



Fatigue damage evaluation of martensitic stainless steel by means of thermal methods

Valutazione del danneggiamento a fatica di acciai inossidabili martensitici mediante metodi termici

U. Galietti, D. Palumbo, R. De Finis, F. Ancona

Dipartimento di Meccanica, Matematica e Management, Politecnico di Bari, Viale Japigia 182, 70126, Bari

ABSTRACT. In this work a fatigue damage evaluation of martensitic steels was performed by means of thermal methods. The stainless steel analyzed was ASTM A182 grade F6NM, a martensitic steel with low carbon content. In addition to the corrosion resistance, very important is the fatigue behavior of this material considering structural applications in offshore platforms and for the valve bodies and pumps for energy production.

Classical methods for evaluating the fatigue limit require very time consuming tests, so accelerated methods for analyzing the fatigue behaviour of materials are of great interest.

The aim of this study is the evaluation of the fatigue limit of martensitic stainless steel with thermal methods based on temperature surface monitoring and phase variation of thermographic signal.

During fatigue tests the temperature trend allows to detect when the plastic deformations occur in the material because high temperature value are measured. The thermal methods present in literature are based on the monitoring of the temperature that provides the fatigue limit through a statistical approach that can cause some problem with materials characterized by a high coefficient of thermal conductivity such as aluminum. Moreover, temperature, depends of the amplitude stress, of the test frequency, of the specimen geometry and environmental conditions that affect the heat exchange conditions between the specimen and the environment.

In this work was used the Thermoelastic Stress Analysis (TSA) to evaluate the thermoelastic sources and the new approach based on the thermoelastic phase signal (TPA: Thermographic Phase Analysis) was used to evaluate plastic behavior of the material. Thermoelastic stress analysis provides a signal S proportional to the peak-to-peak variation in temperature during the variation peak to peak of the sum of principal stress $\Delta\sigma$, so for an isotropic material, in linear elastic and local adiabatic conditions, is possible to link surface temperature variation with the variation of the trace of stress tensor for a plane stress state.

The loss of adiabatic conditions are due to the presence of heat generation due to the high gradient stress or local plasticity due to dissipative sources. When this conditions occur, the classical thermoelastic equation can't be used to assess the stress field on the surface of materials. Nevertheless, the evaluation of these phenomena that arise with the heat conduction can be performed by means the thermoelastic phase signal. In this case a phase shift occurs in thermographic signal that can be used to monitor the fatigue damage occurring in the material and evaluate the fatigue limit.

The experimental setup provide an hydraulic loading machine, three infrared cameras (one in front of load machine and two back of this one), an insulated wooden case preserving environmental influences around loading zone. In this case only the data obtained from two thermocamera will be shown in particular, the thermoelastic data have been acquired via the differential IR camera DeltaTherm 1560 (thermal sensitivity (NETD) < 18 mK) and based on a InSb photonic detector with 320×256 pixels while thermographic data have been acquired with Flir A20 (detector 160×140).



The “dog bone” specimens (sized according to ASTM E 466-96) were sprayed with flat black spray, in order to ensure high emissivity, it also marked with two lines on spray, at a fixed measured distance, assuring fix reference for analysis. For good measurement of the specimen surface temperature and to avoid influences from environmental conditions, the specimen was enclosed in a wood chamber. A painted unloaded aluminium plate was used as a black body to obtain a temperature reference inside the wood chamber.

The specimen was subjected to cyclic loads with gradual variation of load increment and a load frequency equal to 17 Hz. Each step was 20000 cycles long in order to obtain the temperature stabilization. At the end of each step load machine was stopped and the load was incremented.

The set up system was not adiabatic, since a continuous heat flow, generated by the hotter actuator in lower side of the loading machine, determined the presence of the thermal gradient. For this reason and also in order to improve the signal to noise ratio, all data were processed with a new procedures.

During the entire test the damage growth can be monitored. Monitoring for each step, characterised by a specific $\Delta\sigma$, an area on the gauge length the values of ΔT_{max} and $\Delta\Phi$ were obtained. The ΔT values were obtained subtracting the highest temperature that occurs during the considered fatigue step with the initial temperature measured at the start of the same step. The $\Delta\Phi$ values were obtained subtracting the maximum phase value with the minimum phase value for each step.

Associating the temperature and phase variation at the stress amplitude value adopted for each step a new method based on statistical analysis of temperature and phase data was proposed to evaluate the fatigue limit of material. The proposed method allows to obtain the fatigue limit in automatic mode.

SOMMARIO. Gli acciai inox martensitici presentano buona resistenza alla corrosione e possiedono elevate caratteristiche meccaniche per la presenza della fase martensitica a temperatura ambiente. Per questa classe di materiali quindi, è molto importante conoscere oltre alla resistenza a corrosione, il limite di fatica, visto il largo utilizzo in una grande varietà di applicazioni strutturali .

Oggetto di questo lavoro è l'analisi del comportamento a fatica e la determinazione del limite di fatica di acciai inossidabili martensitici utilizzando metodi termici basati sul rilevamento della temperatura superficiale e sulla variazione di fase del segnale termoelastico. I risultati ottenuti sono stati confrontati con il metodo classico Stair-Case. Il materiale analizzato è l'ASTM A182 grado F6NM.

Monitorando una prova a fatica con una termocamera ad infrarossi è possibile rilevare un aumento della temperatura del provino nel momento in cui inizia ad essere presente una deformazione plastica; questo aumento di temperatura è legato a diversi fattori: l'ampiezza del carico, la frequenza di carico, la geometria del provino, le condizioni ambientali e possibili scambi termici con l'ambiente. In questo lavoro è stato utilizzato un approccio innovativo per la determinazione del limite di fatica basato sull'analisi statistica dei dati provenienti dalle prove termoelastiche (metodo TPA).

