



Nuova Metodologia per L'analisi a Fatica dei Materiali con Tecnica Termoelastica (TSA)

U. Galietti

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Gestionale, Politecnico di Bari, viale Japigia 182, 10126, Bari

D. Palumbo

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Gestionale, Politecnico di Bari, viale Japigia 182, 10126, Bari

ABSTRACT. Despite the large number of proposals in the field of fatigue prediction of welded joints, a globally accepted and unified theory, which applies easily to any load condition, does not exist. Real life components, indeed, differ in geometry and/or type of load from the structural design for which they are regarded by Standards, so that a lot of precautionary safety factors are used that lead to an underestimation of the actual fatigue life of joints. Infrared thermography has a great potential in this field, both from structural and thermomechanical points of view. It enables a full field stress analysis with a sufficient spatial resolution so that the complexity of the stress state at the weld toe and its time evolution are taken into account, emphasizing anomalies that may predict structural failure. A new method for evaluation fatigue limit damage is presented in this paper and in particular interesting results derived from analysis of the evolution of thermoelastic signal phase (TPA). Variations in the value of signal phase indicate a not elastic behavior and plastic dissipation in the material.

SOMMARIO. Nonostante il gran numero di proposte nel campo della previsione a fatica dei giunti saldati, una teoria unificata e di validità globale, applicabile con facilità in qualsiasi condizione, ancora non esiste. Tuttavia, è frequente che i componenti da dimensionare differiscano per geometria e/o per tipo di carico dai particolari costruttivi considerati dalla normativa; in questo caso si ricorre usualmente a coefficienti di sicurezza parecchio cautelativi che portano a sottostimare l'effettiva durata a fatica del giunto e che determinano un notevole scostamento tra i risultati calcolati e quelli reali. La termografia ad infrarosso ha grandi potenzialità in questo campo, sia da un punto di vista di misura di sollecitazione, che da un punto di vista termomeccanico: permette infatti di condurre analisi di campo con una risoluzione spaziale sufficiente per cogliere la complessità dello stato tensionale ai piedi del cordone di saldatura e di seguire l'evoluzione temporale delle stesse evidenziando chiaramente anomalie che possano preludere a cedimenti strutturali. In questo articolo è presentato un nuovo metodo per la valutazione del limite di fatica dei materiali. Risultati interessanti derivano dall'analisi dell'evoluzione del segnale termoelastico di fase. Variazioni nel valore della fase indicano un comportamento non elastico e dissipazioni plastiche nel materiale.

KEYWORDS. TSA; Thermography; Fatigue; Phase signal; Damage.

INTRODUZIONE

I metodi classici per la valutazione del limite di fatica richiedono tempi di prova molto lunghi e una grande quantità di provini con conseguente aumento dei costi per questo, metodi accelerati come i metodi termici, riscuotono notevole interesse sia per lo studio di materiali base che per i giunti saldati.



Bisogna considerare inoltre che nonostante il gran numero di proposte nel campo della previsione a fatica dei giunti saldati, una teoria unificata e di validità globale, applicabile con facilità in qualsiasi condizione, ancora non esiste. Tuttavia, è frequente che i componenti da dimensionare differiscano per geometria e/o per tipo di carico dai particolari costruttivi considerati dalla normativa; in questo caso si ricorre usualmente a coefficienti di sicurezza parecchio cautelativi che portano a sottostimare l'effettiva durata a fatica del giunto e che determinano un notevole scostamento tra i risultati calcolati e quelli reali.

In letteratura sono presenti procedure consolidate per la valutazione del limite di fatica dei materiali dall'analisi dell'evoluzione della temperatura superficiale, durante una prova a carichi crescenti [1-3].

I metodi termici utilizzati in letteratura [1-3], consentono la determinazione del limite di fatica di provini standard e presentano qualche problema per materiali differenti dall'acciaio. In particolare tali metodi richiedono la determinazione delle sorgenti di calore e quindi delle aree deformate plasticamente.

