



Comparison of fatigue behaviour of different titanium welded joints

Confronto sulla resistenza a fatica di diversi tipi di giunti saldati in lega di titanio

C. Casavola, C. Pappalettere, F. Tattoli

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Gestionale, Politecnico di Bari, viale Japigia 182, 70126, Bari

ABSTRACT. This paper presents experimental fatigue results of titanium grade 5 (Ti6Al4V alloy) welded joints. The joint geometries considered are butt, cruciform and T- joints. The joining process used to realize the welded plates are the laser beam and the hybrid CO₂ laser-MIG welding techniques. In the hybrid technique the laser beam is combined to the MIG arc in order to have advantages from both processes. The fatigue curves expressed in terms of nominal amplitude of stress (according to the traditional global method) and in terms of local amplitude of strain (according to the local Wel.Fa.Re. method) have been plotted after the experimental tests. Electrical strain gauges bonded close to the weld toe have been used to calculate the local strain amplitude. The fatigue tests have been carried out applying an axial loading to the specimen (for butt and cruciform joints) with a load ratio of 0.1. The T-joints have been tested with bending load. Experimental tests showed that the fatigue resistance of Ti6Al4V welded joints is highly dependent on the structural design of the joint and on geometry of the cord. Hybrid welded joints have a different fatigue behaviour compared to laser welded joints studied in previous work.

SOMMARIO. Il seguente lavoro presenta i risultati sperimentali delle prove di fatica eseguite su diversi tipi di giunti saldati in titanio grado 5 (lega Ti6Al4V). Le geometrie di giunti considerate sono testa a testa, a croce e a T. I processi di saldatura utilizzati per realizzazione delle piastre saldate sono la tecnica laser e la tecnica ibrida CO₂ laser – MIG. Nella tecnica di saldatura ibrida il fascio laser è combinato all'arco elettrico MIG in modo da unire i vantaggi provenienti da entrambi i processi. Le prove sperimentali permettono di tracciare le curve sperimentali di fatica espresse in termini di ampiezza di tensione nominale (secondo i tradizionali metodi globali) e in termini di ampiezza locale di deformazione (secondo il metodo locale Wel.Fa.Re.). L'ampiezza di deformazione locale è misurata tramite degli estensimetri elettrici a resistenza incollati nelle vicinanze del piede del cordone di saldatura. I test di fatica sono stati condotti applicando ai provini (testa a testa e a croce) un carico assiale con un rapporto di sollecitazione pari a 0.1. I giunti a T, invece, sono stati testati con un carico di flessione. I risultati sperimentali dimostrano che la resistenza a fatica dei giunti saldati in Ti6Al4V è strettamente correlata alla geometria strutturale del giunto e alla forma e regolarità del cordone di saldatura. I giunti saldati con tecnica ibrida hanno un diverso comportamento a fatica rispetto ai giunti in titanio saldati con tecnica laser studiati in un precedente lavoro

KEYWORDS. Titanium; Welded joints; Fatigue; Local method.

INTRODUZIONE

Il titanio e le sue leghe sono largamente utilizzate per l'elevato rapporto resistenza-peso specifico e la loro resistenza alla corrosione in ambienti ossidanti [1, 2]. Nell'industria del trasporto sono sempre più richieste elevate prestazioni in pesi contenuti. Per poter soddisfare a tali richieste, oltre alla scelta di materiali più leggeri ma ugualmente resistenti



all'acciaio, vengono anche studiate tecniche innovative di saldatura, che possano sostituire le strutture rivettate. La saldatura, oggi, è la tecnica più utilizzata per la realizzazione di strutture metalliche. Le applicazioni industriali della saldatura sono in continua espansione e molte delle strutture realizzate negli ultimi decenni non sarebbero state possibili senza tale tecnologia.