Il metodo TPA (Thermographic Phase Analysis) è basato sull'analisi del segnale termoelastico; durante una prova a fatica in condizioni adiabatiche il segnale termoelastico è proporzionale alla variazione picco-picco della temperatura legato alla variazione picco-picco della somma delle tensioni principali. La perdita delle condizioni adiabatiche è dovuta alla presenza di gradienti di stress elevati o in presenza di plasticizzazioni locali. L'insorgere di plasticizzazioni nel materiale genera una variazione della fase del segnale termoelastico. Dall'analisi della variazione di questo segnale è possibile valutare il danneggiamento e quindi il limite di fatica.

KEYWORDS. Martensitic steel; Thermoelastic stress analysis; Phase signal; Fatigue limit.

INTRODUZIONE

Gli acciai inox martensitici presentano buona resistenza alla corrosione, anche se in misura minore rispetto ad altre classi di acciai inox e possiedono elevate caratteristiche meccaniche per la presenza della fase martensitica a temperatura ambiente. Per questa classe di materiali quindi risulta essere molto importante conoscere, oltre la



resistenza a corrosione, il limite di fatica, visto il largo utilizzo in applicazioni strutturali in piattaforme offshore, per i corpi valvola e le pompe nel settore energetico, palette di turbine, parti di valvole, componenti per l'industria estrattiva, cuscinetti.

Negli ultimi anni vari autori [1-5] hanno mostrato come il danneggiamento a fatica possa essere studiato attraverso la valutazione delle sorgenti termiche legate al comportamento meccanico del materiale durante un test di fatica. In particolare l'instaurarsi di sorgenti dissipative irreversibili è dovuto a fenomeni di deformazione plastica del materiale che sono legati al danneggiamento del materiale.

L'analisi della temperatura superficiale in funzione delle condizioni di carico, permette di ricavare attraverso delle procedure [1-5] il limite di fatica del materiale in tempi molto più brevi e con una quantità di materiale molto più bassa rispetto alle prove di fatica tradizionali con enormi vantaggi in termini di costi.

Tali procedure, legate alla temperatura, riscontrano qualche difficoltà nel caso si vogliano analizzare materiali ad elevata diffusività termica come ad esempio l'alluminio. Infatti in tali casi, il danneggiamento del materiale non è legato ad un aumento significativo di temperatura. Per questo oltre all'utilizzo di termocamere performanti, sono necessarie procedure di filtraggio del segnale termografico in modo da poter applicare con successo le procedure presenti in letteratura [6, 7, 8]. Discorso analogo va fatto nel caso di vogliono analizzare componenti meccanici più complessi come i giunti saldati. In questo caso i meccanismi di rottura sono differenti rispetto a ciò che accade con i materiali base in quanto questi sono dovuti alla propagazione di cricche generate dal processo di saldatura. Si hanno quindi sorgenti termiche confinate in piccole aree del materiale e che quindi dissipano calore molto velocemente verso le zone a più bassa temperatura e non danneggiate.

In questo lavoro si è utilizzata la Tecnica Termoelastica di Analisi delle Sollecitazioni per valutare il danneggiamento a fatica dei materiali e più precisamente il segnale di fase termoelastico. Durante una prova a fatica in condizioni adiabatiche, la sorgente termoelastica è proporzionale alla variazione picco-picco della temperatura legata alla variazione picco-picco della somma delle tensioni principali [9-11]. La presenza di elevati gradienti di stress o di plasticizzazioni locali comporta la perdita delle condizioni adiabatiche che corrisponde ad una variazione della fase del segnale termoelastico [12-15]. Per quanto detto, dall'analisi della variazione del segnale di fase è possibile valutare il danneggiamento e quindi il limite di fatica.

In questo lavoro il materiale analizzato è l'ASTM A182 grado F6NM, con basso tenore di carbonio. Durante le prove sono state fatte sia rilevazioni termografiche che rilevazioni termoelastiche in modo da ricavare sia i dati di temperatura che quelli di fase. Sono state proposte due procedure per l'analisi dei dati di temperatura e di fase ed è stato proposto un nuovo metodo basato su considerazioni statistiche per la valutazione del limite di fatica del materiale.

TEORIA

I materiali metallici durante prove di fatica mostrano un riscaldamento caratteristico legato direttamente al danneggiamento del materiale. In altri lavori [7] si è dimostrato come la valutazione del danneggiamento fornisce una chiara indicazione della posizione del difetto. Lavori recenti hanno mostrato che la temperatura non è direttamente correlabile al danneggiamento a fatica in quanto quest'ultima dipende dall'ampiezza della sollecitazione applicata, dalla frequenza di carico, dalla geometria del provino e dalle condizioni ambiente che influiscono lo scambio termico tra il provino e l'ambiente [16].

Nel modello termomeccanico proposto da Morabito *et. al* [7] e Chrysodhoos *et. al* [17] lo stato di equilibrio di ogni volume di materiale è descritto da un set di n variabili: la temperatura assoluta T , un tensore delle deformazioni ε ed un vettore di $n-2$ elementi a che rappresentano la variabili interne di stato che descrivono, a livello macroscopico, fenomeni microstrutturali complessi e spesso accoppiati.