Sono presenti in letteratura vari lavori in cui sono utilizzati metodi termici accelerati per lo studio del comportamento a fatica di giunti saldati che forniscono informazioni sullo stato di tensione [4-5] e qualche indicazione sulla possibilità di utilizzare l'infrarosso per la valutazione del danneggiamento o della propagazione di cricche [6].

In particolare prove di fatica con metodi termici sono state eseguite su giunti saldati in acciaio AH36 [5]. I risultati mostrano che la curva S-N ottenuta è in buon accordo con le curve indicate dalle normative vigenti. Il lavoro sperimentale di Ummenhofer *et. al* [4] mostra una nuova metodologia di analisi dei dati. In pratica le sequenze termiche acquisite durante la prova sono processate con un algoritmo che consente di separare la parte *lineare* del segnale dalla parte *non lineare*. Infatti, quest'ultima "esce" dal rumore quando insorgono fenomeni dissipativi. Questa metodologia permette di localizzare le zone plastiche sul cordone di saldatura che precedono lo sviluppo e la nascita delle cricche di fatica.

In letteratura inoltre alcuni lavori mostrano come ci sia una correlazione tra il danneggiamento nei materiali dovuto a comportamenti non più elastici e a dissipazioni plastiche, e la variazione di fase termoelastica [7].

Nel presente lavoro si propone di utilizzare le tecniche termografiche "tradizionali" per valutare il limite di fatica per materiali base e per giunti saldati e inoltre sarà presentato un nuovo metodo basato sulla variazione di fase del segnale termoelastico per la valutazione del limite di fatica dei materiali. Con i metodi termografici tradizionali, basati sulla rilevazione della temperatura, si hanno talvolta difficoltà con materiali quali le leghe di alluminio che presentano elevati coefficienti di conducibilità termica. Il nuovo metodo proposto è basato sull'analisi dell'evoluzione del segnale termoelastico di fase acquisito durante la procedura di carico utilizzata per l'analisi dei dati di temperatura. Ha il vantaggio rispetto ai metodi termografici tradizionali di richiedere una fase di post-processing più "snella" e di poter risolvere i problemi legati alla misura della temperatura di materiali con conducibilità termica elevata.

TEORIA

I materiali metallici durante una sollecitazione dinamica a fatica mostrano un riscaldamento caratteristico direttamente correlabile al danneggiamento nel materiale. Vari autori [8] hanno mostrato come l'analisi del danneggiamento dia indicazioni per quanto riguarda la localizzazione dei difetti. Altri lavori [9] hanno mostrato come la sola temperatura non sia direttamente correlata al danneggiamento a fatica. La temperatura infatti, dipende dall'ampiezza di stress, dalla frequenza di prova, dalla geometria del provino e delle condizioni ambientali di prova che influenzano gli scambi termici tra il provino e l'ambiente.

Nel modello termomeccanico proposto da Morabito *et. al* [8] e Chrysochoos *et. al* [10] lo stato di equilibrio di ogni volume elementare di materiale è descritto usando un set di n variabili di stato: la temperatura assoluta T , il tensore degli strain ε ed un vettore a di dimensione $n-2$, che racchiude le variabili interne.

Dopo varie ipotesi [8], l'equazione locale del calore può essere scritta nella forma semplificata:

$$\rho C_{\varepsilon,\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} - k \Delta \theta = d_1 + s_{the} \quad (1)$$

dove θ è la temperatura ottenuta sottraendo la temperatura registrata durante il test di prova e la temperatura di riferimento.

L'equazione precedente permette di valutare separatamente i termini dissipativi e le sorgenti termiche di accoppiamento tramite la stima dei termini a sinistra dell'equazione, valutando la temperatura lungo profili longitudinali costruiti mediando la temperatura sulla superficie del provino. Per materiali come le leghe di alluminio, non è semplice valutare le sorgenti dissipative a causa del basso rapporto segnale rumore [8].



