

CARATTERIZZAZIONE MECCANICO-STRUTTURALE DI GIUNZIONI FRICTION STIR TRA LE LEGHE AA5754 H32 E AA2024 T3

M. Ponte, E. Lertora, C. Gambaro

Nella memoria sono presentati i risultati relativi alla caratterizzazione meccanica e microstrutturale di giunti, tra differenti leghe di alluminio, realizzati con tecnologia Friction Stir Welding.

I materiali interessati dal processo di giunzione sono due leghe di alluminio (AA2024 T3 e A5754 H32), entrambe in forma di laminati di spessore pari a 3mm.

La caratterizzazione strutturale è consistita sia nell'esecuzione di indagini radiografiche, sia nell'analisi macro e microstrutturale dei cordoni; tali esami hanno permesso di analizzare le zone significative delle giunzioni e verificare l'assenza di difetti.

Al fine di determinare la duttilità dei giunti, sono state effettuate prove di microdurezza Vickers HV0,2, a diversi livelli sullo spessore delle piastre.

La caratterizzazione meccanica è proseguita con i test di trazione eseguiti a temperatura ambiente su provini ricavati trasversalmente al giunto. Le superfici di frattura ottenute dalle precedenti prove sono state caratterizzate utilizzando uno stereoscopio.

PAROLE CHIAVE:

INTRODUZIONE

Friction Stir Welding (FSW) è un procedimento di saldatura allo stato solido principalmente utilizzato per realizzare giunti tra materiali difficilmente saldabili con le convenzionali tecniche fusorie. [1]

La tecnologia FSW, inventata nel 1991 dal TWI di Cambridge, permette di saldare leghe di alluminio [2], materiali compositi a matrice metallica [3-6] ed altre leghe leggere [7] anche diverse tra loro nella composizione chimica e nello stato di fornitura.

Mediante questa tecnologia si ottengono giunzioni aventi ottime caratteristiche meccanicostrutturali e si ha la

possibilità di attuare una piena automazione del procedimento. Inoltre la particolarità del processo, che risulta molto simile ad una lavorazione meccanica, consente un notevole risparmio in termini di sistemi di sicurezza e protezione dell'operatore rispetto alle convenzionali tecnologie di saldatura.

Per questi motivi, la tecnologia FSW apre le porte delle officine meccaniche al mondo della saldatura e delle giunzioni, costituendo un forte "link" tra la meccanica di precisione e la carpenteria.

La tecnologia FSW può essere applicata utilizzando stazioni fresanti universali di serie [8], centri di lavoro per asportazione di truciolo cartesiani o robotizzati, o macchine appositamente progettate.

La tecnologia si avvale dell'utilizzo di un particolare utensile (Fig. 1) che fornisce sia il calore necessario alla plasticizzazione del materiale sia il movimento utile a rimescolare il materiale plasticizzato ed a generare la giunzione.

M. Ponte, E. Lertora, C. Gambaro

Dipartimento di Ingegneria della Produzione, Termoenergetica e Modelli Matematici (DIPTM), Università degli Studi di Genova, Facoltà di Ingegneria, Genova



▲
Fig. 1

Esempio di utensile per saldature FSW.

Example of FSW shouldered pin tool.

La richiesta delle aziende che, sempre più frequentemente, devono realizzare strutture composte da materiali con caratteristiche meccanico-chimiche differenti ha dato spunto a questa ricerca che studia la fattibilità di giunzioni tra leghe di alluminio diverse.

MATERIALI

Durante lo studio oggetto del presente articolo, la tecnologia FSW è stata utilizzata per giuntare piastre di dimensioni pari a 300x100x3 mm, di due tradizionali leghe di alluminio: una da trattamento termico, la AA2024 T3, ed una da incrudimento meccanico, la AA5754 H32.

La prima è una lega alluminio-rame, caratterizzata da una eccellente lavorabilità alle macchine utensili, una elevata resistenza meccanica unita ad un'ottima tenacità e un'elevata resistenza alle alte temperature. La AA2024 T3 è perciò utilizzata per la realizzazione di particolari strutturali aeronautici ed elementi meccanici critici in genere, nonché particolari strutturali in ambito automo-

bilistico.

La AA5754 H32 è una lega alluminio-magnesio, caratterizzata da eccellenti caratteristiche di resistenza alla corrosione in ambiente marino, presenta formabilità elevata ed è saldabile per fusione. La sua resistenza a trazione è circa la metà di quella della lega AA2024 T3. Per le sue caratteristiche è utilizzata per realizzare recipienti in pressione, componenti di autocarri ed autocisterne, particolari di impianti chimici e nelle costruzioni navali.

Le composizioni chimiche dei due materiali oggetto dello studio sono riportate in Tab. 1.

Entrambi i materiali trovano comune applicazione nella costruzione di carrozze ferroviarie, chassis di autovetture e container; inoltre, nell'industria militare, vengono usati per la costruzione di veicoli leggeri e moduli mobili per insediamenti operativi.