Combinando il primo ed il secondo principio della termodinamica, l'equazione locale di conduzione del calore può essere scritta come:

$$\rho C_{\varepsilon,a} \dot{T} - \text{div}(k \text{grad} T) = d_1 + T \sigma_{,T}^r : \dot{\varepsilon} + T A_{,T} \cdot \dot{a} + r_{\text{ext}} \quad (1)$$

dove ρ è la densità, $C_{\varepsilon,a}$ il calore specifico a deformazione e a costanti, k il tensore conducibilità termica, σ è la parte reversibile del tensore degli stress e A è il vettore che raccoglie le variabili coniugate associate con le variabili interne di stato.

d_1 è quella parte di potenza termica che diventa calore in modo irreversibile in presenza di fenomeni plastici, viscoplastici e danneggiamenti a fatica. Il secondo termine rappresenta le sorgenti di accoppiamento termoelastiche, il termine successivo rappresenta le altre sorgenti di accoppiamento interno mentre r_{ext} è la sorgente volumica esterna.



Dopo varie ipotesi [7] l'equazione locale di calore può essere riscritta nella forma semplificata:

$$\rho C_{\varepsilon, \alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} - k \Delta \theta = d_1 + s_{the} \quad (2)$$

dove θ è la temperatura ottenuta sottraendo alla temperatura registrata durante la prova di fatica, una temperatura di riferimento [18].

L'Eq. (2) è usata per valutare separatamente le sorgenti di accoppiamento dissipative e termoelastiche attraverso la stima dei membri nella parte sinistra dell'eq. (2). Per alcuni materiali come le leghe di alluminio non è semplice valutare le sorgenti dissipative a causa del basso rapporto segnale-rumore [7].

In questo lavoro sarà utilizzata la Tecnica Termoelastica di Analisi delle Sollecitazioni per valutare le sorgenti termoelastiche ed un nuovo approccio basato sull'analisi del segnale termoelastico di fase sarà utilizzato per la valutazione del comportamento plastico del materiale.

La TSA fornisce un segnale S proporzionale alla variazione picco-picco di temperatura durante la variazione picco-picco della somma degli stress principali $\Delta \sigma$ [9, 11].

Per un materiale isotropico in condizioni lineari elastiche e in condizioni adiabatiche, nel caso di stress monodimensionale e di carico sinusoidale, l'equazione che lega la variazione di temperatura allo stress [10, 19] è:

$$\rho C_{\varepsilon} \frac{\delta T}{T} = - \left(\alpha - \frac{1}{E^2} \frac{\partial E}{\partial T} \sigma_m \right) \Delta \sigma \sin \omega t - \frac{1}{4E^2} \frac{\partial E}{\partial T} (\Delta \sigma)^2 \cos 2\omega t \quad (3)$$

dove C_{ε} è il calore specifico a deformazione costante, E è il modulo di Young, α è il coefficiente di espansione termica lineare, σ_m e $\Delta \sigma$ sono lo stress medio e l'ampiezza di stress e ω è la frequenza di carico.

L'Eq. (3) mostra come la risposta termica di un solido soggetto ad un carico sinusoidale è data dalla somma di due termini. Il primo a pulsazione ω come la frequenza di carico, è funzione sia dell'ampiezza di stress che dello stress medio mentre il secondo termine ha pulsazione pari a 2ω [10], [19], [20].

Trascurando le variazioni del modulo di Young E e del rapporto di Poisson ν con la temperatura ed esprimendo il calore specifico a deformazione costante in termini di calore specifico a pressione costante si ottiene la relazione semplificata che lega la variazione di temperatura alla traccia del tensore degli stress [11]:

$$\Delta T = -K T (\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2) \quad (4)$$

con K costante termoelastica del materiale espressa come $K = \alpha / (\rho^* C_p)$ dove C_p è il calore specifico a pressione costante. Sostituendo il termine termoelastico nell'Eq. (2) ed in assenza di termini dissipativi, si ottiene la relazione [21]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{1}{\rho C_p} \left(\alpha T \frac{\partial \sigma_1}{\partial t} - k \Delta \theta \right) \quad (5)$$

dove σ_1 è il primo invariante delle tensioni principali.

L'Eq. (5) mostra come il trasferimento di calore dipende da tre quantità: il gradiente di temperatura (termine $\Delta \theta$), la conducibilità termica del materiale (termine k) e la frequenza di carico (termine $\partial \sigma_1 / \partial t$) [21]. Le condizioni adiabatiche sono rispettate se il gradiente di temperatura è nullo, se la conducibilità termica è molto bassa e nel caso di frequenza di carico elevata.

La perdita delle condizioni adiabatiche è dovuta alla presenza di alti gradienti di stress o a condizioni di plasticità locale che provocano conduzione di calore all'interno del materiale [12, 13]. In queste condizioni l'equazione classica termoelastica non può essere usata per valutare il campo di stress dalle misure di temperatura superficiale. Tuttavia la tecnica termoelastica può essere ancora usata per valutare i fenomeni dissipativi mediante lo studio del segnale di fase.

Un segnale di riferimento fornito da una cella di carico o da un estensimetro sul provino è utilizzato per filtrare il segnale termografico per mezzo di un'unità lock-in amplifier. Il segnale termoelastico ed il segnale di riferimento possono essere rappresentati come due vettori che ruotano alla stessa velocità (stessa frequenza) sfasati di un certo angolo. Il segnale termoelastico può essere rappresentato dal suo modulo (immagine di ampiezza R) e dall'angolo di fase rispetto al segnale di riferimento (immagine di fase). Nel caso in cui non siano presenti le condizioni adiabatiche si verifica una variazione di fase tra segnale termoelastico e segnale di riferimento [12, 13].

