stati analizzati provini contenenti intagli laterali (SEN, Single Edge Notch) ottenuti da lamine commerciali in lega NiTi. I risultati ottenuti hanno permesso di analizzare i meccanismi locali di trasformazione di fase in prossimità dell'intaglio.

KEYWORDS. Leghe NiTi; Pseudoelasticità; Correlazione Digitale di Immagine; Single Edge Notch.

INTRODUZIONE

Le leghe a memoria di forma leghe a base di nichel e titanio (NiTi) esibiscono particolari proprietà funzionali, quali la pseudoelasticità (PE, Pseudoelastic Effect) e la memoria di forma (SME, Shape Memory Effect) [1]. Tali proprietà derivano da una trasformazione di fase reversibile allo stato solido, tra le strutture austenitica e martensitica, nota come trasformazione martensitica termoelastica, che può essere attivata da variazioni di temperatura (TIM, Termally-Induced Martensire) o mediante l'applicazione di carichi meccanici (SIM, Stress-Induced Martensite). La



memoria di forma, ovvero la capacità di recuperare una forma iniziale in seguito a variazioni di temperatura (TIM), è una caratteristica delle leghe NiTi in fase martensitica; in campo ingegneristico tale proprietà viene utilizzata per la realizzazione di dispositivi e sistemi di attuazione, per il controllo adattativo delle vibrazioni, per la progettazione di compositi auto-riparanti e/o di elevata resistenza all'impatto etc. Tuttavia, le leghe NiTi riscuotono ad oggi il loro maggior successo commerciale grazie alla pseudoelasticità, ovvero grazie alle elevate capacità di recupero di deformazioni meccaniche (SIM). La pseudoelasticità è infatti sfruttata in numerose applicazioni in campo biomedicale, per la realizzazione di stent e filtri vascolari, componenti per la sutura ossea, fili ortodontici etc. Nonostante l'impiego delle leghe NiTi in campo biomedicale, spesso caratterizzato da condizioni di carico gravose, ovvero da carichi termo-meccanici ciclici e condizioni ambientali aggressive, molti aspetti legati al comportamento meccanico di tali leghe non sono ancora completamente esplorati. Infatti, i meccanismi di trasformazione di fase non permettono la diretta applicazione delle teorie della meccanica dei materiali, comunemente adottate per le tradizionali leghe metalliche. In particolare, i meccanismi di attivazione locale della trasformazione di fase, in presenza di condizioni di stato tensionale multiassiale e/o in prossimità di discontinuità geometriche, non risultano ad oggi completamente esplorati. Inoltre, le leggi costitutive implementate all'interno di software commerciali agli elementi finiti sono basate sulla teoria della plasticità, ovvero utilizzano i convenzionali criteri di snervamento, eventualmente modificati, per descrivere i meccanismi di trasformazione nelle leghe NiTi [2]. Pertanto, sebbene tali metodi numerici costituiscano utili strumenti di progettazione, il loro utilizzo deve essere sempre ben ponderato nei casi in cui si voglia studiare gli effetti locali in prossimità di zone ad elevata concentrazione delle tensioni e, di conseguenza, nell'analisi dei meccanismi di formazione e propagazione dei difetti [3-4]. In tale contesto, lo sviluppo e applicazione di tecniche a pieno campo, per l'analisi locale dei meccanismi di trasformazione in corrispondenza di discontinuità geometriche, ed in particolare all'apice di difetti acuti, appare di estremo interesse scientifico. A tale scopo, recentemente sono state applicate complesse tecniche di microdiffrazione ai raggi X [5-7] oltre che indagini termografiche [8] e tecniche di correlazione digitale di immagine (DIC, Digital Image Correlation) [9], al fine di meglio comprendere i meccanismi di trasformazione in prossimità di difetti acuti.

Obiettivo del presente lavoro consiste nella messa a punto di una tecnica a pieno campo, basata sulla correlazione digitale di immagine, per la misura degli spostamenti in provini in lega NiTi contenenti discontinuità geometriche. In particolare, sono stati analizzati provini contenenti intagli laterali (SEN, Single Edge Notch) ottenuti da lamine commerciali in lega NiTi con comportamento pseudoelastico. L'analisi dei risultati ottenuti ha permesso di comprendere meglio gli effetti delle discontinuità geometriche sui meccanismi di trasformazione di fase, oltre che di analizzare le condizioni di trasformazione in presenza di stati tensionali multiassiali.