PROCEDURA SPERIMENTALE

La ricerca oggetto del presente studio è consistita nella realizzazione e nella caratterizzazione meccanica e strutturale di giunzioni realizzate utilizzando lamiere di AA2024 T3 e di AA5754 H32, ricavate rispettivamente in direzione parallela e perpendicolare al verso di laminazione.

Durante l'esecuzione delle saldature il materiale con caratteristiche meccaniche più elevate, cioè l'AA2024 T3, è sempre stato posto all'Advancing Side. In questa posizione i vettori velocità di avanzamento e di rotazione dell'utensile risultano concordi e quindi si ha un maggiore apporto termico, fattore che garantisce l'ottenimento di giunzioni aventi caratteristiche meccaniche migliori [9-11].

Studi precedenti avevano permesso di individuare per le leghe 2xxx un passo di saldatura ottimale di 0,13 mm e per leghe della serie 5xxx un passo ottimale di 0,35 mm: l'applicazione di questi parametri ha dato origine a giunti con efficienze dell'ordine dell'80% per leghe 2xxx e del 70% per leghe 5xxx.

AA2024	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
T3	90,7 - 94,7	< 0,1	3,8 - 4,9	< 0,5	1,2 - 1,8	0,3 - 0,9	< 0,5	< 0,15	< 0,25

AA5754	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
H32	93,6 - 97,3	< 0,3	< 0,1	< 0,4	2,6 - 3,6	< 0,5	< 0,4	< 0,15	< 0,2

▲
Tab. 1

Composizione chimica delle leghe AA2024 T3 e AA5754 H32.

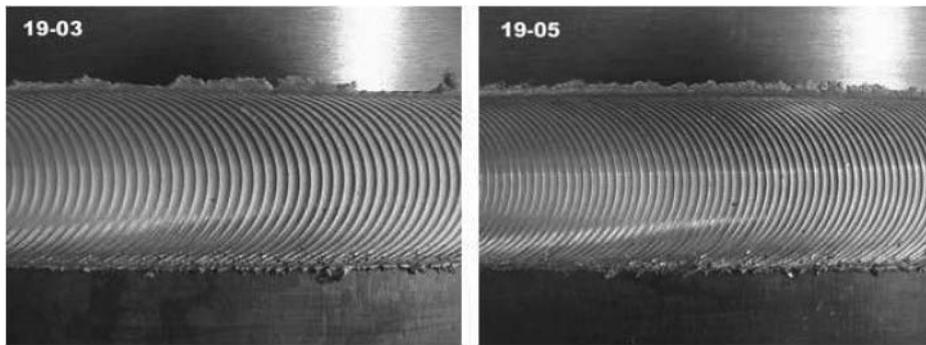
Chemical composition of AA2024 and AA5754.

Numero Prova	19-01	19-02	19-03	19-04	19-05	19-06	19-07	19-08
Passo[mm]	0,348	0,515	0,787	0,369	0,565	0,412	0,619	0,130

▲
Tab. 2

Passi di saldatura utilizzati per l'esecuzione dei giunti.

Weld pitches adopted to realize the joints.



Dopo la realizzazione dei giunti si è passati alla fase di caratterizzazione.

CARATTERIZZAZIONE DELLE GIUNZIONI

La caratterizzazione strutturale delle giunzioni è consistita per prima cosa nell'esame visivo che ha evidenziato l'ottima finitura superficiale di tutti i giunti: la produzione di flash laterale è infatti minima. Su nessun giunto sono stati riscontrati difetti superficiali evidenti; l'unico dato significativo è la

▲
Fig. 2

Aspetto superficiale di un giunto ottenuto con WP paria 0,787 mm (19-03) e 0,565 mm (19-05).
Visual tests and weld pitch measuring (19-03: WP=0,787 mm; 19-05: WP=0,565 mm).

La sostanziale differenza dei valori ottimali dei parametri di saldatura da adottare sulle due leghe ha reso impossibile individuare a priori un passo di saldatura e per questo motivo è stato necessario effettuare una campagna sperimentale.

I giunti, realizzati con una fresatrice ARNO-NOMO F3, avente potenza al mandrino di 10 kW, sono stati eseguiti adottando passi di saldatura variabili tra 0,13 e 0,78 mm (Tab. 2) in modo tale da generare differenti apporti termici.

Tutte le prove sono state effettuate con tilt angle di 2°, ed il tempo di preriscaldamento è stato mantenuto pari a 5s.

L'utensile utilizzato è composto da una spalla concava di diametro 12mm, in acciaio C40, e da un pin conico filettato destrorso a passo 0,5mm, di lunghezza 2,8mm, in materiale HSS con durezza maggiore di 55 HRC. Attraverso la caratterizzazione dei giunti è stato individuato un passo di saldatura che consentisse l'ottenimento di giunti aventi caratteristiche meccanico-strutturali elevate, prossime a quelle della lega più debole (serie 5xxx).