Il presente lavoro mostra come il segnale di fase può essere usato per monitorare il danneggiamento a fatica nei materiali attraverso la localizzazione delle zone plastiche e può essere usato come strumento per stimare il limite di fatica dei materiali.

SET UP SPERIMENTALE E PROVINI

Le prove sono state condotte con una macchina di carico servo idraulica MTS con una capacità di carico dinamica pari a ± 100 kN. I dati termoelastici sono stati acquisiti con una termocamera differenziale DeltaTherm 1560 prodotta dalla StressPhotonics avente sensore fotonico del tipo InSb di dimensione 320×256 ed un NETD < 18 mK. I dati termografici invece sono stati acquisiti con una termocamera (FLIR A20) con sensore microbolometrico di dimensione 160×140 e NETD < 50 mK.

In Fig. 1 è riportato il set up sperimentale adottato per i test. La termocamera raffreddata acquisisce i dati termografici del provino durante la prova di fatica; tali dati subiscono una correlazione in frequenza all'interno di una scheda hardware lock-in. La correlazione è possibile in tempo reale grazie all'acquisizione temporanea di un segnale di riferimento proveniente dalla cella di carico della macchina di prova. Il segnale termografico proveniente dal provino è molto rumoroso per questo lo scopo principale del filtraggio del segnale è quello di ridurre il rumore in modo da rendere possibile la valutazione dell'ampiezza e della fase del segnale. Il segnale di riferimento deve essere alla stessa frequenza del segnale di carico e sincronizzato con questo.

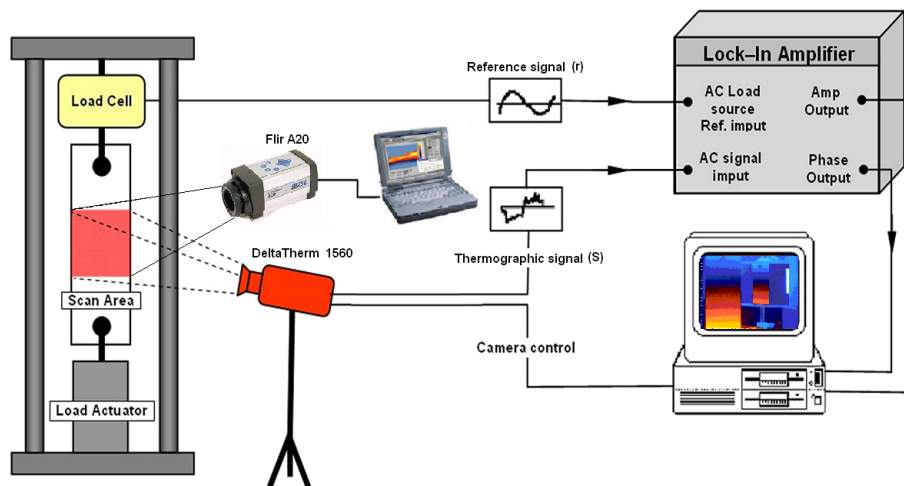


Figura 1: Set-up utilizzato per le acquisizioni termografiche e termoelastiche.

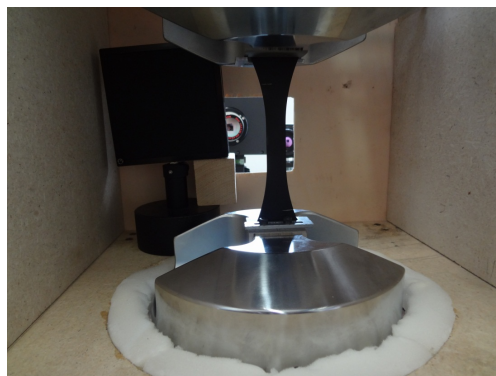


Figura 2: Particolare della cassetta di legno e del riferimento utilizzato come corpo nero.

Il set up sperimentale prevede una cassetta in legno (Fig. 2) per contenere gli scambi termici verso l'esterno durante la prova. Una lamina di alluminio verniciata con vernice nera opaca è stata posizionata all'interno della cassetta in legno per



poter avere un riferimento sulla temperatura ambiente durante la prova. Per ridurre al minimo gli scambi termici con l'esterno è stata inserito un materiale coibente per garantire il corretto isolamento.

Sono stati studiati 5 provini ottenuti da un unico getto forgiato secondo la normativa ASTM 466-96 (Fig. 3). Tutti i provini sono stati verniciati con vernice ad alta emissività in modo da evitare riflessi dovute ad altre sorgenti.

La prova ha previsto l'applicazione di step di carico caratterizzati da valori di carico medio e ampiezza di carico via via crescenti fino a raggiungere la rottura del provino. Il rapporto di carico adottato è di 0.5 mentre la frequenza di carico è stata di 17 Hz. Ogni step ha avuto la durata di 20000 cicli cioè il tempo necessario affinché si raggiungesse la stabilizzazione della temperatura del provino. Tra uno step e l'altro la prova è stata fermata per permettere di reimpostare i parametri di prova su macchina di carico e termocamera.