La saldatura del titanio, comunque, non è un processo semplice. Essa richiede particolari attenzioni in quanto le leghe di titanio sono altamente reattive con i gas atmosferici, soprattutto alle alte temperature. Durante il processo di saldatura le leghe di titanio assorbono facilmente ossigeno ed azoto dall'atmosfera. L'assorbimento di ossigeno ed idrogeno nella saldatura aumenta la sua resistenza a spese della tenacità. Anche eventuali impurità presenti sulla superficie possono essere assorbite nel bagno di fusione. Questi inconvenienti causano porosità e contaminazioni nel cordone di saldatura provocando una riduzione della resistenza meccanica. Generalmente il bagno di fusione è protetto da gas inerti utilizzando dispositivi dedicati. Elio e Argon, al 99% di purezza, sono i gas di protezione più utilizzati per proteggere la zona di saldatura dall'ossidazione e dalla contaminazione atmosferica. La sporcizia superficiale deve essere rimossa con un etching chimico prima dell'esecuzione della saldatura in modo da evitare l'infragilimento della giunzione.

L'introduzione della tecnologia laser nelle applicazioni ingegneristiche ha dato vita alle moderne tecnologie di saldatura come la tecnica di saldatura laser e la tecnica di saldatura ibrida. Le leghe di titanio possono essere saldate con diverse tecniche di saldatura e le più recenti sono la tecnica laser (LBW) e la tecnica ibrida laser-MIG (LAMIG). Nella tecnica di saldatura laser il fascio ad elevata energia è focalizzato in una piccola area ottenendo così una zona termicamente alterata ridotta in confronto con le altre tecniche di saldatura e un cordone di saldatura più regolare grazie al basso apporto di calore all'alta velocità di passata e all'elevata penetrazione. Le porosità e la qualità della superficie del cordone di saldatura dipendono dai parametri di processo. Il processo di saldatura può quindi essere analizzato in modo da trovare i parametri ottimali per la realizzazione di giunzioni di ottima qualità. L'elevata penetrazione e la ristretta zona termicamente alterata derivano dalle condizioni di keyhole, tipico del processo laser, che garantisce un'elevata concentrazione di energia. La tecnica di saldatura ibrida LAMIG può produrre giunzioni con una duttilità maggiore e minore durezza, rispetto alla tecnica laser [3]. Utilizzando i parametri ottimali è possibile comunque ottenere giunti di ottima qualità senza grandi difetti, ossidazioni superficiali e con ridotta porosità nella zona fusa.

La progettazione dei giunti saldati è piuttosto complicata perché il cordone di saldatura è una discontinuità geometrica che modifica la distribuzione delle tensioni. Le tensioni vicino al piede del cordone di saldatura sono più alte della tensione nominale e localmente possono anche superare il limite di snervamento. Il limite di fatica delle strutture saldate è influenzato da diversi fattori che interagiscono tra loro come la geometria locale e globale del cordone, le trasformazioni microstrutturali indotte dal riscaldamento e successivo raffreddamento del materiale, le tensioni residue. La resistenza a fatica si riduce notevolmente in presenza di difetti di saldatura, quindi la resistenza delle strutture saldate può essere definita come la resistenza a fatica della giunzione. .

In questo lavoro viene studiata la resistenza a fatica di giunti in Ti6Al4V di diversa geometria ottenuti con tecnica laser e tecnica ibrida. I giunti studiati sono di tipo testa a testa, a croce e a T.

MATERIALI E METODI

Il titanio grado 5 è una lega α - β con l'alluminio che è un elemento α -stabilizzante e il vanadio β -stabilizzante. Questa lega ha buone proprietà meccaniche sia a temperatura ambiente che alle alte temperature. La sua densità è di 4.4 kg/dm³ [2], la resistenza a trazione è di circa 980 MPa e la tensione di snervamento 760 MPa [4]. La Tab. 1 riporta le principali proprietà meccaniche.

A temperatura ambiente il titanio non legato ha una struttura cristallina esagonale chiamata fase α . Alla temperatura di 883 °C la struttura cristallina si modifica in una struttura cubica a corpo centrato chiamata fase β . La manipolazione di queste fasi cristallografiche con l'aggiunta di elementi di lega e con processi termomeccanici è la base per lo sviluppo di una grande varietà di leghe con diverse proprietà.