MATERIALI ED ESPERIMENTI

Materiale

Nel presente lavoro è stata utilizzata una lamina commerciale in lega NiTi (50.8 at.% Ni – 49.2 at.% Ti, Type S, Memry, Germania) con spessore $t=0.5$ mm. In Fig. 1 è illustrata una curva tensione-deformazione (σ - ϵ) ottenuta da un ciclo di carico e scarico, in condizioni isoterme, fino ad una deformazione massima di circa il 6.2% ed alla temperatura di 298 K [10]. La figura mostra il tipico comportamento pseudoelastico della lega NiTi, che permette il recupero di elevati valori della deformazione attraverso un legame σ - ϵ di tipo isteretico. In particolare, durante la fase di carico si osserva un primo tratto di deformazione elastica della struttura austenitica (A), fino ad un livello di tensione caratteristico (σ_s^{AM}) e, successivamente, un tratto quasi piatto, corrispondente alla trasformazione di fase tra austenite e martensite (A \rightarrow M). Tale trasformazione genera una deformazione reversibile ϵ_L . Un ulteriore aumento della tensione oltre il valore caratteristico (σ_f^{AM}) provoca prima la deformazione elastica della struttura martensitica (M) e, successivamente, la plasticizzazione e la rottura del materiale. In fase di scarico, si verifica la trasformazione inversa tra martensite ed austenite (M \rightarrow A), tra le tensioni caratteristiche σ_s^{MA} e σ_f^{MA} , che permette il recupero nominalmente completo della deformazione ϵ_L . Nella figura sono anche riportati i valori dei principali parametri termo-meccanici della lega misurati in un precedente lavoro [10].

Le indagini DIC sono state condotte analizzando provini contenenti intagli laterali (SEN, Single Edge Notch), ottenuti mediante taglio per elettroerosione (Fig. 2). Tale tecnica ha permesso di ottenere un raggio di fondo intaglio di circa 100 μ m e, rispetto alle comuni tecnologie di lavorazione, riduce in maniera significativa la formazione di zone termo-meccanicamente alterate che modificherebbero in maniera significativa i meccanismi locali di trasformazione di fase. Inoltre, la superficie dei campioni è stata preliminarmente trattata mediante micro sabbatura, effettuata utilizzando

particelle di allumina con diametro variabile tra 25 e 70 μm , al fine di ottenere una morfologia superficiale idonea alle successive analisi delle deformazioni mediante il metodo della correlazione digitale di immagine.

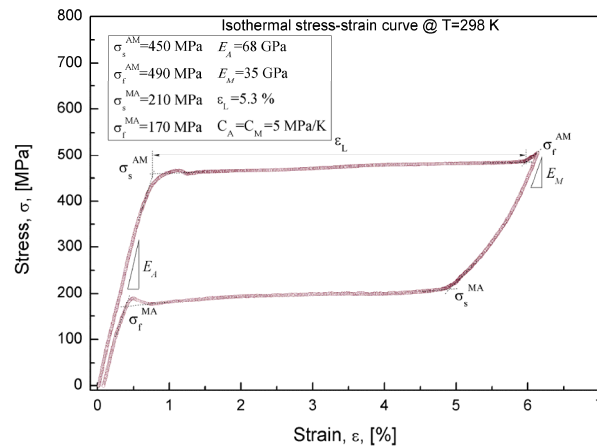


Figura 1: Curva tensione-deformazione della lega analizzata ottenuta da un ciclo di carico e scarico complete [FFEMS].

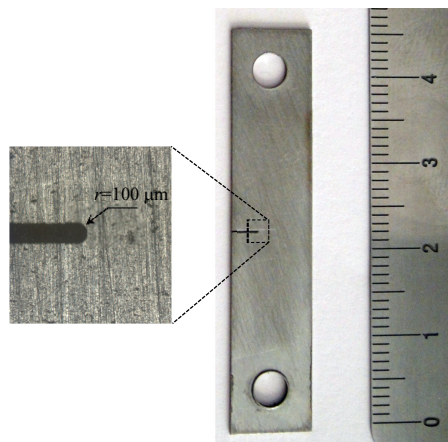


Figura 2: Immagine del provino intagliato (SEN, Single Edge Notch) con particolare del raggio di fondo intaglio