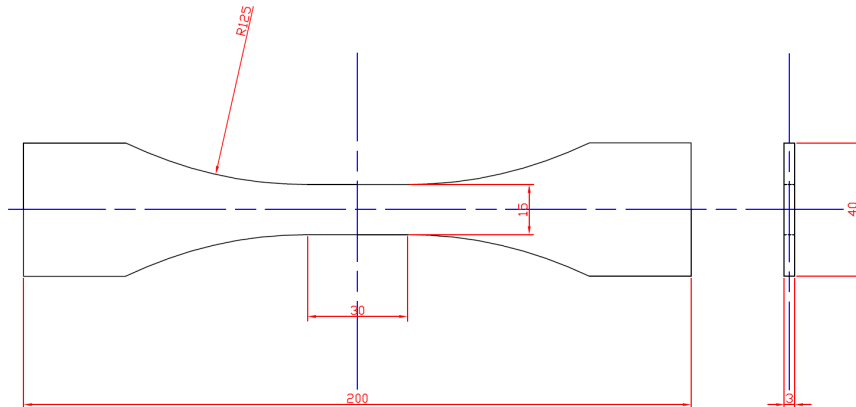


Figura 3: Forma e geometria del provino utilizzato.

Nelle tabelle 1 e 2 sono riportati i carichi utilizzati per tutti i provini per ogni step fino a rottura (in grassetto).

Il primo provino è stato sottoposto ad un numero di step di carico maggiore in quanto non si conosceva a priori l'effettivo comportamento del materiale. Il numero di step di carico è stato poi via via ottimizzato ripartendo il carico tra i vari step in modo da ottenere più dati in prossimità della rottura del materiale.

N° step	provino 1 $\Delta\sigma$ [MPa]	N° step	provino 1 $\Delta\sigma$ [MPa]
1	50	14	270
2	70	15	285
3	90	16	300
4	105	17	315
5	120	18	330
6	135	19	345
7	150	20	360
9	165	21	375
10	180	22	390
11	195	23	405
12	210	24	420
13	225		

Tabella 1: Step ed ampiezze di carico applicati al provino 1.



N° step	provino 2 $\Delta\sigma$ [MPa]	provino 3 $\Delta\sigma$ [MPa]	provino 4 $\Delta\sigma$ [MPa]	provino 5 $\Delta\sigma$ [MPa]
1	50	50	50	50
2	90	90	90	90
3	130	130	130	130
4	170	170	170	170
5	210	200	200	200
6	240	230	230	230
7	270	260	260	260
8	300	280	280	280
9	330	300	300	300
10	350	320	320	320
11	370	340	340	340
12	380	350	350	350
14		360	360	360
15		370	370	370

Tabella 2: Step ed ampiezze di carico applicati ai restanti provini.

RISULTATI ED ANALISI

Il danneggiamento a fatica del materiale e la successiva valutazione del limite di fatica è stata eseguita monitorando i dati termici e termoelastici acquisiti con due differenti termocamere. In particolare, i parametri considerati per descrivere il danneggiamento del materiale sono la temperatura ed il segnale di fase termoelastico. A causa delle presenza di fonti di rumore presenti nei segnali acquisiti, è stato necessario applicare delle procedure di analisi per elaborare i segnali tramite filtri spazio-temporali.

L'evoluzione della temperatura del provino durante la prova di fatica è contraddistinta dall'azione contemporanea di tre contributi: la variazione della temperatura ambiente, il calore prodotto dalla macchina di cario oleodinamica trasmesso per conduzione al provino e le sorgenti dissipative irreversibili dovute al danneggiamento. Come già spigato nei precedenti paragrafi sono presenti anche le sorgenti reversibili termoelastiche che però non determinano un aumento di temperatura. Per quanto detto, l'andamento spazio-temporale della temperatura superficiale del provino può essere espresso come:

$$T(x, y, t) = f[T_d(x, y, t), T_{amb}(t), T_{lm}(x, y, t)] \quad (6)$$

dove x e y sono le coordinate di un generico punto della superficie del provino, $T_d(x, y, t)$ è il valore di temperatura al generico istante t dovuto alle sorgenti dissipative, $T_{amb}(t)$ è il valore della temperatura ambiente al generico istante t e $T_{lm}(x, y, t)$ è il valore di temperatura dovuto al calore prodotto dall'olio caldo presente nel cilindro oleodinamico.

Dall'Eq. (6) pare evidente che per una corretta valutazione della T_d è necessario filtrare dal valore di temperatura letto dalla termocamera, i contributi termici che non sono rilevanti ai fini della nostra trattazione.

In Fig. 4 viene mostrata un'immagine termografica del provino 1 relativa allo step 19. Nell'immagine si può distinguere l'area denominata come A1 che rappresenta l'area di analisi comprendente il tratto utile del provino. L'area A2 rappresenta l'area considerata sul corpo nero di riferimento per il calcolo della temperatura ambiente.

La temperatura ambiente è stata valutata considerando la temperatura massima dell'area A2 ed è stata sottratta istante per istante alla temperatura superficiale del provino così da eliminare l'effetto della T_{amb} .

Dall'analisi del profilo p in Fig. 4 si è notato che l'effetto dell'olio caldo sul provino si tramuta in un flusso termico lineare lungo il provino che tende a rendere non simmetrico il riscaldamento del provino in direzione longitudinale.

In Fig. 5 è diagrammato l'andamento della temperatura lungo il profilo p nello step 19 del provino 1. In tale step, dove sono presenti sorgenti dissipative, è evidente l'effetto che il flusso termico lineare causato dall'olio caldo, provoca sul provino. Si è deciso di eliminare in parte il contributo di tale flusso termico sottraendo ai valori di temperatura superficiale lungo ciascun profilo dell'immagine A1, i valori di temperatura ottenuti considerando la retta che interpola il primo e



l'ultimo valore di temperatura del profilo considerato (retta in rosso, Fig. 5). Come già detto, con tale procedura, si riesce in parte a compensare l'effetto del riscaldamento dovuto alla macchina di carico, in quanto l'olio continua a scaldarsi durante la prova e quindi diventa difficile discernere tale contributo da quello dovuto alle sorgenti dissipative.