In questo lavoro, è stata utilizzata l'analisi termoelastica (TSA) per valutare le sorgenti termoelastiche e si propone un nuovo approccio basato sul segnale termoelastico di fase per valutare il comportamento plastico del materiale.

Sostituendo il termine termoelastico nell'equazione (1), in assenza di termini dissipativi, si ottiene:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{1}{\rho C_p} \left(\alpha T \frac{\partial \sigma_1}{\partial t} - k \Delta \theta \right) \quad (2)$$

dove σ_1 è il primo invariante degli stress principali.

L'equazione (2) mostra che il trasferimento di calore è dipendente da tre quantità: il gradiente di temperatura (ΔT), la conducibilità termica del materiale (termine k) e la frequenza di carico ($\partial \sigma / \partial t$). Le condizioni locali adiabatiche sono ottenute se il gradiente di temperatura è nullo, se la conducibilità termica è zero e se si aumenta la frequenza di carico. Tali condizioni consentono di valutare i termici termoelastici con la tecnica TSA.

La perdita delle condizioni adiabatiche è dovuta alla generazione di calore dovuto agli elevati gradienti di stress o al raggiungimento di locali condizioni plastiche dovute a fenomeni dissipativi. In questi casi l'analisi termoelastica non è applicabile ma tuttavia l'analisi termoelastica del segnale di fase consente di valutare i fenomeni sopra descritti.

Un segnale di riferimento fornito ad esempio da una cella di carico o da un estensimetro posto sul provino è usato per filtrare il segnale termoelastico mediante un'unità lock-in amplifier. Il segnale termoelastico ed il segnale di riferimento possono essere rappresentati come due vettori che ruotano alla stessa velocità angolare (stessa frequenza) con un ritardo di fase costante. Il segnale termoelastico può essere quindi rappresentato mediante il suo modulo R (immagine R) e l'angolo di fase rispetto al segnale di riferimento (immagine di fase). Nel caso di mancanza di condizioni adiabatiche, si ottiene una variazione di fase tra segnale termografico e segnale di riferimento [6].

SET-UP SPERIMENTALE

Il set-up sperimentale di prova è indicato in Fig. 1. Normalmente il segnale termografico S acquisito è molto rumoroso. Lo scopo principale del processamento del segnale è eliminare il rumore e misurare l'ampiezza di S . Questo è fatto nel caso del sistema DeltaTerm, con una unità hardware lock-in amplifier che correla il segnale S con il segnale di riferimento r . In pratica il segnale di riferimento è un segnale periodico con un basso livello di rumore e sincronizzato con il carico applicato al provino.

Lo studio è stato condotto su tre giunti saldati in acciaio Fe360 (spessore 6 mm e larghezza 60 mm) e su 4 provini in acciaio AISI304 ad "osso di cane" (spessore 3 mm e larghezza 50 mm). I giunti sono stati saldati testa a testa dopo cianfrinatura a 45° mediante saldatura ad arco. Prima delle prove, i provini sono stati verniciati con vernice nera opaca in modo da rendere uniforme l'emissività delle superfici trattate ed evitare eventuali riflessi dovuti a sorgenti di calore poste nelle vicinanze dei provini durante la prova.

Le prove sono state condotte su una macchina di carico servoidraulica Instron Schenk pc400m con capacità di carico statico pari a ± 250 [kN] per i giunti saldati e su una macchina di carico servoidraulica MTS con capacità di carico statico pari a ± 100 [kN] per i provini in AISI304. Per le acquisizioni di tipo termoelastico (AC) e quelle di tipo termografico (DC) sono state effettuate mediante l'utilizzo della termocamera DeltaTherm 1560. Si è utilizzata inoltre la termocamera Flir A20 per l'acquisizione di sequenze termografiche durante l'intera prova. Per la correlazione del segnale termoelastico si è usato come segnale di riferimento il segnale derivante dalla cella di carico della macchina di prova.