Tensione di snervamento [MPa]	Tensione di rottura [MPa]	Modulo di Young [MPa]	Allungamento percentuale a rottura [%]
760	980	110200	14

Tabella 1: Proprietà meccaniche Titanio Grado 5 [4].



Le impurità all'interno del materiale hanno una notevole influenza sulle temperature di trasformazione e sulle proprietà meccaniche del titanio. Elementi residui come carbonio, azoto, silicio e ferro aumentano la resistenza e riducono la duttilità del titanio commercialmente puro. In genere, i contenuti di ossigeno e ferro determinano il livello di resistenza del titanio non legato. Nei gradi più alti, l'ossigeno e il ferro vengono aggiunti intenzionalmente alle quantità residue già presenti nel materiale per fornire un'ulteriore resistenza. Carbonio e azoto, invece, vengono mantenuti ad un livello minimo per evitare l'infragilimento del materiale. L'alluminio è uno dei principali elementi α -stabilizzanti e nelle leghe di titanio, aumenta la resistenza a trazione e la resistenza al creep [1].

I processi di saldatura utilizzati per realizzare i giunti studiati in questo lavoro sono la tecnica laser (LBW) e la tecnica ibrida laser-MIG (LAMIG). Nella tecnica ibrida il fascio laser è combinato con l'arco elettrico MIG in modo tale da ottenere vantaggi da entrambi i processi. Il fascio laser permette di avere una maggiore penetrazione, mentre l'energia dell'arco elettrico permette di aumentare la velocità di passata. La potenza laser richiesta nella tecnica ibrida è inferiore rispetto alla potenza necessaria nella saldatura laser ed è possibile avere dei cicli termici meno severi. Con la tecnica ibrida possono essere superati alcuni svantaggi della tecnica laser, come la necessità di precisione nel posizionamento dei lembi da saldare e la scarsa capacità di supportare gap di una certa quantità, mantenendo comunque alcuni vantaggi, come la velocità di passata e la profondità di penetrazione.

In confronto alle giunzioni saldate laser, le giunzioni ottenute con tecnica ibrida hanno una migliore combinazione di resistenza e duttilità [3, 5] e presentano meno distorsioni.

La resistenza a fatica dei giunti saldati è inferiore confrontata con quella del materiale base a causa di diversi fattori che la influenzano come le trasformazioni microstrutturali, le tensioni residue, le distorsioni e i disallineamenti, i difetti di saldatura e la discontinuità geometrica del cordone.

In questo lavoro sono stati studiati diverse geometrie di giunti saldati in lega di titanio: giunti testa a testa, giunti testa a testa senza cordone di saldatura, giunti a T e giunti a croce. La Tab. 2 riporta il piano di prove con le diverse geometrie di giunti analizzate e relativa tecnica di saldatura.

Geometria giunto	Spessore piastra principale [mm]	Numero provini	Tecnica di saldatura
Testa a testa	3	5	Laser CO ₂
Testa a testa	3	11	Ibrida (Laser + MIG)
Testa a testa senza cordone	3	7	Ibrida (Laser + MIG)
a croce	3	24	Ibrida (Laser + MIG)
a T	3	7	Ibrida (Laser + MIG)

Tabella 2: Piano di prove – materiale: Titanio Grado 5.

Il cordone di saldatura, si presenta abbastanza regolare e di colorazione argentea per tutti i tipi di giunti, indice di assenza di ossidazione, buona protezione del bagno di fusione durante l'operazione di saldatura e corretti parametri di processo.

Nel processo di saldatura ibrida è stato utilizzato del materiale d'apporto avente la stessa composizione chimica delle piastre (lega Ti6Al4V). Il profilo del cordone dei giunti testa a testa, è stato misurato con un tastare meccanico MAHR ad alta precisione (sensibilità 1 μm). La Fig. 1 mostra i profili del lato superiore e inferiore del cordone ottenuto con saldatura ibrida e di quello ottenuto con saldatura laser.