La correlazione tra la qualità di un giunto e l'apporto termico ad esso fornito è alla base di tutte le teorie sulla saldatura, sia ad arco sia allo stato solido. Nel processo FSW l'apporto termico è legato al passo di saldatura secondo le seguenti formule (1-3), [12]:

(1) $P = 2 \text{ RPM} (\tau / 60) \text{ [W]}$

(2) $HI = f \cdot (P / TR) \text{ [J/cm]}$

(3) $WP = TR / \text{RPM} \text{ [mm]}$

Con una semplice sostituzione (4) è possibile individuare la dipendenza dell'apporto termico dal passo di saldatura:

(4) $HI = f \cdot (2 \tau / 60 WP) \text{ [J/cm]}$

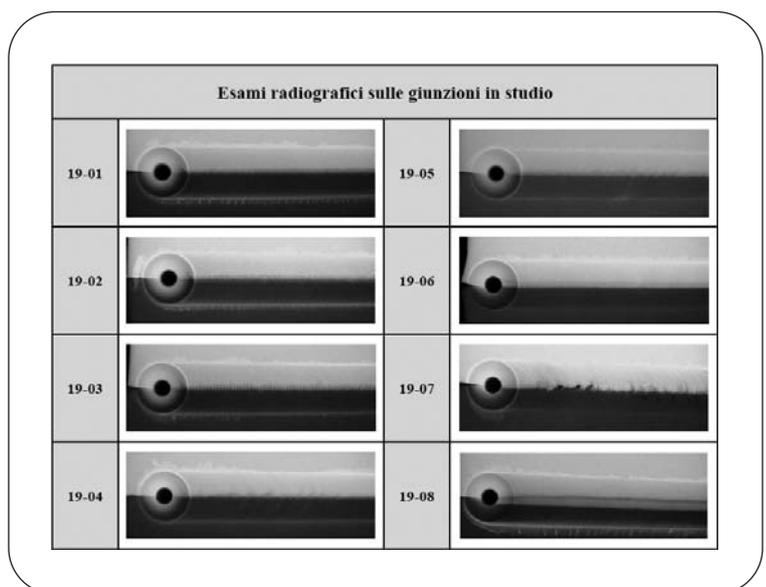
In queste equazioni P rappresenta la potenza apporata in Watt, RPM la velocità di rotazione in giri/min, τ il momento torcente, HI l'apporto termico fornito, TR la velocità di avanzamento in mm/min, f l'efficienza del processo e della macchina e WP è il passo di saldatura in mm.

variazione di finitura superficiale a seconda del passo di saldatura adottato (Fig. 2)

L'esame radiografico (Tab. 3) ha messo in evidenza possibili difettosità nella parte finale del giunto 19-07 e su tutto il giunto 19-08. In entrambi i casi si è subito ipotizzata la presenza di un difetto tipico della saldatura FSW denominato tunnel. Bisogna però osservare che l'analisi radiografica di giunzioni tra leghe dissimili trae spesso in inganno a causa della differente radio trasparenza dei materiali giuntati.

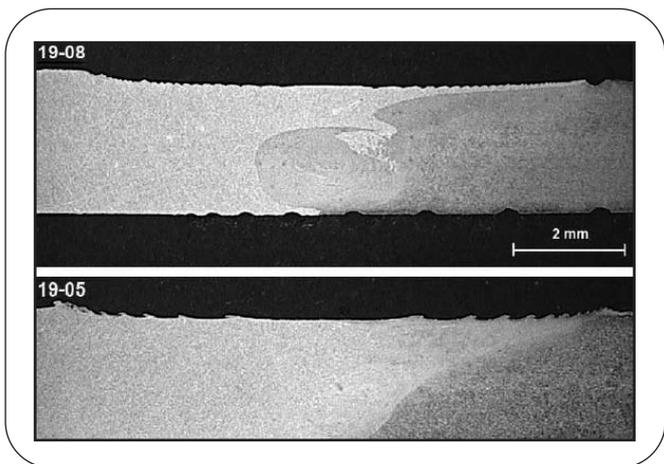
Nel caso in esame, la lega AA2024 risulta più opaca ai raggi X rispetto alla lega AA5754 in quanto ricca di leganti aventi maggiore peso atomico. Per tale motivo, l'esame radiografico deve essere sempre accompagnato da un esame visivo e possibilmente anche macrografico. A seguito di queste ultime osservazioni, l'area più scura nella radiografia del giunto 19-07 è stata giustificata dalla cattiva finitura superficiale del tratto finale, dovuta ad un calo del carico sull'asse Z, causato dalla riduzione di spessore della lega AA2024 T3.

Il difetto notato sul giunto 19-08 è invece da attribuirsi al



▲
Tab. 3

Esami radiografici.
Radiographic tests.



