

COMPORTAMENTO A FATICA DI GIUNTI A SOVRAPPOSIZIONE FRICTION STIR WELDED

Fersini D.^a, Pironi A.^a, Dalle Donne C.^{b,}, Lagorio S.^a*

^aDipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli studi di Parma
Parco Area delle Scienze 181/A, 43100 Parma, Italia

^bEADS Deutschland GmbH, Corporate Research Center Germany, Dept. LG-MT
81663 München, Germania

*precedentemente DLR, WB-WF, Linder Höhe, 51147 Köln, Germania
E-mail: fersini@me.unipr.it , pirondia@me.unipr.it

SOMMARIO

L'oggetto di questo lavoro è la caratterizzazione a fatica di giunti a sovrapposizione in lega d'alluminio Al2024-T3 saldati con la metodologia Friction Stir Welding (FSW). I giunti caratterizzati in questo lavoro sono stati realizzati presso il Centro Aerospaziale Tedesco (DLR) di Colonia. L'attività sperimentale è completata con un'attività di modellazione agli elementi finiti utilizzando il codice Franc2D specifico per problemi di meccanica della frattura. La direzione di propagazione del difetto è stata simulata mediante il criterio della massima tensione circonferenziale all'apice e si è ricavato l'andamento di KI, KII in funzione della lunghezza di cricca durante la propagazione. La durata a fatica del giunto è stata valutata con il software AFgrow utilizzando i dati ricavati dalla modellazione FEM per integrare la cinetica evolutiva del difetto e la si è confrontata con quella ricavata sperimentalmente, riscontrando un buon accordo.

1.INTRODUZIONE

La Friction Stir Welding è un innovativo metodo di saldatura allo stato solido e senza materiale d'apporto sviluppato al TWI nel 1991. In questo processo si utilizza un utensile che presenta una spalla ed una punta (rapporto tra i diametri 1:3) leggermente più corta dello spessore dei pezzi da unire (vedi figura 1). Esso è posto in rotazione attorno al suo asse e la punta viene quindi forzata tra i lembi da saldare fino a realizzare il contatto tra spalla e superficie dei pezzi. La velocità di saldatura può raggiungere i 35 mm/s. Gli spessori delle superfici da saldare possono variare in un range da 1 a 40 mm. Il processo di saldatura si basa sull'energia che si sviluppa per attrito nel contatto tra la spalla rotante e le facce superiori dei pezzi da saldare. L'incremento di temperatura del materiale sotto la spalla ed intorno alla punta ne diminuisce la resistenza fino a valori inferiori agli sforzi tangenziali dovuti alla rotazione dell'utensile stesso, di conseguenza, mentre la punta dell'utensile si muove nella direzione di saldatura, la sua faccia anteriore, grazie ad uno speciale profilo, spinge il materiale plasticizzato verso il retro dell'utensile. La superficie dei pezzi da giuntare che viene a contatto con la spalla mostra una caratteristica struttura, simile a quella di una fresatura convenzionale (figura 1).

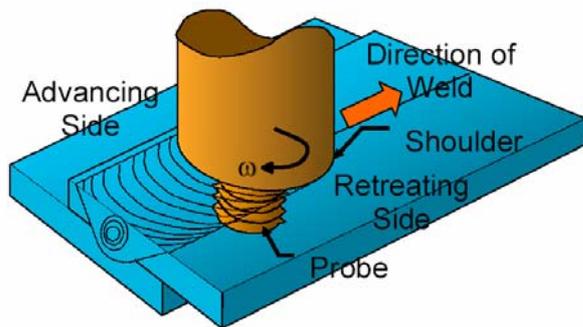


Figura 1: Schema del processo FSW [3].