Due estensimetri uniassiali sono stati posti sui lati dei provini in modo da valutare eventuali flessioni parassite dovute a eventuali distorsioni derivanti dal processo di saldatura o al mancato allineamento nelle morse della macchina di carico. I provini sono stati sottoposti ad una prova di fatica a trazione con un rapporto di carico $R = 0.1$ ad una frequenza di 18 Hz per i giunti saldati e 25 [Hz] per i provini in AISI304. La procedura di prova ha previsto l'applicazione di step di carico della durata di 20000 cicli corrispondenti a determinati valori dell'ampiezza di stress via via crescenti fino alla rottura dei provini.

L'intera prova è stata monitorata con termocamera ad infrarosso, provvedendo, ad intervalli regolari di tempo, all'acquisizione ad alla registrazione di immagini termoelastiche e di sequenze termografiche. Per meglio valutare la misura di temperatura superficiale che consente di osservare l'insorgenza e l'evoluzione di fenomeni dissipativi e di rottura del materiale, si è deciso, per i giunti saldati, di isolare termicamente il provino racchiudendo lo stesso in una camera isolante in legno con una sola apertura frontale per consentire l'indagine con la termocamera Fig. 2.

L'utilizzo di uno specchio a superficie riflettente anteriore ha permesso in contemporanea il monitoraggio delle superfici anteriore e posteriore del provino e ha consentito attraverso la valutazione del segnale termoelastico, la valutazione di eventuali sollecitazioni di flessione nel piano e fuori dal piano del provino Fig. 2.

I dati estensimetrici hanno evidenziato la presenza di flessioni fuori dal piano trascurabili come anche confermato dai valori medi del segnale termoelastico sulle due facce del provino.

RISULTATI

L'obiettivo di questo lavoro è la valutazione del danneggiamento a fatica di giunti saldati e provini standard ad “osso di cane” in acciaio, mediante l'utilizzo di dati termografici e termoelastici. In particolare tale valutazione è stata condotta monitorando e analizzando la temperatura superficiale del provino e la variazione del segnale termoelastico di fase.

Le immagini termografiche e termoelastiche sono state processate tramite software Matlab® in modo da eliminare eventuali fonti di rumore e consentire quindi una migliore localizzazione delle zone danneggiate sulla superficie del provino. Ad esempio, come si nota dalla Fig. 2, il provino durante la prova è interessato da un flusso di calore verticale dal basso verso l'alto generato dall'olio caldo che circola nell'attuatore inferiore. Tale flusso tende a nascondere eventuali fonti di calore dovute a zone danneggiate per cui è necessario filtrare i dati termografici al fine di individuare la prima possibile eventuali cricche.

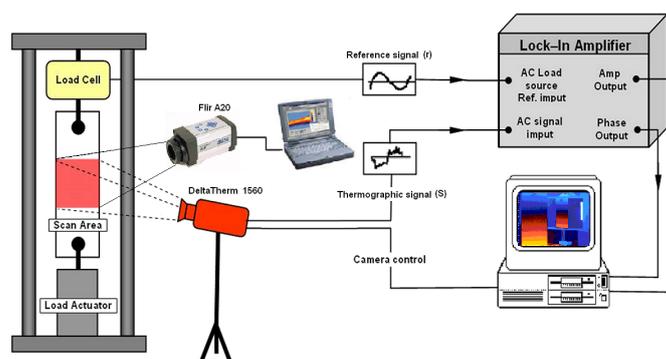


Figura 1: Set-up di prova adottato per la rilevazione dei dati termoelastici.

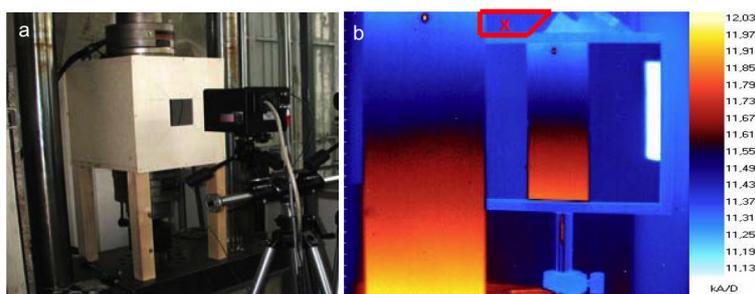


Figura 2: Particolare della camera di legno adottata e flusso termico presente sul provino