Setup sperimentale

L'apparato sperimentale, riportato in Fig. 3, utilizzato per la conduzione delle prove è costituito da due bracci identici, azionati separatamente mediante attuatori lineari, con una capacità di carico assiale di 1200 N; questi ultimi consistono in un motore elettrico ed un accoppiamento ruota elicoidale/vite senza fine che trasforma la rotazione del motore in moto di traslazione. Gli attuatori, montati ortogonalmente all'asse di carico, agiscono su una leva che, allo stesso tempo, amplifica il carico e deamplifica lo spostamento di un fattore circa pari a 12. Tale soluzione costruttiva risulta particolarmente adatta per la determinazione del campo di spostamento mediante tecniche a pieno campo, quando eventuali moti rigidi deteriorano la qualità delle misure, come nel caso delle tecniche interferometriche, o, come nel caso delle tecniche di correlazione, quando grandi spostamenti aumentano la complessità di calcolo o, addirittura, portano fuori dall'area inquadrata i punti di interesse. Il provino è montato mediante appositi sistemi cinematici capaci di annullare eventuali sollecitazioni spurie differenti dalla trazione. Il carico è misurato con una cella di carico HBM, modello U9B con fondoscala a 10 kN e sensibilità di 1 mV/V. Il campo di spostamento è stato misurato con una tecnica DIC bidimensionale, elaborando le immagini acquisite mediante un microscopio ottico realizzato *ad-hoc*, con attrezzatura optomeccanica modulare della Qioptiq. L'illuminazione è stata ottenuta mediante lo schema ottico alla Köhler, utilizzando come sorgente luminosa un LED della CREE quadrato di lato 3.3 mm. La telecamera (Sony modello XCD-X910) ha un sensore CCD da 1280x960 pixel quadrati di lato 4.65 μm . La focalizzazione delle immagini è stata effettuata mediante un obiettivo da microscopio della Linos Photonics con un ingrandimento 4x e un'apertura numerica di 0.1, il quale assicura, in condizioni di corretta illuminazione, una risoluzione pari a circa 2.5 μm , e quindi inferiore alla dimensione del pixel della telecamera.

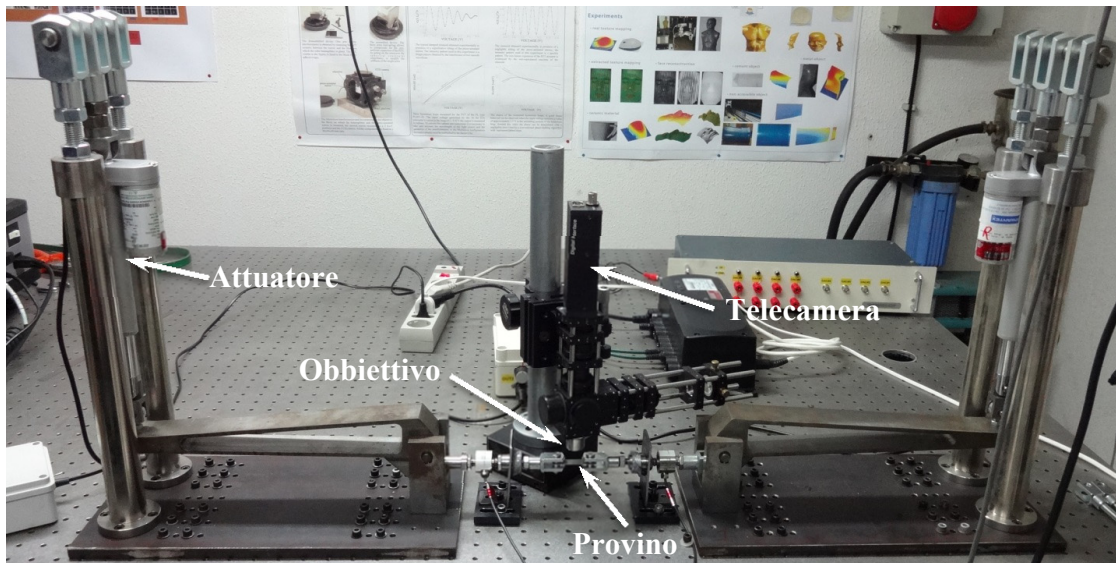


Figura 3: Setup sperimentale utilizzato per le prove meccaniche e per la misura degli spostamenti mediante la tecnica DIC.