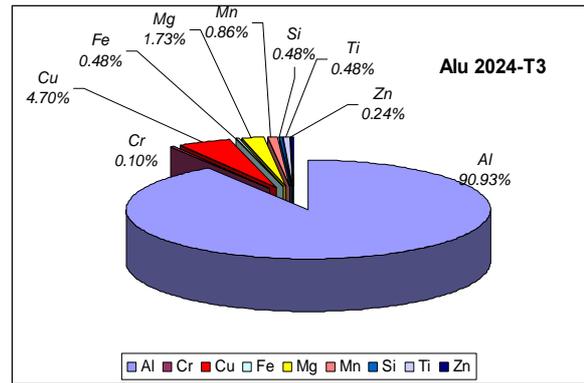


Figura 2: Composizione del materiale.

A causa della rotazione dell'utensile, la saldatura FSW non è simmetrica rispetto alla linea centrale del cordone di saldatura, il lato del giunto in cui la velocità di avanzamento e la velocità di rotazione dell'utensile si sommano è detto lato "advancing" (A), il lato dove le due velocità hanno segno opposto è detto "retreating" (R) (fig. 1). In un giunto saldato di testa c'è trasferimento del materiale dal lato R al lato A nella faccia superiore del giunto che scaturisce in un trasporto di materiale in direzione verticale. Un giunto a sovrapposizione saldato FSW presenta una certa peculiarità rispetto ai giunti saldati di testa: il diametro della punta dell'utensile è più piccolo rispetto alla lunghezza della zona di sovrapposizione delle due lamiere, per cui all'estremità della giunzione rimangono zone non saldate assimilabili a cricche lunghe (fig. 3-4) la cui lunghezza dipende dalle dimensioni della spalla. Precedenti lavori [2,3] hanno dimostrato che le dimensioni dell'interfaccia tra le lamiere, e la forma della zona terminale dei difetti causata dal rimescolamento del materiale hanno una forte influenza sulla resistenza a fatica del giunto.

Con la metodologia FSW si possono produrre giunti di eccellente qualità anche in quelle leghe di alluminio ad alta resistenza che sono difficilmente saldabili con altre tecniche, come Al2024-T3 o le leghe 7XXX.

Numerosi lavori hanno dimostrato che la resistenza a fatica dei giunti saldati FSW è prossima a quella del materiale base e notevolmente superiore rispetto a quella dei giunti saldati con tecniche tradizionali, tuttavia questi lavori sono relativi soprattutto a giunti saldati di testa. L'obiettivo di questo lavoro è invece la caratterizzazione di giunti FSW a sovrapposizione, di potenziale applicazione nell'ambito aeronautico civile o militare come alternativa ai giunti rivettati, rispetto ai quali le giunzioni a sovrapposizione FSW garantiscono in linea di principio un peso ed un costo inferiori.

2.MATERIALE E METODI.

In questo lavoro sono stati testati giunti a sovrapposizione FSW, prodotti presso il Centro Aerospaziale Tedesco (DLR) di Colonia (D) (fig. 3). Lo spessore delle lamiere è $t=1,6$ mm, la larghezza $b=20$ mm, mentre la sua lunghezza tra gli afferraggi è di 100 mm.

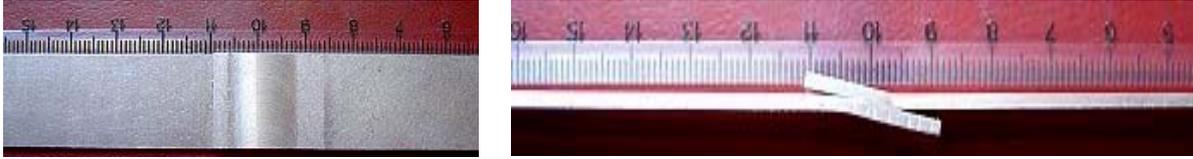


Figura 3: *Geometria del giunto. La figura a destra mostra il giunto dopo l'esecuzione di un test di trazione; si possono notare le zone non saldate assimilabili a cricche presenti all'interfaccia tra le lamiere.*

I giunti sono in lega d'alluminio ad alta resistenza Al2024-T3, la composizione del materiale è riportata in figura 2: oltre all'alluminio, il principale elemento di lega è il rame, la sigla T3 indica che questa lega è stata trattata termicamente, lavorata a freddo ed invecchiata artificialmente.