Rispetto ai giunti saldati laser [4], i giunti in titanio saldati con tecnica ibrida non presentano undercut, ma il cordone di saldatura è più alto sia sul lato superiore che inferiore. Questo è dovuto sia alla diversa tecnica di saldatura, sia all'utilizzo di materiale d'apporto. Anche la larghezza del cordone di saldatura è maggiore e questo implica che una parte maggiore della piastra subisce un ciclo termico di saldatura più severo.

Una serie di provini sono stati testati a fatica dopo la rimozione del cordone di saldatura. Il cordone è stato rimosso in modo da eliminare l'effetto di concentrazione di tensione dovuta alla discontinuità geometrica. Tutti gli altri fattori che influenzano la resistenza a fatica, come le trasformazioni microstrutturali, i disallineamenti, e i possibili difetti di saldatura, restano immutati ad esclusione delle tensioni residue. Infatti, le tensioni residue in superficie subiranno delle variazioni in seguito all'operazione di rimozione del cordone e quindi non sarà possibile considerare il loro effetto sulla resistenza a fatica su questo tipo di giunti.

Dalle diverse piastre sono stati ricavati provini rettangolari, con la saldatura posizionata nella mezzeria del provino stesso. Le parti esterne delle piastre (circa 20 mm) sono state rimosse a causa di difetti e irregolarità di saldatura. Le diverse prove

di fatica sono state eseguite su una macchina servo-idraulica (SCHENCK capacità 250 kN) e su una macchina a risonanza (RUMUL Vibro-Forte capacità 500 kN) con ampiezza di carico costante e rapporto di sollecitazione pari a 0.1. Il carico è stato applicato con una frequenza di 15 Hz sulla macchina di prova servo-idraulica e di circa 60 Hz sulla macchina a risonanza. La direzione del carico è in direzione longitudinale al provino, ortogonalmente al cordone di saldatura, ad esclusione dei giunti a T che sono stati caricati a flessione.

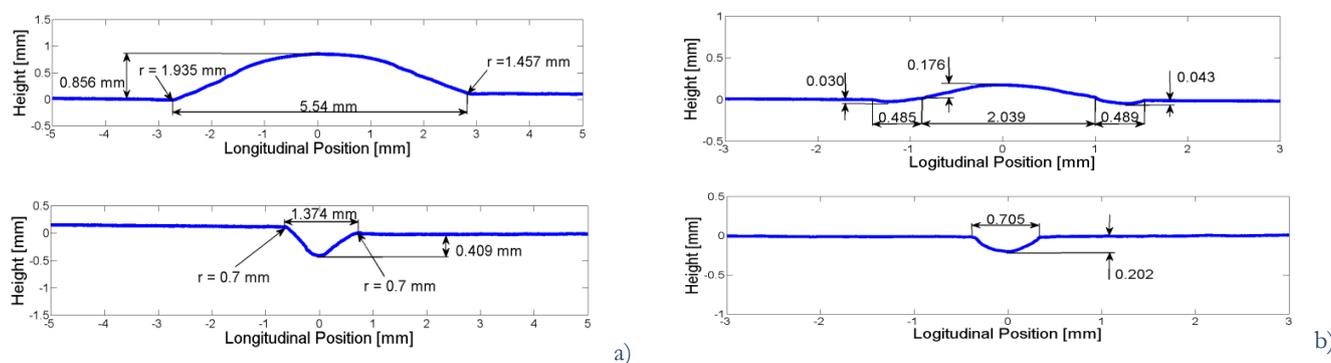


Figura 1: Profilo cordone di saldatura: a) Tecnica ibrida; b) Tecnica laser.

Prima dell'esecuzione della prova di fatica, su ogni provino sono stati incollati due estensimetri elettrici a resistenza su ogni lato del provino per poter misurare l'ampiezza di deformazione locale. Gli estensimetri utilizzati hanno una base di misura di 3 mm e sono stati posizionati con il loro asse trasversale distante 2.5 mm dal piede del cordone di saldatura. La posizione degli estensimetri deriva dalla necessità di valutare correttamente il campo di deformazione locale, che richiede misure in una zona molto vicina al cordone di saldatura, e l'utilizzo di una tecnica che sia facilmente utilizzabile in applicazioni industriali.