Nell'analisi dei dati fase, la valutazione e la sottrazione del segnale medio di fase permette di rimuovere le variazioni di fase dovute ad altri fenomeni e non ad effetti di danneggiamento. Inoltre sia i valori di fase che di temperatura sono stati ottenuti sottraendo un immagine di riferimento presa durante i primi step di carico quando cioè non sono presenti fenomeni di danneggiamento. Il tutto per ottenere le variazioni di fase e temperatura rispetto ad una stessa condizione di riferimento.

Per quanto riguarda invece l'analisi dei dati di temperatura dei provini in AISI304, si è utilizzata la procedura Met2 proposta dal centro CRF di Torino [3]. In questo caso si è deciso di diagrammare i valori di ΔT_{max} valutati come temperatura massima nell'area considerata sottratta, del valore di riferimento relativo al primo step di carico (materiale sollecitato nella zona lineare elastica).



L'algoritmo utilizzato ha permesso di valutare i valori di ΔT_{max} e $\Delta \Phi_{max}$ monitorando i provini sul fronte e anche sul retro nel caso dei giunti saldati, per ogni step di carico caratterizzato da un determinato valore di $\Delta \sigma$.

Le immagini termografiche acquisite durante i vari step di carico mostrano come nei giunti saldati sia difficile identificare le aree danneggiate a causa delle piccole variazioni di temperatura che si generano durante la prova. Le variazioni di fase sono molto più alte e permettono di localizzare le aree danneggiate molto più precisamente che con la temperatura.

In tutti i provini standard si verifica un aumento della fase sia con segno positivo che con segno negativo. Le variazioni di fase interessano inoltre l'intero provino ovvero l'intera area analizzata. Tale fenomeno può essere spiegato se si pensa ad un comportamento non omogeneo del provino dal punto di vista deformativo, tuttavia si sottolinea che l'approccio qui utilizzato è del tutto empirico e che altre prove sperimentali sono necessarie per avere conferma di tale fenomeno.

Come si vede dalla tabella (2) si è deciso di valutare il limite di fatica considerando sia la variazione positiva che quella negativa della fase. Si è pensato inoltre di riunire tutti i dati in un solo grafico considerando la differenza algebrica tra fase massima e fase minima. Quest'ultimo diagramma permette infatti di ottenere più punti a disposizione per l'analisi statistica dei dati.

Le Fig. 3 e 5 mostrano le immagini di temperatura e di fase ottenute dopo aver processato i dati con l'algoritmo proposto.

Le Fig. 4 e 5 mostrano i diagrammi ottenuti riportando i valori di variazione di fase e temperatura in funzione dei corrispondenti valori di $\Delta \sigma$. I punti ottenuti sono disposti secondo due serie di dati ben distinte che descrivono il diverso comportamento del materiale. La regressione lineare tra le due rette permette di ottenere il valore del limite di fatica cercato. Dai diagrammi ottenuti e dalle tabelle (1) si nota come l'uso della fase nei provini saldati in acciaio e nei provini standard, porti a risultati confrontabili con quelli ottenuti usando la temperatura come parametro caratteristico del danneggiamento.

I risultati ottenuti sono in linea con quelli indicati in letteratura dalle norme che indicano per questa tipologia di giunti un range di valori compresi tra 80 MPa e 112 MPa per il limite di fatica (EUROCODE 3 - Design of steel structures)[10]. La Tab. 1 indica sostanzialmente gli stessi valori del limite di fatica ottenuto nella zona frontale e retro del provino.

L'analisi statistica dei dati mostra come l'analisi del segnale di fase e della temperatura portino in pratica agli stessi risultati nella valutazione del limite di fatica. Inoltre il limite di fatica trovato è in pratica corrispondente a quello indicato in letteratura (121 MPa) [3].