Alcune prove sono state condotte su una macchina MTS servoidraulica alla frequenza di 10 Hz, mentre le prove di lunga durata sono state condotte su un Vibroforo risonante Amsler alla frequenza di 70 Hz. La caratterizzazione a fatica del giunto è stata eseguita seguendo un approccio Staircase in cui si sono considerati run-outs i provini la cui durata N è maggiore od uguale a 10^7 cicli. Per eseguire la sperimentazione sono stati necessari 10 provini per il tratto a vita finita e 9 per la valutazione del limite di fatica. Il rapporto di carico utilizzato in tutte le prove è pari a $R=0.1$.

3.ANALISI FEM E MODELLO IN AFGROW.

L'utilizzo di un microscopio ottico e di uno a scansione ha permesso di acquisire con una certa precisione l'effettiva geometria della cricca all'interfaccia tra le lamiere (fig. 4): entrambe le cricche sono rivolte verso la parte alta della saldatura (da dove entra l'utensile), la cricca sul lato A ha una deviazione più pronunciata rispetto a quella del lato R. Entrambe le cricche sembrano comunque tendere a disporsi parallelamente alle lamiere nella parte terminale. La cricca sul lato A volge l'apice verso una zona dove le tensioni sono massime, viceversa la cricca sul lato R è rivolta in una zona scarica.

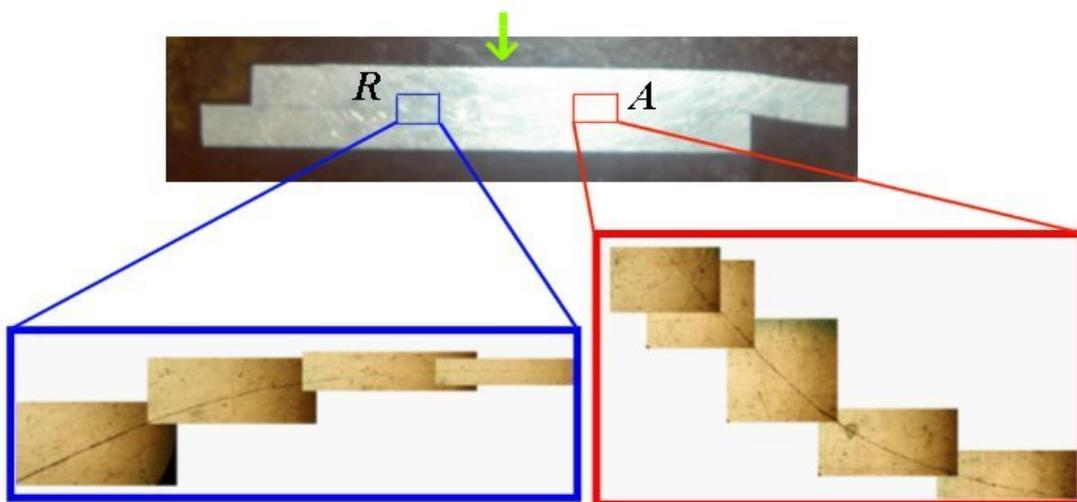


Figura 4: *Geometria effettiva della cricca all'interfaccia tra le lamiere sul lato avanzato e sul lato retratto.*

Lo stato tensionale in questa geometria è stato studiato con l'ausilio del software Franc2D, che permette di simulare la direzione di avanzamento della cricca a partire dalle condizioni iniziali (fig. 5) ed ottenere l'andamento di KI, KII all'apice della cricca durante la propagazione.

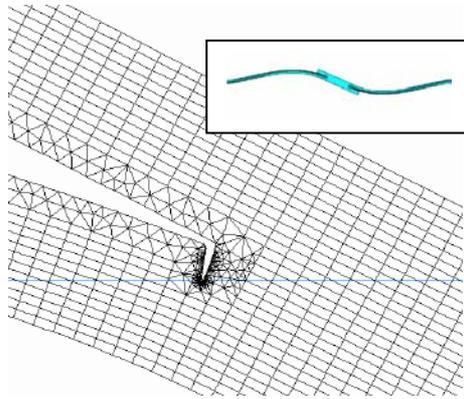


Figura 5: Esempio di modello di avanzamento del difetto realizzato con Franc2D.