La progettazione delle strutture saldate è simile a quella delle comuni strutture. I meccanismi di rottura devono essere evitati con un'opportuna progettazione, scelta dei materiali e dimensionamento strutturale. Le strutture saldate, comunque, sono particolarmente vulnerabili al danneggiamento per fatica quando sono soggetti a carichi ripetitivi. Le cricche di fatica possono propagarsi in prossimità del cordone o di altri difetti di saldatura persino quando la struttura è soggetta a carichi modesti. Generalmente la resistenza a fatica dei giunti saldati non dipende principalmente dalla resistenza del materiale base, ma piuttosto dalla geometria globale e locale del cordone, dai difetti di saldatura, dai disallineamenti e tensioni residue, fattori che interagiscono tra loro. Il metodo Wel.Fa.Re. utilizza l'ampiezza di deformazione locale misurata al piede del cordone [6-10] come parametro significativo per la resistenza a fatica delle strutture saldate, in quanto esso include tutti gli effetti dei fattori influenti sulla vita a fatica del giunto. L'ampiezza locale di deformazione ε_a viene misurata prima dell'esecuzione del test di fatica applicando staticamente l'ampiezza di carico nominale:

$$\varepsilon_a = \frac{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}}{2} \quad (1)$$

Mentre l'ampiezza di sollecitazione nominale σ_a è:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2)$$

Esistono diversi approcci per studiare il comportamento dei giunti saldati. I metodi globali e l'analisi FEM possono caratterizzare la resistenza globale dei giunti, ma i loro modelli sono spesso troppo semplificativi e non considerano aspetti importanti come la disomogeneità di materiale dovuta alle trasformazioni microstrutturali, le tensioni residue dovute ai differenti gradienti di temperatura a cui è sottoposto il materiale e concentrazioni di tensione locale. Recentemente l'Eurocodice ha anche introdotto l'utilizzo del metodo Hot Spot, anche se vengono contemplati solo l'acciaio e le leghe di alluminio. La corretta valutazione della resistenza a fatica per geometrie complesse resta un argomento difficile e in alcuni casi solo i metodi locali basati su misurazioni sperimentali possono interpretare correttamente tutti i fattori che influenzano la resistenza delle strutture saldate.

RISULTATI

I test di fatica sono stati effettuati su una macchina servo-idraulica Schenck e una macchina a risonanza Rumul Vibro-Forte. Le diverse frequenze di lavoro permettono comunque di confrontare i risultati, in quanto la frequenza del carico applicato non influenza la resistenza a fatica se comunque inferiore ai 100 Hz.

Le rotture per fatica sono avvenute in zone diverse, a seconda del tipo di saldatura e di geometria del giunto. Per i giunti testa a testa saldati laser la rottura per fatica è avvenuta esclusivamente nel materiale base [4]. La presenza della saldatura sembra non influire sulla resistenza a fatica del giunto. Nei giunti testa a testa saldati ibridi, la rottura è avvenuta principalmente in corrispondenza del cordone di saldatura. Questi tipi di giunti, comunque, sono particolarmente suscettibili ad eventuali difetti di saldatura e spruzzi superficiali di materiale fuso. I giunti testa a testa saldati ibridi senza cordone di saldatura, presentano rotture o nel materiale base, o in corrispondenza del cordone di saldatura, indice che l'operazione di saldatura ibrida introduce difettosità all'interno del materiale. I giunti a T e a croce, invece, mostrano la rottura per fatica prevalentemente al piede del cordone di saldatura, dove è più alta la concentrazione di tensione a causa della discontinuità geometrica.

La figura mostra le curve di fatica espresse in termini di ampiezza di sollecitazione nominale σ_a -N e ampiezza di deformazione locale ϵ_a -N per i vari tipi di giunti studiati in questo lavoro.