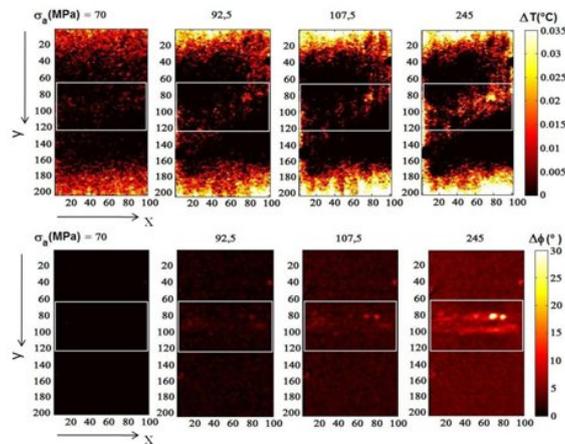


Figura 3: Immagini di temperatura e di fase del danneggiamento a fatica del giunto saldato 1.

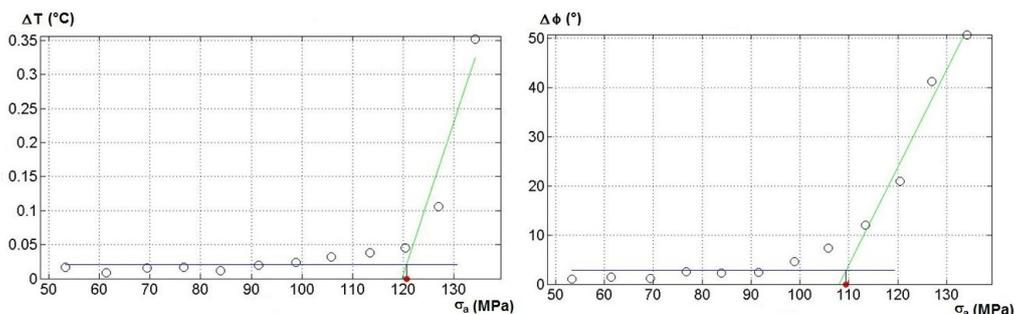


Figura 4: Valutazione del limite di fatica con dati in temperatura ed in fase del giunto saldato 1.

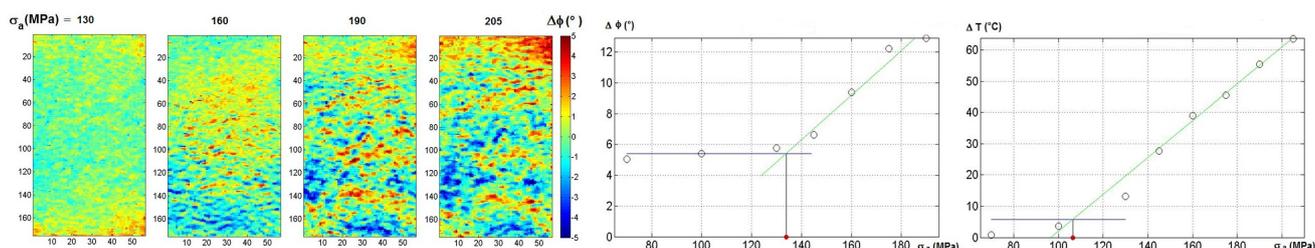


Figura 5: Evoluzione del segnale di fase e valutazione del limite di fatica con dati in temperatura ed in fase del provino 1 AISI304.

Fatigue Limit σ_L [MPa]				
Fatigue parameter	ΔT [°C]		$\Delta\phi$ [°]	
	front	rear	front	rear
Fe 360	121	121	110	112
specimen 1	123	123	124	125
specimen 2	128	128	132	125

Fatigue Limit σ_L [MPa]				
	Fase			Temperatura
	$\Delta\phi_{max}$	$\Delta\phi_{min}$	$\Delta\phi_{max} - \Delta\phi_{min}$	ΔT
Provino 1	59,8	118,0	94,1	127,6
Provino 2	94,4	115,7	126,6	137,5
Provino 3	119,5	131,9	133,8	106,5
Provino 4	106,7	130,3	143,4	103,7
Media	95,1	124,0	124,5	118,8
Dev. St.	25,7	8,3	21,4	16,4
err. Rel. %	27,0	6,7	17,2	13,8

Tabella 1: Valore dei limiti di fatica trovati con i dati di temperatura e di fase (Fe360, sinistra), (AISI304, destra) .