La conoscenza della direzione di propagazione della cricca, della sua geometria e del K in funzione del carico applicato al variare della lunghezza della cricca ha permesso di studiare la cinetica evolutiva del difetto con l'utilizzo del software AFgrow. Simulazioni preliminari condotte con Franc2D hanno dimostrato che le due cricche sono abbastanza lontane da non interagire tra loro. Per ricondurre la geometria del difetto al modello di cricca di spigolo sollecitata in Modo I presente in AFgrow si è considerata la sua proiezione a_y in direzione dello spessore della lamiera. Per quanto riguarda le proprietà di resistenza alla propagazione di difetti della lega Al2024-T3 sono stati presi i valori già inseriti nel database di AFgrow, considerando due diversi modelli comportamentali, il modello NASGRO ed il modello HARTER-T.

4. RISULTATI SPERIMENTALI E CONFRONTO CON I MODELLI.

Si sono condotte innanzitutto due prove di resistenza statica al fine di valutare il campo di funzionamento elastico del giunto, che è risultato essere pari a ca. 3kN (v. riquadro in fig. 7), cioè $\sigma = P/bt = 95\text{MPa}$ nominali. La rottura avviene dopo una ampia fase di deformazione plastica ad un valore $\sigma = 345\text{MPa}$, che rappresenta ca. l'80% delle resistenza del materiale base. Di conseguenza come massimo livello di carico per le prove a fatica è stato assunto il valore di 2 kN.

Tutti i giunti hanno presentato le stesse modalità di rottura, a partire dalla zona della cricca sul lato avanzato (fig. 6) in direzione perpendicolare a quella della massima tensione.

In figura 7 i risultati delle prove effettuate sui giunti FSW a sovrapposizione sono confrontati con dati di letteratura del materiale base, di giunti FSW saldati di testa e di giunti rivettati. Per i giunti a sovrapposizione le tensioni nominali sono uguali a $\sigma_{\text{nom}} = P/(b*t)$, le tensioni effettive sono $\sigma_{\text{eff}} = P/(b*t_{\text{eff}})$, essendo t_{eff} lo spessore effettivo della lamiera ridotto a causa della presenza della cricca, in questo caso lo spessore reale è circa 1,1 mm, in virtù di questo le tensioni efficaci superano di un 30% le tensioni nominali.