▲
Fig. 3

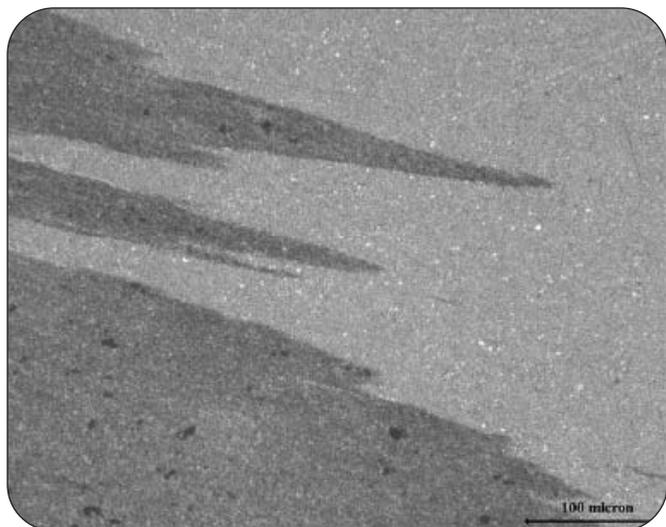
Macrografie dei giunti 19-08 e 19-05. Ingrandimento 12,5x.
Macrographic analysis on 19-08 and 19-05 joints. Magnification 12,5x.

Dimensione e forma dei grani (AA2024 T3)			
	A [μm]	B [μm]	forma
N	1-3	1-3	arrotondata
ZTMA	75	10	allungata
ZTA	60	20-25	---
MB	60	20	---

▲
Tab. 4

Dimensione e forma dei grani (lega AA2024 T3).
Shape and dimension of the grains (AA2024 T3).

rimescolamento dei due materiali nel nugget, fatto che spiega la banda di colore intermedio tra le due leghe. L'analisi macrografica, condotta attaccando le sezioni trasversali ai giunti con il reagente di Keller per un tempo pari a 20s, ha mostrato chiaramente la struttura sul lato "advancing", ove è presente la lega AA2024 T3,



▲
Fig. 4

Nugget del giunto 19-05. Ingrandimento 200x.
Nugget of the weld 19-05. Magnification 200x.

mentre non ha consentito di apprezzare a pieno le differenti zone sul lato "retreating"; inoltre l'analisi ha messo in luce un buon rimescolamento ed una buona penetrazione dell'utensile su tutti i giunti.

In Fig. 3 sono riportate le macrografie di due giunti: il 19-05 presenta un nugget non ben definito con una forma molto allungata e sbilanciata sul lato della lega AA2024; questa struttura, caratteristica di quasi tutte le saldature realizzate nel corso della ricerca, si differenzia da quella del giunto 19-08 che presenta un nocciolo arrotondato e centrato sull'asse di saldatura.

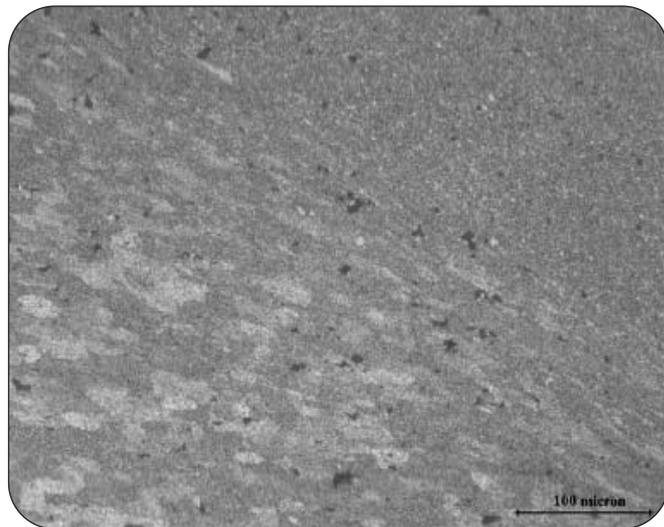
Nella macrografia del giunto 19-08 risultano chiaramente individuabili gli onion rings che costituiscono la tipica struttura del nugget di una saldatura Friction Stir.

Le analisi micrografiche hanno evidenziato le differenti granulometrie presenti nelle varie zone di saldatura (Tab. 4). Infatti le elevate temperature e le deformazioni plastiche imposte dall'operazione di estrusione che avviene durante saldatura Friction Stir, danno origine ad una struttura granulare molto fine e compatta nella zona centrale del giunto. I grani presenti nel nugget (N) (Fig. 4) sono di dimensioni molto inferiori ed arrotondati rispetto a quelli delle Zone Termicamente Alterate (ZTA) e Termo-Meccanicamente Alterate (ZTMA) (Fig. 5) e dei Materiali Base (MB) (Fig. 6).