RESULTATI E DISCUSSIONI

Le prove sperimentali sono state effettuate mediante cicli di carico e scarico completi tra 0 e 700 N, a passi intermedi di 50 N per l'acquisizione digitale delle immagini. In Fig. 4 è illustrata una micrografia della zona prossima all'intaglio del provino SEN, ottenuta mediante il sistema di acquisizione descritto nella sezione precedente, unitamente ad una maglia di riferimento della regione di interesse. In particolare, la figura mostra la maglia indeformata (colore ciano), di dimensioni $581 \times 1040 \mu\text{m}^2$, unitamente ad una configurazione deformata opportunamente amplificata (colore rosso), corrispondente al carico massimo di 700 N. Una prima analisi qualitativa della configurazione deformata appare compatibile con le condizioni di carico e mostra, come atteso, spostamenti pressoché simmetrici rispetto alla mezzeria del campione, come conseguenza di una adeguata messa a punto del setup sperimentale, ovvero di un buon allineamento dei carichi e di una corretta procedura di eliminazione dei moti rigidi. Tale osservazione qualitativa appare confermata dai risultati illustrati in Fig. 5, che mostra le mappe degli spostamenti orizzontali u_x (Fig. 5.a) e verticali u_y (Fig. 5.b). In particolare, la mappa degli spostamenti verticali assume una configurazione pressoché simmetrica con valori massimi di circa $10 \mu\text{m}$.

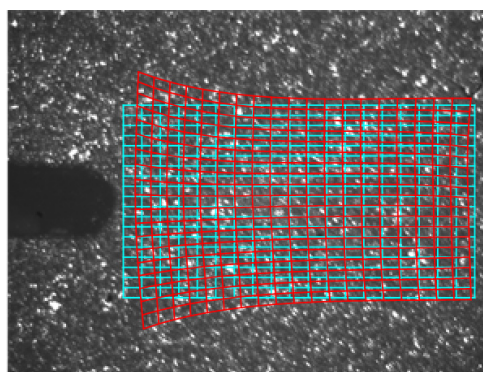


Figura 4: Micrografia della zona prossima all'intaglio del provino SEN e griglia indeformata (ciano) e deformata (rosso).

In Fig. 6 sono illustrate le mappe delle componenti di deformazione nel piano, ottenute dal campo di spostamenti mediante le note relazioni di congruenza, ovvero le componenti normali ϵ_x (Fig. 6.a) ed ϵ_y (Fig. 6.b) e la componente tangenziale γ_{xy} (Fig. 6.c). Come atteso, considerate le caratteristiche di pseudoelasticità della lega, si osservano elevati valori

della deformazione, con valori massimi di ϵ_y dell'ordine del 5% in prossimità dell'intaglio. Come mostrato in Fig. 1, tali valori indicano una trasformazione di fase pressoché completa, come conseguenza degli elevati gradienti tensionali.

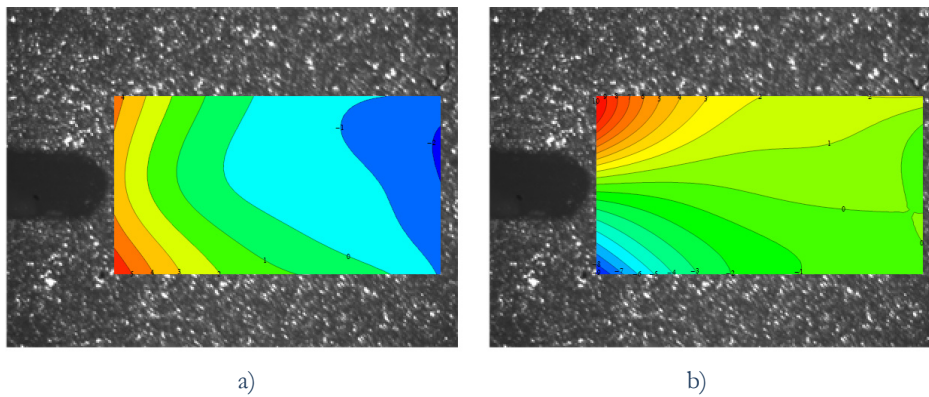


Figura 5: Mappa degli spostamenti al carico $P=700$ N: (a) spostamenti orizzontali u_x e (b) spostamenti verticali u_y .