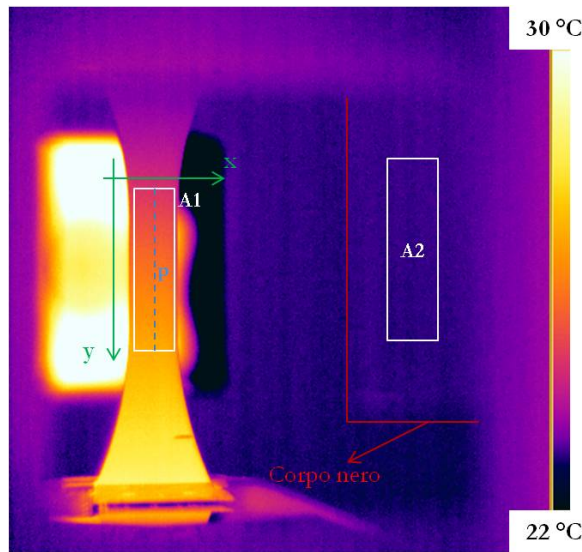


Figura 4: Aree e profili utilizzati per l'analisi dei dati termici (provino 1, step 19).

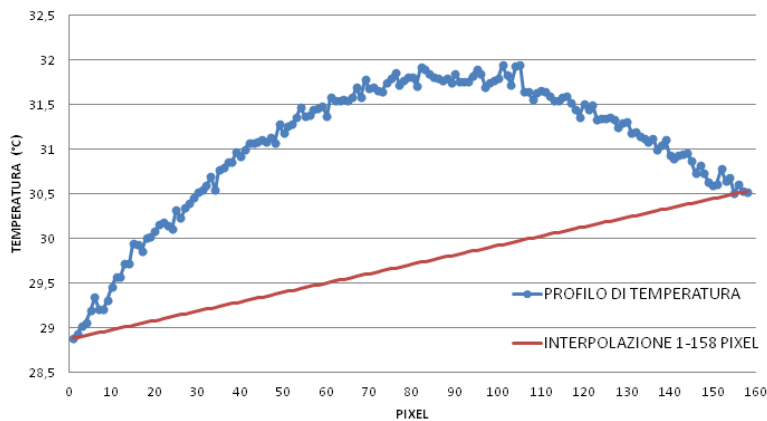


Figura 5: Profilo di temperatura lungo la direzione longitudinale del provino e retta interpolatrice per la valutazione del flusso termico derivante dall'olio caldo dalla macchina di carico (provino 1, step 19).

In Fig. 6 è riportata la procedura completa di analisi dei dati di temperatura e di fase. Per quanto riguarda i dati in temperatura, dopo l'eliminazione delle fonti di rumore, per ogni step viene valutato il ΔT_{max} come differenza tra la massima temperatura misurata nell'area A1 durante lo step e la temperatura iniziale misurata sempre nella stessa area e riferita allo stesso step. In pratica il ΔT_{max} rappresenta la variazione di temperatura che si ottiene per ogni condizione di carico.

Per quanto riguarda l'analisi del segnale di fase termoelastico, una volta ottenute le mappe di fase dal software DeltaVision® della StressPhotonics®, queste sono state esportate in ambiente Matlab® per poter consentire l'applicazione delle successive fasi della procedura descritta in Fig. 6. Considerata un'area di analisi simile all'area A1 utilizzata per i dati di temperatura, si è applicato ad ogni immagine acquisita durante ogni step un filtro spaziale di tipo binomiale per smorzare possibili valori di fase elevate dovute a pixel danneggiati della termocamera o a imperfezioni presenti sullo strato di vernice.

Anche in questo caso la variazione di fase è stata ottenuta sottraendo un'immagine di riferimento acquisita durante i primi step cioè quando il danneggiamento non è ancora presente. I primi step di carico tuttavia risultano più rumorosi in quanto il segnale termoelastico è più basso a causa dei bassi livelli di carico. Per questo bisogna porre attenzione all'immagine da sottrarre per ottenere il valore della variazione di fase.

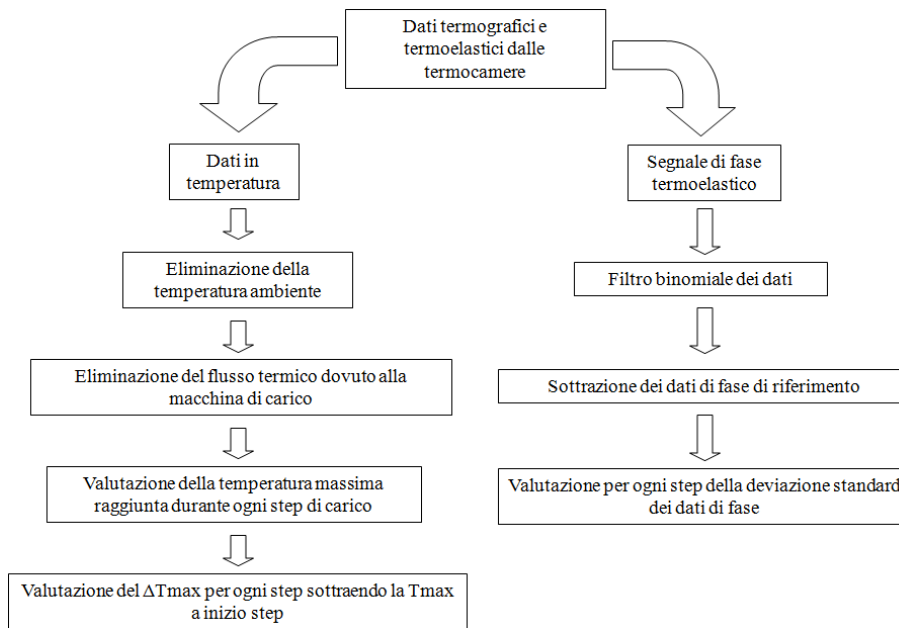


Figura 6: Procedure di analisi dei dati termografici e termoelastici.