In accordo con tutti i dati reperibili in bibliografia [13-14], i grani delle ZTMA risultano allungati ed orientati quasi verticalmente, fatto dovuto al moto rotatorio ed al contempo verticale del materiale plasticizzato.

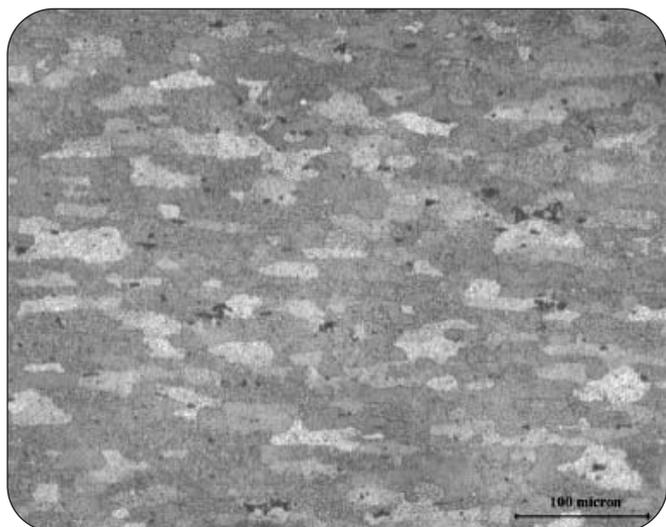
Oltre a questo, è possibile notare un buon ancoraggio meccanico tra le due leghe: grazie all'utilizzo del pin filettato l'interfaccia risulta molto frastagliata, e priva di lacune o difettosità (Fig. 4).

Le prove di microdurezza Vickers HV 0,2 sono state effettuate trasversalmente al giunto, su due linee parallele poste rispettivamente ad 1 e 2 mm di profondità dalla superficie del giunto. L'acquisizione di due profili di durezza si è resa necessaria a causa dell'utilizzo di un utensile avente un pin a geometria conica, che ha generato bande termicamente alterate molto inclinate e di lar-



▲
Fig. 5

ZTMA del giunto 19-05. Advancing side. Ingrandimento 200x.
ZTMA of the weld 19-05. Advancing side. Magnification 200x.



▲
Fig. 6

MB del giunto 19-05. Advancing side. Ingrandimento 200x.
MB of the weld 19-05. Advancing side. Magnification 200x.

ghezza variabile con la profondità.

Le variazioni di durezza si mantengono comprese in un range che va dal valore minimo di 69 HV, registrato nella ZTMA della lega AA5754 H32, ad un massimo di 147 HV, registrato nel MB della lega AA2024 T3. In tutti i test, il valore minimo è stato registrato nella ZTMA (al lato

Materiale	Carico di rottura medio [MPa]
AA2024 T3	487,6
AA5754 H32	245,5

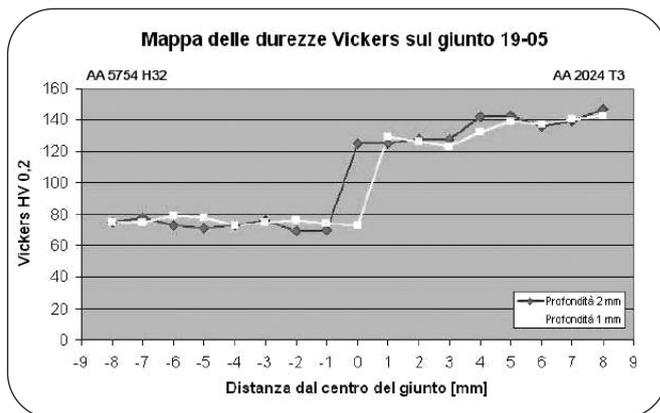
▲
Tab. 5

Risultati delle prove di trazione sui materiali base.
Base material tensile test results.

Numero Prova	Carico di rottura medio [MPa]	Zone di Rottura dei provini
19-01	229,30	N (su 2 provette) ZTMA Retr Side(su 1 provetta)
19-02	219,70	N (su 3 provette)
19-03	214,76	N (su 3 provette)
19-04	234,46	N (su 2 provette) ZTMA Retr Side(su 1 provetta)
19-05	237,16	N (su 2 provette) ZTMA Retr Side(su 1 provetta)
19-06	221,80	N (su 3 provette)
19-07	227,60	N (su 1 provetta) ZTMA Retr Side(su 2 provette)
19-08	113,76	N (su 3 provette)

▲
Tab. 6

Risultati delle prove di trazione sui giunti.
Weld tensile test results.



▲
Fig. 7

Mapa delle durezza Vickers HV 0,2 sul giunto 19-05.
Hardness map (HV 0,2) on the weld 19-05.

“retreating”).