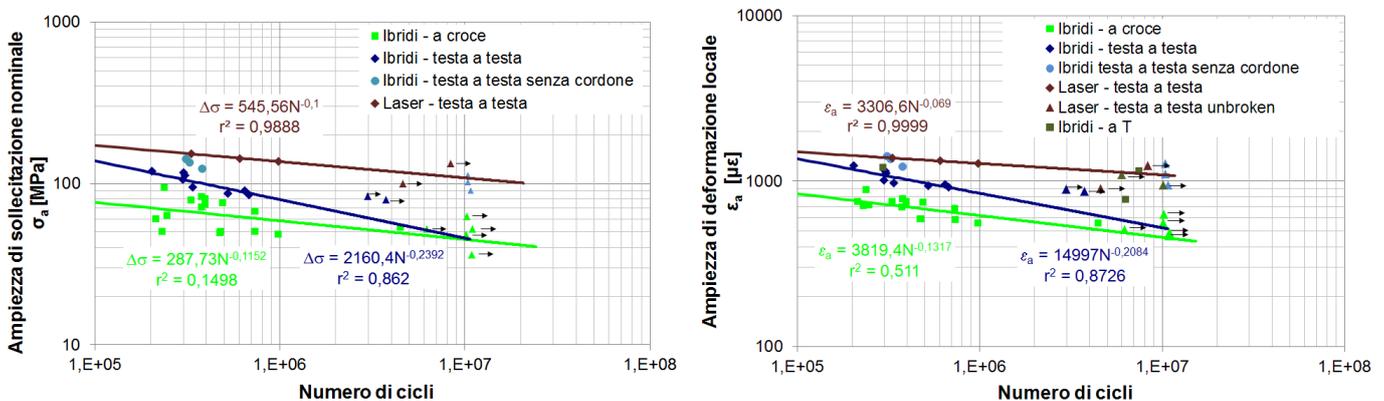


Figura 3: Curve di fatica in termini di ampiezza di sollecitazione nominale e ampiezza di deformazione locale per i giunti di diversa geometria in Titanio Grado 5.

La resistenza a fatica dei giunti a croce è ovviamente inferiore rispetto a quella dei giunti saldati testa a testa. Questo è dovuto ad una maggiore concentrazione di tensione al piede del cordone di saldatura. A parità di carico nominale applicato, la tensione locale in prossimità del cordone è maggiore nei giunti avente geometria cruciforme. Allo stesso modo, i giunti testa a testa saldati laser, possono sopportare carichi di fatica superiori ai giunti saldati con tecnica ibrida. Questo è dovuto sia al diverso profilo del cordone, come mostrato in Fig. 2, e di conseguenza ad una diversa distribuzione locale di tensione, sia alle diverse caratteristiche della zona fusa, dovuta ad una diversa tecnica di saldatura. I giunti senza cordone di saldatura hanno una resistenza a fatica più alta rispetto ai giunti saldati con tecnica ibrida con il cordone di saldatura. La loro resistenza a fatica è leggermente inferiore a quella dei giunti saldati laser in termini di ampiezza di sollecitazione. Considerando le deformazioni, invece, i giunti senza cordone presentano valori molto simili ai giunti saldati laser. Questo è dovuto sia al fatto che il cordone di saldatura ottenuto con tecnica laser genera concentrazioni di tensione più basse, sia per la particolare griglia estensimetrica utilizzata. Infatti la griglia da 3 mm è forse troppo grande per poter misurare correttamente il campo di deformazione locale, considerando lo spessore delle piastre (3 mm) e la dimensione del cordone (circa 2 mm – Fig. 2). Anche se le curve di fatica in termini di ampiezza di deformazione locale sono meglio correlate rispetto a quelle in termini di ampiezza di sollecitazione nominale, i valori di deformazione misurati sono mediati su un'area troppo grande rispetto alle caratteristiche dei giunti analizzati.