CONCLUSIONI

In questo lavoro si è presentato un nuovo metodo termico per la valutazione rapida del limite di fatica dei materiali. Le tecniche utilizzate sono le stesse utilizzate per la valutazione del limite di fatica dei materiali base. Tuttavia tali tecniche, basate sulla misura di temperatura superficiale del provino, possono trovare difficoltà in quelle applicazioni, quali i giunti saldati, in cui le variazioni di temperatura sono minime e richiedono quindi delle strumentazioni performanti. In questo caso dati termografici e termoelastici sono stati utilizzati per la valutazione della variazione di temperatura superficiale e della variazione del segnale termoelastico di fase su giunti saldati e su provini standard in acciaio.

Sono stati testati a fatica tre giunti saldati in acciaio Fe360, un giunto saldato Fe510 e 4 provini a "osso di cane" in acciaio AISI 304 per il monitoraggio del danneggiamento al variare del numero di cicli. Al classico parametro caratteristico utilizzato per monitorare il danneggiamento a fatica quale la temperatura, si è affiancata la variazione di fase indice di un comportamento plastico del materiale e della mancanza delle condizioni adiabatiche. In particolare, dopo una prima parte di filtraggio dei dati, l'analisi delle zone danneggiate ha mostrato risultati comparabili tra fase e temperatura.

I dati termoelastici ed in particolare il segnale di fase può quindi essere usato per valutare il limite di fatica nei giunti saldati con una fase di processing dei dati più semplice rispetto all'utilizzo della temperatura.

Il metodo proposto può essere effettivamente usato per monitorare le strutture reali saldate in quanto le prove hanno mostrato che la differenza tra fronte e retro del provino non è significativa, inoltre, la variazione di fase avviene in modo repentino appena viene superato il limite di fatica ed è semplice monitorare i dati termoelastici ogni 20-30 secondi.

La tecnica termoelastica può rappresentare in futuro un potente strumento per la valutazione delle sorgenti di calore nel classico approccio termomeccanico fornendo informazioni sia sul campo di stress e mediante la fase, sulle aree soggette a deformazione plastica (sorgenti dissipative).

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. La Rosa, A. Risitano, International Journal of Fatigue, 22 (2000) 65.
- [2] T. Boulanger, A. Chrysochoos, C. Mabru, A. Galtier, International Journal of Fatigue, 26 (2004) 221.
- [3] A. E. Morabito, V. Dattoma, U. Galietti, SPIE, (2002) 4710.
- [4] Ummenhofer T., Medgenberg J., International Journal of Fatigue, 31 (2009) 130.
- [5] V. Crupi, E. Guglielmino, M. Maestro, A. Marinò, Marine Structures, 22 (2009) 373.
- [6] F. A. Diaz, J. R. Yates, E. A. Patterson, International Journal of Fatigue, 26(4) (2004) 365.
- [7] C. Casavola, U. Galietti, D. Modugno, C. Pappalettere, SPIE, (2006) 6250.



- [8] A. E. Morabito, A. Chrysochoos, V. Dattoma, U. Galietti, *International Journal of Fatigue*, 29 (2007) 977.
- [9] S. Giancane, V. Dattoma, A. Chrysochoos, B. Wattrisse, XXXV Convegno Nazionale AIAS, Università Politecnica delle Marche, (2006).
- [10] A. Chrysochoos, H. Louche, *International Journal of Engineering Science*, 38 (2000) 1759.
- [11] EUROCODE 3 - Design of steel structures. Part 1-1: general rules and rules for buildings. BS EN 1993-1- 1.