Come si nota nella mappa riportata in Fig. 7, se si confrontano gli andamenti delle curve rilevate ad 1 e 2 mm di profondità, risulta che la brusca variazione di durezza si sposta sempre più verso sinistra. Questo è dovuto all’utilizzo, durante saldatura, di un pin conico e concorda pienamente con le macrografie di figura 3 (giunto 19-05) dove si nota un nugget spostato verso destra (lato Advancing) in prossimità della superficie.

Le prove di trazione, effettuate su provette a normativa UNI EN 10002, sono state condotte su una macchina “Zwick Materialprüfung 1475” attrezzata con afferraggi autobloccanti e cella di carico capace di registrare carichi fino ad un massimo di 100kN.

Al fine di confrontare la resistenza dei giunti con quella dei materiali base, sono state effettuate prove preliminari sia sulla lega AA2024 T3 sia sulla lega AA5754 H32. Sono stati utilizzati provini ricavati rispettivamente in direzione perpendicolare e parallela al verso di laminazione, in base al posizionamento delle lamiere al momento della realizzazione delle giunzioni.

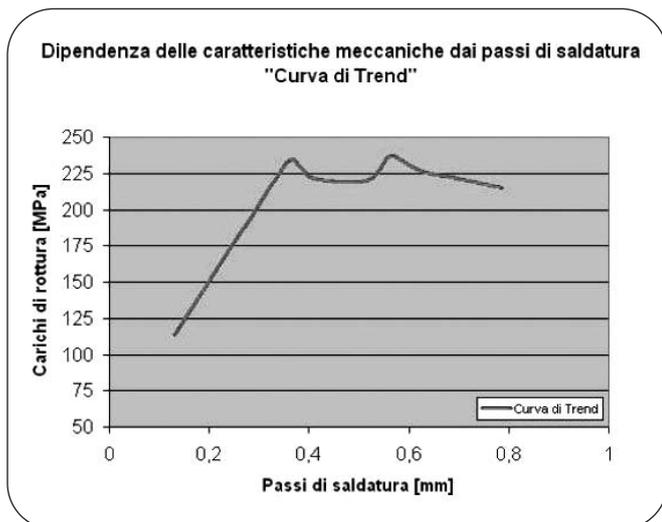
I risultati di queste prove preliminari sono riportati in Tab. 5.

Da ogni giunto sono stati ricavati, trasversalmente alla saldatura, tre provini di trazione sui quali è stata eseguita una prova a velocità costante e pari a 5 mm/min.

Tutti i campioni sono stati prelevati nella seconda metà del giunto in modo da non essere influenzati dal transitorio termico che implica un decadimento delle caratteristiche meccaniche della saldatura.

I risultati delle prove hanno evidenziato valori molto simili nella maggior parte dei casi, mostrando scarti medi molto ridotti sulle singole terne. In Tab. 6 sono riportati i carichi di rottura medi su ogni giunto e le zone dove è avvenuta rottura. Infatti, molto spesso, pur presentando carichi molto simili, i tre provini ricavati da ogni giunto hanno presentato zone di rottura a volte coincidenti con il centro del giunto e a volte con la ZTMA del materiale avente caratteristiche meccaniche inferiori (lega 5xxx).

Sulla quasi totalità dei giunti, ad eccezione del 19-08, i valori hanno raggiunto l’80% del carico di rottura della lega AA5754 H32. I giunti migliori sono risultati il 19-04 ed il 19-05, entrambi realizzati con velocità di rotazione pari a 460 giri/min, per tali saldature l’efficienza ha sfiorato



▲
Fig. 8

Curva Carichi di rottura - Passi di Saldatura.

Weld pitch - tensile strength relation curve.

rato il 90% rispetto alla lega AA5754 H32.

Se si analizzano i risultati in termini di "passi di saldatura" (Fig. 8), è possibile notare come siano stati ottenuti valori più elevati rimanendo nel range tra 0,348 mm e 0,619 mm e questo denota l'importanza di dare un corretto apporto termico al giunto.

E' stata inoltre osservata una dipendenza molto marcata tra la resistenza a trazione del giunto e la velocità di rotazione dell'utensile questo a dimostrare che oltre all'apporto termico è di fondamentale importanza garantire uno "stirring" corretto.

CONCLUSIONI

La ricerca ha dimostrato che la tecnologia FSW permette di realizzare giunzioni strutturali di tipo eterogeneo ed omogeneo di materiali finora considerati impossibili da saldare con le tradizionali tecniche per fusione, quali la lega AA2024 T3.

La tecnologia FSW, basata sulla plasticizzazione e sul rimescolamento del materiale base, permette di ottenere zone saldate caratterizzate da struttura omogenea ed a grana fine, consentendo quindi di realizzare giunzioni di elevata qualità, come è confermato dall'esame macro e micrografico.

Le prove di trazione e di microdurezza hanno evidenziato la stretta relazione che intercorre tra le caratteristiche meccaniche e gli apporti termici forniti al materiale, relazione che è esplicita dalle curve che mettono in relazione i passi di saldatura con le caratteristiche tensili dei giunti.