I piani di prove futuri prevedono l'utilizzo di estensimetri avente una base di misura da 1.5 mm e posizionati più vicini al piede del cordone, per poter caratterizzare meglio il campo di deformazione locale.

Per i giunti a T sollecitati a flessione non può essere fatta ancora nessuna osservazione, occorre un numero maggiore di prove che verranno eseguite in futuro. I profili dei cordoni rilevati, invece, saranno utili per la costruzione di un modello FEM di accurata precisione.



Generalmente nelle applicazioni industriali le strutture saldate vengono progettate secondo il metodo della tensione nominale, riferendosi ai dettagli strutturali e alle curve di fatica riportate nell' Eurocodice. I dettagli strutturali vengono identificati con la loro resistenza a fatica in corrispondenza a 2×10^6 cicli. Per giunti di geometria complessa, comunque, per i quali non esiste una classificazione all'interno della normativa e non è possibile definire una tensione nominale, è possibile applicare solo un metodo locale per la progettazione a fatica. Il metodo Wel.Fa.Re. essendo basato sulla deformazione misurata localmente prende in considerazione tutti i fattori che influenzano la resistenza a fatica dei giunti saldati. Per questo motivo i metodi locali possono fornire utili informazioni per tutti i casi non previsti dalla normativa.

CONCLUSIONI

In questo lavoro è stato analizzato il comportamento a fatica di giunti saldati in titanio grado 5 aventi diverse geometrie. Sono state tracciate le curve di fatica espresse in termini di ampiezza di sollecitazione nominale σ_a-N e ampiezza di deformazione locale ϵ_a-N secondo il metodo Wel.Fa.Re.: l'ampiezza di deformazione locale viene misurata applicando i carichi massimi e minimi della prova di fatica, tramite degli estensimetri elettrici a resistenza installati in prossimità del cordone di saldatura. Il metodo Wel.Fa.Re. è un metodo locale e presume che l'ampiezza di deformazione locale sia il parametro che descriva meglio il comportamento a fatica dei giunti saldati e possa dare utili indicazioni per geometrie complesse non contemplate nella normativa. L'ampiezza di deformazione locale racchiude tutti i fattori che hanno influenza sulla vita a fatica delle strutture saldate e che il metodo delle tensioni nominale non può considerare.

Dal confronto delle resistenze a fatica dei giunti in titanio grado 5 aventi diverse geometrie risulta che la configurazione geometrica del giunto e del profilo del cordone, e di conseguenza il relativo fattore di concentrazione di tensione, è il parametro che influenza maggiormente il comportamento a fatica dei giunti saldati di questo materiale.

Ulteriori sviluppi del metodo verranno analizzati studiando più in dettaglio il campo di deformazione locale, utilizzando estensimetri elettrici avente base di misura da 1.5 mm e posizionati più ad una distanza inferiore al piede del cordone di saldatura e verificando il campo di deformazione e di tensione locale con analisi FEM.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ASM International. ASM Handbook Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special – Purpose Materials, 2 (1992).
- [2] ASTM B265, Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Strip, Sheet and Plate. (2006).
- [3] R. Li, Z. Li, Y. Zhu, L.Rong, In: Materials Science and Engineering A, (2011) 528.
- [4] C. Casavola, C. Pappalettere, F. Tattoli, In: Mechanics of Materials, (2009) 41.
- [5] C. Li, K. Muncharua, S. Takao, H. Kouji, In: Materials and Design, (2009) 30.
- [6] V. Dattoma, R. Nobile, F.W. Panella, In: Proceedings of the International Conference New Trends in Fatigue and Fracture II, Hammamet (Tunisia) (2003).
- [7] C. Casavola, R. Nobile, C. Pappalettere, In: SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, Milwaukee, USA, (2002).
- [8] C. Casavola, R. Nobile, C. Pappalettere, In: SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, Charlotte, USA, (2003).
- [9] C. Casavola, R. Nobile, C. Pappalettere, In: Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, (2005) 28.
- [10] C. Casavola, C. Pappalettere, In: ICEM 12 International Conference on Experimental Mechanics, Bari, Italy (2004).