In Fig. 7 è mostrata l'evoluzione della fase ricavata dalla procedura precedentemente descritta per il provino 2. Come si vede dalle immagini non tutta l'area considerata è interessata dalla stessa variazione di fase. Rispetto alle immagini di temperatura che sono contraddistinte da un aumento di temperatura che interessa tutto il tratto utile ed in particolare la parte centrale del provino, le immagini di fase permettono di localizzare con più precisione le zone del provino che stanno subendo un danneggiamento. Nel caso del provino 2 il danneggiamento sembra partire da una zona posta nella parte superiore del tratto utile per poi estendersi fino ad interessare la zona centrale.

In Fig. 8 sono diagrammati i valori di ΔT_{max} e della deviazione standard della fase in funzione della semiampiezza di carico σ_a ($\Delta\sigma/2$) sempre per il provino 2. Si è deciso quindi di considerare come parametro di danneggiamento la deviazione standard della fase piuttosto che la variazione di fase. I due parametri sono però strettamente correlati in quanto un aumento della variazione di fase comporta di conseguenza un aumento della deviazione standard del segnale.

Dai diagrammi di Fig. 8 è possibile individuare il valore di ampiezza di carico che provoca un aumento significativo sia della temperatura che del segnale di fase e che quindi rappresenta in valore di carico al quale cominciano a verificarsi i fenomeni di danneggiamento.

Supponendo che tale valore di carico per quanto detto, sia il più rappresentativo per stimare il limite fatica del materiale, si è deciso di sviluppare un metodo statistico per la determinazione automatica di tale valore.

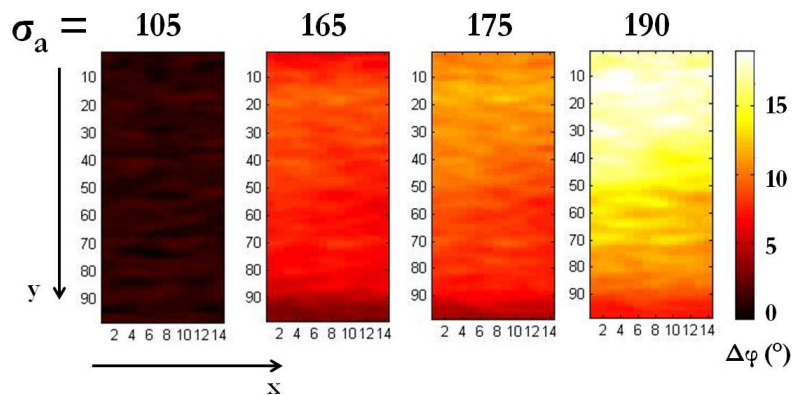


Figura 7: Andamento della fase al variare delle condizioni di carico (provino 2).

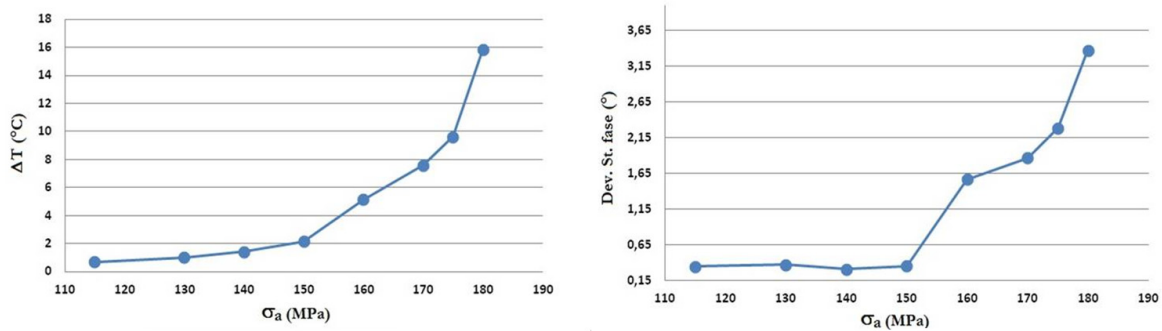


Figura 8: Andamento della variazione di temperatura e della deviazione standard della fase al variare della semiampiezza di carico.

Il metodo sviluppato utilizza un metodo statistico utilizzato per il controllo della qualità in ambito industriale e cioè le “carte di controllo”. In pratica se si indica con μ il valore medio di una serie di valori e fissato un valore di banda L , allora si può definire un intervallo di confidenza di ampiezza $\pm\sigma L$.

Ottenuta quindi la serie di dati di temperatura o di fase che in Fig. 8 sono in versione grafica, viene fatta dapprima la deviazione standard dei punti della serie presi a due a due. Tale operazione permette di individuare un punto della serie caratterizzato da una deviazione standard “anomala” rispetto ai punti precedenti. Tale punto corrisponderà ad un certo valore di carico σa_i . A questo punto si considerano i tre valori precedenti al punto individuato e con questi valori si applica la carta di controllo. Fissato un valore di L pari a 6 si verifica se il punto della serie a cui corrisponde il carico σa_i rientra nell’intervallo di confidenza calcolato. In caso negativo σa_i rappresenta il valore del limite di fatica cercato altrimenti, bisognerà proseguire con la carta di controllo facendo la verifica sul punto σa_{i+1} .