Tali prove hanno evidenziato una buona resistenza dei giunti nel range di passi di saldatura che va da 0,348 a 0,619 mm.

Da tutte queste informazioni si possono ricavare i parametri (velocità di rotazione e di avanzamento) con cui è possibile ottenere giunzioni di buona qualità. (Fig. 9).

I rombi identificano i parametri che hanno dato origine a giunti esenti da difetti micro e macrografici e che hanno presentato ottime caratteristiche meccaniche, del tutto

confrontabili con quelle del materiale base della serie 5xxx.

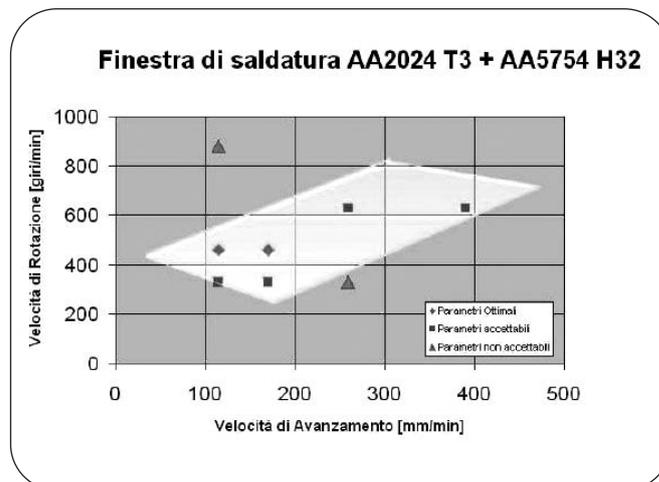
I quadrati identificano i parametri che hanno dato origine a giunti aventi caratteristiche accettabili, cioè saldature che, oltre ad essere esenti da difetti micro e macrografici, hanno presentato caratteristiche meccaniche buone e prossime a quelle del materiale meno resistente.

I triangoli identificano i parametri che hanno dato origine a giunti aventi caratteristiche non accettabili, cioè giunti che hanno presentato basse efficienze di saldatura anche se non presentano difetti strutturali.

Questo dimostra la concreta possibilità di realizzare strutture bimetalliche mettendo in grado i progettisti di ottimizzare l'utilizzo dei materiali al fine di ridurre i tempi, i costi e la qualità dei prodotti.

BIBLIOGRAFIA

- [1] www.twi.co.uk.
- [2] R.S.MISHRA, Z.Y. MA, "Friction Stir Welding and Processing", Materials Science and Engineering, R50, Agosto 2005, pgg.1-78.
- [3] D. STORJOHANN, S.S. BABU, S.A. DAVID, P. SKLAD, "Friction Stir Welding of Aluminium Metal Matrix Composites", <http://www.ornl.gov/~webworks/cppr/y2001/pres/114598.pdf>.
- [4] L.M. MARZOLI, A.V. STROMBECK, J.F. DOS SANTOS, C. GAMBARO, L.M. VOLPONE, "Friction stir welding of an AA6061/Al2O3/20p reinforced alloy", Composites Science and Technology, (2005), pgg. 363-371
- [5] L. CESCHINI, A. CASAGRANDE, G. MINAK, A. MORRI, F. TARTERINI, "Caratterizzazione microstrutturale e meccanica di giunti in composito AA6061/20%vol.Al2O3p ottenuti mediante Friction Stir Welding", La Metallurgia Italiana, (2005), pgg. 9-16
- [6] M. PONTE, C. GAMBARO, A.V. STROMBECK, L.M. MARZOLI, J.F. DOS SANTOS, "Giunzioni friction stir welding su materiale composito AA7005/10% vol. Al2O3: caratterizzazione meccanico-strutturale", 30° Convegno Nazionale AIM - Vicenza, (2004).



▲
Fig. 9

Finestra di saldabilità delle leghe AA2024 T3 e AA5754 H32 mediante processo FSW.
Welding envelope.

- [7] D. ZHANG, M. SUZUKI, K. MARUYAMA, "Microstructural evolution of a heat-resistant magnesium alloy due to friction stir welding", Scripta Materialia, Maggio 2005, pgg. 899- 903
- [8] P.ZELINSKI, Rapid traverse-Welding On A Machining centre, (2002), MMS online.
- [9] P.BALA SRINIVASAN, W. DIETZEL, R.ZETTLER, J.F.DOS SANTOS, V.SIVAN, "Stress corrosion cracking susceptibility of friction stir welded AA7075-AA6056 dissimilar joint", Materials Science and Engineering, A392(2005), pgg. 292-300.
- [10] P.CAVALIÈRE, E.CERRI, "Mechanical Response of 2024-7075 aluminium alloys joined by friction stir welding", Journal of material science, 40 (2005), pgg. 3669-3676.
- [11] PONTE M., GAMBARO C., ADAMOWSKI J., LERTORA E., "Caratterizzazione meccanica di giunti Friction Stir Welding tra materiali dissimili", Rivista Italiana della Saldatura, N.ro 2, (2006), pgg. 211-217.
- [12] http://media.nasaexplores.com/lessons/02-065/9-12_2.pdf
- [13] R.W. FONDA, J.F. BINGERT, AND K.J. COLLIGAN, "Microstructural development in Friction Stir Welding", Chemical/Biochemical Research, (2005), pgg.121-122.
- [14] N.SAITO, I.SHIGEMATSU, T.KOMAYA, T. TAMAKI, G.YAMAUCHI, M.NAKAMURA, "Grain refinement of 1050 aluminum alloy by friction stir processing", Volume 20, Number 20, (2001), pgg. 1913-1915.