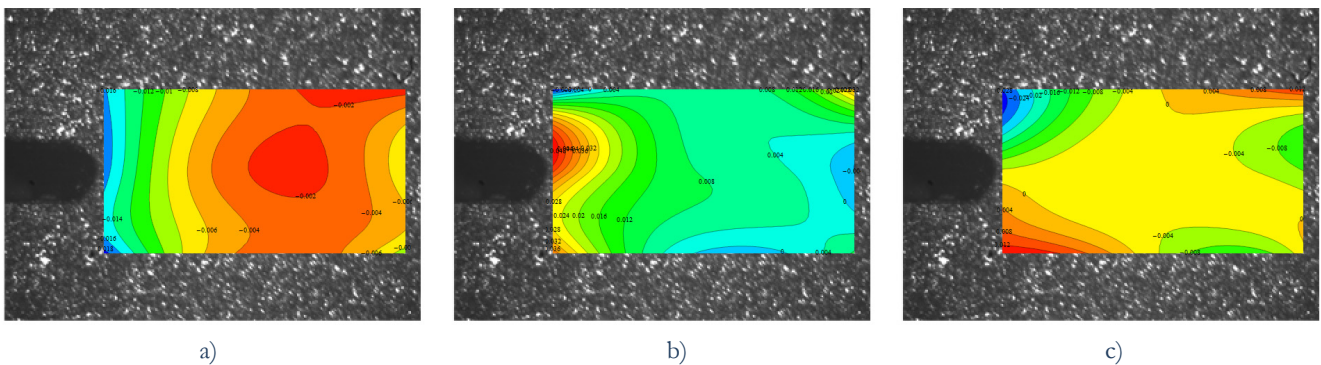


Figura 6: Mappa delle deformazioni al carico $P=700$ N: (a) deformazione normale ϵ_{xx} , (b) deformazione normale ϵ_{yy} e (c) deformazione tangenziale γ_{xy} .

Il comportamento isteretico del materiale in prossimità dell'intaglio, legato alla trasformazione di fase martensitica, è stato analizzato mediante il confronto delle mappe di deformazione ottenute nelle fasi di carico e scarico, per gli stessi valori del carico applicato. A titolo di esempio le mappe in Fig. 7 mostrano le differenze della componente di deformazione normale ϵ_y per tre differenti valori del carico applicato ($P=600$ N in Fig. 7.a, $P=400$ N in Fig. 7.b e $P=100$ N in Fig. 7.c). In particolare, si osservano differenze massime della deformazione ϵ_y , in prossimità dell'intaglio, pari a circa 0.8 %, 1.4 % e 0.2 % per i tre livelli di carico, $P=600$ N, $P=400$ N e $P=100$ N, rispettivamente.

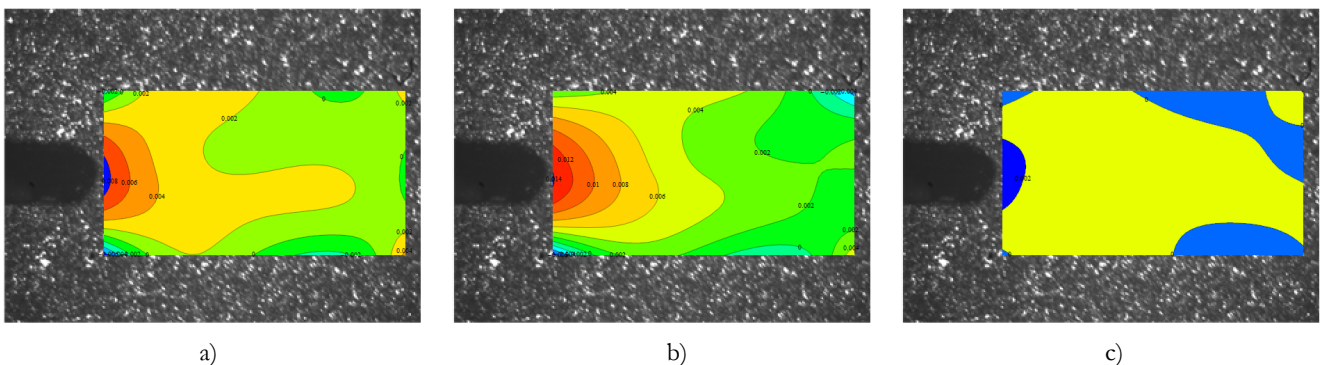


Figura 7: Differenza della componente di deformazione normale ϵ_y tra le fasi di carico e scarico: (a) $P=600$ N, (b) $P=400$ N e (c) $P=100$ N.