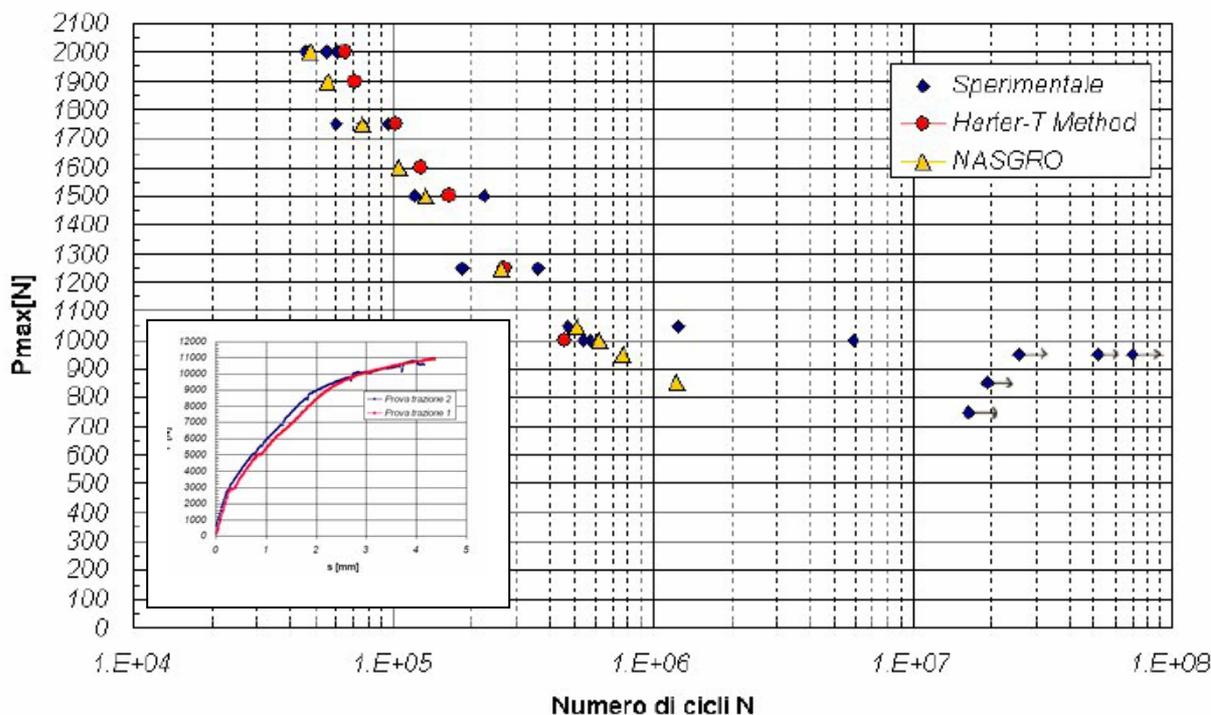


Figura 8: Risultati delle prove sperimentali e della previsione della vita a fatica realizzata con il software AFgrow. Nel riquadro sono riportati i risultati delle prove quasi-statiche.

I risultati delle prove condotte sono riportati in figura 8 nei termini della forza massima applicata in funzione della durata. Il limite di fatica è stato valutato in 970 N. I risultati ottenuti con la modellazione numerica utilizzando il modello Harter-T sono molto simili a quelli sperimentali. Per quanto riguarda il modello NASGRO si è ottenuta una buona corrispondenza con i risultati sperimentali inserendo nel database di AFgrow il valore di soglia di propagazione $\Delta K_{th}=1,6\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, riportato nell'Eurocodice9 per la lega Al2024, al posto del valore inizialmente presente di $3\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$. Tuttavia rimane da chiarire se la resistenza a fatica di questi giunti sia prevedibile con un approccio "damage tolerant" o con un approccio di fatica, infatti, nonostante i modelli in AFgrow abbiano fornito risultati molto simili a quelli sperimentali in termini di previsione della vita residua a fatica, la dispersione statistica dei risultati induce a pensare che la vita a fatica sia il tempo necessario per la nucleazione di un difetto in grado di propagare. Ulteriori analisi sono necessarie per comprendere pienamente la dinamica della resistenza a fatica di questi giunti.

CONCLUSIONI.

Giunti a sovrapposizione saldati FSW sono stati caratterizzati dal punto di vista della resistenza a fatica: i risultati mostrano che, in termini di tensione nominale, il limite di fatica è molto simile a quello dei giunti rivettati, ed è dell'ordine del 20% di quella del materiale base e dei giunti FSW saldati di testa; rimane ancora da chiarire se la vita residua a fatica sia il tempo necessario per la propagazione della cricca all'interfaccia tra le lamiere o piuttosto ci sia un fenomeno di nucleazione e propagazione di un altro difetto alla radice della zona saldata.

Riferimenti

- [1] W. M. Thomas, K. I. Johnson e C. S. Wiesner “Friction Stir Welding- Recent developments in tool and process technologies”, pp 485-490, Advanced Engineering Materials 2003, 5, No 7.
- [2] L. Cederqvist e P. Reynolds “Factors affecting the properties of Friction Stir Welded Aluminium Lap Joints”
- [3] Colegrove,H.R. Shercliff, T Hyoe “Development of Trivex™ Friction Stir Welding Tool for making lap welds”, 5th International Symposium on Friction Stir welding , Metz, France , 14-16 Settembre 2004