In Tab. 3 sono riassunti i valori del limite di fatica ottenuti utilizzando il metodo statistico appena descritto. Si nota che in genere i dati di fase forniscono dei valori più elevati rispetto ai dati di temperatura.

Delle prove di fatica con il metodo Stair-case eseguite su 15 provini dello stesso materiale hanno fornito un valore del limite di fatica pari a 168 ± 4 MPa. In pratica i valori ottenuti possono considerarsi confrontabili con il limite di fatica trovato con il metodo Stair-case. Tuttavia i dati in temperatura sembrano sottostimare il limite di fatica al contrario dei dati di fase che portano ad una sovrastima dello stesso.

Provino	ΔT_{max} σ_a [MPa]	Dev. Std. fase σ_a [MPa]
1	165	173
2	160	160
3	160	190
4	170	185
5	160	170
Media	163	175,6

Tabella 3: Valori del limite di fatica ottenuti con il metodo statistico delle carte di controllo.

CONCLUSIONI

In questo lavoro sono state presentate delle nuove procedure di analisi dei dati termografici per lo studio del danneggiamento a fatica dei materiali. In particolare durante le prove di fatica, sono state fatte sia acquisizioni termografiche che acquisizioni termoelastiche. Le acquisizioni termografiche hanno permesso di monitorare la temperatura superficiale del provino, mentre le acquisizioni termoelastiche sono servite per monitorare il segnale di fase termoelastico. La variazione di tale segnale infatti, è indice di plasticizzazioni all’interno del materiale e quindi può essere legata al danneggiamento a fatica.

Sono stati provati 5 provini in ASTM A182 grado F6NM con una procedura a step di carico via via crescenti fino a rottura. Sono state sviluppate nuove procedure di analisi dei dati con lo scopo principale di ridurre il rumore presente nei segnali considerati al fine di fare una corretta valutazione dei parametri temperatura e fase.



Si è mostrato come le immagini di fase forniscano informazioni aggiuntive rispetto alle semplici immagini in temperatura. Più precisamente il segnale di fase permette di localizzare le aree interessate dai fenomeni di danneggiamento e quindi permette una vera e propria analisi a campo intero del componente indagato.

Infine, una procedura statistica è stata proposta per la valutazione del limite di fatica del materiale. Tale procedura consente di valutare in maniera automatica il valore cercato partendo da una serie di dati in ingresso.

Il confronto con le prove di fatica eseguite con il metodo stair-case ha mostrato come i due approcci utilizzati consentano di valutare in maniera più rapida rispetto ai metodi tradizionali il limite di fatica dei materiali.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. La Rosa, A. Risitano, *International Journal of Fatigue*, 22 (1998) 65.
- [2] M. P. Luong, *Mech. Mater*, 28 (1998) 155.
- [3] G. Fargione, A. Geraci, G. La Rosa, A. Risitano, M. Grench, In: XXVI Convegno Nazionale AIAS, Catania, Italy, (1997).
- [4] T. Boulanger, A. Chrysochoos, C. Mabru, A. Galtier, *International Journal of Fatigue*, 26 (2004) 221.
- [5] F. Curà, G. Curti, A.E. Gallinatti, In: XXVI Convegno Nazionale AIAS, Torino, Italy, (2009).
- [6] A. Chrysochoos, H. Louche, *International Journal of Engineering Science*, 38 (2000) 1759.
- [7] A.E. Morabito, A. Chrysochoos, V. Dattoma, U. Galietti, *International Journal of Fatigue*, 29 (2007) 977.
- [8] A.E. Morabito, V. Dattoma, U. Galietti, *SPIE*, 4710, (2002).
- [9] J. M. Dulieu-Barton, *Strain*, 35 (1999) 35.
- [10] N. Harwood, W. Cummings, National Engineering Laboratory, Adam Hilger, Bristol, Philadelphia, New York, (1991).
- [11] G. Pitarresi, E. A. Patterson, *J. Strain Analysis*, 35 (1999) 35.
- [12] F. A. Diaz, E. A. Patterson, R. A. Tomlinson, J. R. Yates, *Fatigue Fract. Engin. Mater. Struct.*, 27 (2004) 571.
- [13] F. A. Diaz, J. R. Yates, E. A. Patterson, *International Journal of Fatigue*, 26 (2004) 365.
- [14] C. Casavola, U. Galietti, D. Modugno, C. Pappalettere, *SPIE*, 6250, (2006).
- [15] U. Galietti, D. Palumbo, In: 10th international Conference on Quantitative Infrared Thermography (QIRT), Québec City, Canada, (2010).
- [16] S. Giancane, V. Dattoma, A. Chrysochoos, B. Wattrisse, In: XXXV Convegno Nazionale AIAS, Università Politecnica delle Marche, Italy, (2006).
- [17] A. Chrysochoos, V. Huon, F. Jourdan, J. M. Muracciole, R. Peyroux, B. Wattrisse, *Strain*, 46 (2010) 117.
- [18] M. L. Pastor, X. Balandraud, M. Grédiac, J. L. Robert, *Infrared Physics & Technology*, 51 (2008) 505.
- [19] A. K. Wong, R. Jones, J. G. Sparrow, *J. Phys. Chem. Solids*, 48 (1987) 749.
- [20] A. L. Gyekenyesi, G. Y. Baaklini, *Nasa/TM*, (2001).
- [21] W. J. Wang, J. M. Dulieu-Barton, Q. Li, *Experimental Mechanics*, 50 (2010) 449.