In Fig. 8 è illustrato un ciclo di isteresi carico-deformazione locale (P - ϵ), ottenuto da un ciclo completo di carico e scarico, in un punto in prossimità dell'intaglio. La figura mostra anche l'ampiezza dell'isteresi misurata ai tre differenti valori del carico di Fig. 7. E' importante osservare che mentre i valori di deformazione sono misurati localmente, il carico applicato rappresenta una grandezza non locale e, pertanto, un confronto diretto con la curva σ - ϵ monoassiale di Fig. 1 non può essere effettuato. Pur tuttavia, i valori di deformazione misurati possono essere utilizzati per stimare la frazione martensitica indotta dallo stato tensionale in prossimità dell'intaglio. Tale attività sarà oggetto di lavori futuri.

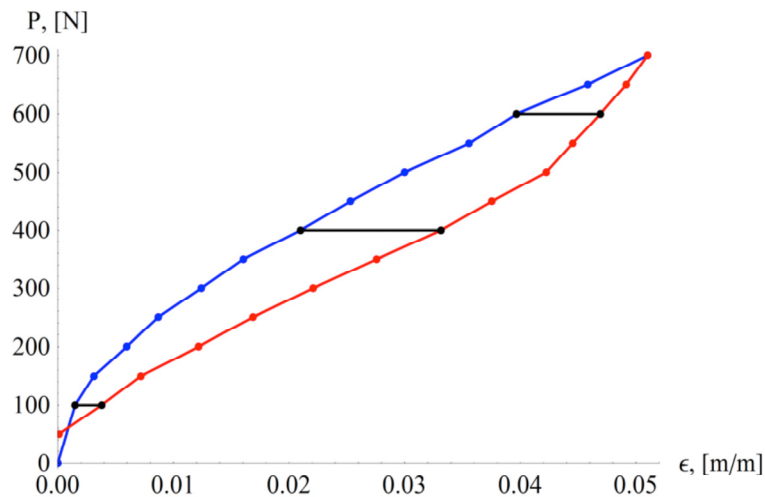


Figura 8: Comportamento isteretico P - ϵ misurato in prossimità dell'apice dell'intaglio.

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stata messa a punto una tecnica a pieno campo, basata sulla correlazione digitale di immagine (DIC, Digital Image Correlation), per la misura degli spostamenti in prossimità di un intaglio in una lega Nichel-Titanio. Tale studio assume particolare interesse, in quanto i meccanismi di trasformazione di fase di tali leghe non permettono la diretta applicazione delle teorie della meccanica dei materiali, comunemente adottate per le tradizionali leghe metalliche. In particolare, sono stati utilizzati provini contenenti intagli laterali (SEN, Single Edge Notch), ottenuti mediante taglio per elettroerosione da lamine commerciali in lega NiTi con comportamento pseudoelastico. Dalle misure di spostamento effettuate è stato possibile ricavare il campo di deformazioni in prossimità dell'intaglio e, conseguentemente, analizzare qualitativamente i meccanismi di trasformazione indotti localmente, per effetto degli elevati livelli locali di tensione. Inoltre, l'applicazione di cicli di carico e scarico completi ha permesso di valutare il comportamento isteretico locale della lega. La tecnica sviluppata potrà essere utilizzata per l'analisi sistematica di differenti tipologie di discontinuità geometriche nelle leghe NiTi, oltre che per lo studio dei meccanismi di formazione e propagazione di difetti acuti, sia sotto l'azione di carichi statici che ciclici.

BIBLIOGRAFIA

- [1] K. Otsuka, C.M. Wayman, Shape Memory Materials, Cambridge University Press, Cambridge (1998).
- [2] A. Paiva, M.A. Savi, Math. Probl. Eng., (2006) 56876.
- [3] C. Maletta, F. Furgiuele, Acta Mater., 58 (2010) 92.
- [4] C. Maletta, F. Furgiuele, Int. J. Solids Struct., 48 (11-12) (2011) 1658.
- [5] M.R. Daymond, M.L. Young, J.D. Almer, D.C. Dunand, Acta Mater., 55 (2007) 3942.
- [6] S.W. Robertson, A. Mehta, A.R. Pelton, R.O. Ritchie, Acta Mater., 55(18) (2007) 6207.
- [7] S. Gollerthan, M.L. Young, A. Baruj, J. Frenzel, W.W. Schmahl, G. Eggeler, 57(4) (2009) 1025.
- [8] S. Gollerthan, M.L. Young, K. Neuking, U. Ramamurty, G. Eggeler, 57(19) (2009) 5897.
- [9] S. Daly, A. Miller, G. Ravichandran, K. Bhattacharya, Acta Mater., 55 (2007) 6330.
- [10] C. Maletta, E. Sgambitterra, F. Furgiuele, Fatigue Fract. Eng M. (2013) Article in Press