ABSTRACT

MECHANICAL AND STRUCTURAL CHARACTERIZATION OF FRICTION STIR WELDED 5754 H32 AND 2024 T3 ALUMINIUM ALLOYS

Keywords:

The results of a mechanical and structural characterization of Friction Stir welded joints between two different light alloys are reported in the present paper.

Friction Stir Welding (FSW) is a relatively new welding technique, developed and patented by TWI in early '90, not associated with major weldability problems such as porosity and cracking, therefore particularly suitable for Al-alloys.

A friction stir weld is produced by inserting a non consumable rotating shouldered pin tool between the faying faces until the tool shoulder is in intimate contact with the work surface. The rotation of the tool friction heats the metal and produces a plasticized zone on the contact line between the welding plates. As the tool translates along the joint line, the plasticized material is stirred and forged behind the trailing face of the pin, where it consolidates and cools down to form the solid-state weld.

The materials used in this study are a precipitation hardenable aluminium alloy (AA2024 T3) and a cold worked aluminium alloy (AA5754 H32), both laminated into 3x100x300 mm plates.

The welds have been produced adopting different welding speeds, using the same tool, made of C40 steel (the shoulder) and HSS steel (the pin). The tool features are a 12 mm diameter shoulder and a pin diameter of 4 mm.

A pre-heating step of 5 seconds and a tilt angle of 2° have been applied during all the welds. AA2024 aluminium alloy has always been positioned on the advancing side of the weld.

Joints have been realized using different welding parameters, in order to give different heat inputs to each weld.

The application of different weld pitches (Tab. 2) guarantees a different heat input to each weld in agreement with the formula given by NASA researchers. The relation between the HI and the WP is reported herein.

$$HI = f(2 \tau / 60 WP) \quad [J/cm]$$

In this equation 'HI' is the heat input (J/cm), 'f' is the process efficiency of the equipment (no units), 'τ' is the torque (N?m) and 'WP' is the weld pitch (mm).

After joints realization, the characterization started with non destructive tests. Visual test were carried out to measure weld pitches and to check the presence of surface defects like flash or lack of penetration. During the exam no defects and a good surface were found.

Radiographic analyses were executed on all the joints in order to evaluate internal defects like tunnel or lacks of material. (Tab. 3)

Macrostructure analyses (Fig. 3) have clearly shown a structure similar to the usual one in FSW, with the typical nugget (N), heat affected (HAZ) and thermo-mechanically affected zones (TMAZ).

The typical recrystallization of friction stir welded joints was observed in the nugget region.

A good penetration of the pin tool was also observed during the optical analysis of all the welds. Defects such as tunnels or porosity were not found.

Micrographic analyses have shown grains different in dimensions and geometry. High temperature and severe plastic deformations of the material are the main reasons of the grains fragmentation localized in the centre of the weld. Bigger and vertically oriented grains characterize the heat affected zone and the termomechanically affected zone.

A threaded pin tool has guaranteed a good mixing of the alloys and an homogeneous section without lacks.

Mechanical properties of the welds have been evaluated by microhardness profiles (HV 0.2) across the welded joints, at top and bottom of the section (Fig. 7). On the advancing side, it is possible to see the typical behaviour of the 2xxx alloys: a loss of hardness in the HAZ. On the retreating side, no variation of hardness is shown in accordance with the behaviour of the friction stir welded plates of 5xxx series. Hardness variations are restricted in the range between the hardness values of the base metals.

Tensile tests were performed according to the UNI EN 10002 with a 5 mm/min travel speed.

The major part of the specimens failed at the boundary between the HAZ and the TMAZ, on the retreating side, where the microhardness minimum is reached.

The best welds, realized with a revolution speed of 460 RPM, reached the 90% of the AA5754 ultimate tensile strength.

The best results can be obtained adopting pitches between 0,348 mm and 0,619 mm, as shown in figure 8.

In order to have good results rotational speed has to maintained in the range 300 ÷ 800 RPM.

Heat input to the joint and application of a correct revolution speed, in order to guarantee a good stirring of the plasticized material, are fundamental in friction stir welding process.