

Caratterizzazione microstrutturale e modellazione di giunti saldati per Friction Stir Spot Welding in lega di Alluminio 6082

P. Fanelli, R. Montanari, L. Rovatti, N. Ucciardello, F. Vivio, V. Vullo

Il presente lavoro ha per scopo la caratterizzazione microstrutturale di giunti saldati mediante Friction Stir Spot Welding (FSSW), realizzati in lega d'alluminio 6082. Viene inoltre prospettata una modalità di modellazione dei medesimi che consenta la valutazione delle loro grandezze ingegneristicamente più significative. La struttura dei giunti è esaminata con osservazioni di microscopia ottica, microscopia elettronica in trasmissione, diffrazione dei raggi X (XRD) e viene confrontata con quella del materiale tal quale. La zona deformata è anche caratterizzata con prove di indentazione strumentata FIMEC e viene svolta una caratterizzazione a rigidità su provini Tensile-Shear aventi un'unica giunzione FSSW. Utilizzando i dati derivanti da tutti i rilievi sperimentali descritti, viene svolta una indagine sistematica onde valutare l'influenza che i parametri di saldatura hanno sulla variazione locale delle caratteristiche meccaniche del materiale. La modellazione FE di riferimento, basata sullo sviluppo di complessi modelli ad elevata parametricità, tiene conto di tutti le variabili geometriche e tecnologiche nonché della differenziazione delle zone termicamente e termomeccanicamente alterate; attese queste caratteristiche, essa consente di valutare, in maniera accurata, l'effetto strutturale che ne consegue.

PAROLE CHIAVE:

Alluminio e leghe; Saldatura; Microscopia Elettronica; Prove non distruttive; Simulazione numerica

INTRODUZIONE

Le problematiche emergenti nella realizzazione di giunzioni saldate tra lamiere in materiali, anche dissimili, difficilmente saldabili secondo le più comuni metodologie, ha portato alla diffusione di nuove tecnologie di saldatura. Tra queste, di grande interesse industriale, è sicuramente la saldatura a punti per attrito, detta *Friction Stir Spot Welding* (FSSW), che è una evoluzione della meno recente *Friction Stir Welding* (FSW). Tale tecnica di connessione, che permette di ottenere giunzioni saldate con materiali particolarmente difficili, come le leghe di alluminio, si può definire come un processo di saldatura allo stato solido. Il calore e il flusso plastico derivanti dalla rotazione dell'utensile, pure soggetto a carico assiale, producono significative modificazioni microstrutturali che portano ad una locale variazione delle proprietà meccaniche del materiale della giunzione.

La struttura di un giunto saldato tramite FSSW è caratterizzata da una zona centrale o *nugget* o *stir zone* (SZ), una zona termomeccanicamente alterata (TMAZ) ed una zona termicamente alterata (HAZ). In questo tipo di saldatura il calore derivante dalla rotazione dell'utensile può produrre modificazioni microstrutturali locali [1].

L'individuazione delle correlazioni tra queste strutture e le loro caratteristiche di resistenza meccanica permette l'esecuzione di giunti dalle caratteristiche ottimali.

Il rapido diffondersi di detta tecnologia ha portato alla pubbli-

cazione di numerosi lavori riguardanti l'influenza dei parametri tecnologici sulla resistenza della giunzione, come la velocità di rotazione dell'utensile e il tempo di applicazione [1-2] o la forma dell'utensile [3-5]. L'interesse si è anche concentrato sulla valutazione della vita a fatica delle giunzioni in funzione del materiale utilizzato, indagando le strutture del metallo in relazione alle condizioni di carico. Sotto quest'ultimo aspetto sono molteplici i lavori, corredati da approfondite indagini microstrutturali [6-9].

L'applicabilità della tecnologia a differenti materiali oltre che alle leghe di alluminio è stata indagata in [10], dove viene studiata la resistenza di giunzioni FSSW realizzate in differenti classi di acciaio.

Altri lavori hanno evidenziato le profonde variazioni delle microstrutture in prossimità delle giunzioni e le conseguenti variazioni di caratteristiche meccaniche del materiale [11]. Secondo alcuni autori, nel caso di saldatura FSW, la zona del nugget evolve attraverso un processo di ricristallizzazione [12], mentre nell'interfaccia tra la zona HAZ e TMAZ si ottiene un decremento delle proprietà meccaniche e della durezza a causa dell'accrescimento di precipitati [13].

L'approccio numerico all'analisi delle FSSW si limita al processo di formazione della stessa, mediante strumenti di calcolo FEM esplicito. Lavori come [14] e [15] riguardano la modellazione dell'utensile e della porzione di lamiera prossima alla giunzione e ricercano fronti di temperatura che si propagano durante il processo, deformazioni plastiche e forze che si generano.

L'uso di metodologie FEA per l'analisi strutturale delle giunzioni risulta un approccio ad oggi pressoché inesplorato. La resistenza della giunzione viene prevalentemente analizzata da un punto di vista tecnologico, determinandone l'ottimo realizzativo, la cui validazione è limitata alla sperimentazione.

P. Fanelli, R. Montanari, L. Rovatti,
N. Ucciardello, F. Vivio, V. Vullo
Università di Roma "Tor Vergata",
Dipartimento di Ingegneria Meccanica
Via del Politecnico 1 - 00133 Roma

Nel presente lavoro si è dapprima analizzata la microstruttura di giunti in lega di alluminio 6082 T6 saldati con la tecnica FSSW tramite microscopia ottica (MO) ed elettronica in trasmissione (TEM) e tramite diffrazione dei raggi X (XRD). Inoltre si è monitorata l'evoluzione delle proprietà meccaniche della giunzione in direzione radiale attraverso test FIMEC e si è svolta una caratterizzazione a rigidezza su provini Tensile-Shear aventi un'unica giunzione FSSW.

Si è quindi messo a punto un complesso modello FE del giunto, utilizzando le informazioni sul materiale ottenute dai summenzionati rilievi sperimentali. In tal modo è possibile svolgere una indagine sistematica onde valutare l'influenza che i parametri di saldatura hanno sulla variazione locale delle caratteristiche meccaniche del materiale. È così possibile definire, in tale modello FE di riferimento, che prevede un'elevata parametricità, una differenziazione delle zone alterate termicamente e termo-meccanicamente onde valutare, in maniera accurata, l'effetto strutturale che ne consegue.

L'elaborazione dei risultati sperimentali fornisce il database di informazioni per la corretta definizione del un modello numerico, così da riprodurre fedelmente la prova sperimentale in termini sia geometrici che tecnologici.

Lo sviluppo di un siffatto modello numerico di riferimento è utile come base per l'elaborazione di un nuovo modello agli elementi finiti, con ridotto onere computazionale, in grado di simulare il comportamento della giunzione così saldata. Tale tecnica di modellazione si basa su un particolare elemento che vuole unire la snellezza computazionale, già dimostrata per altre giunzioni così modellate [14], all'accuratezza di simulazione, a prescindere dal materiale considerato.

La validazione del modello così ottenuto mediante il confronto con i risultati delle prove sperimentali permette di evidenziare quali siano i parametri sensibili ed influenti sul comportamento e sulla resistenza della giunzione.

PROCEDURE SPERIMENTALI E RISULTATI

Il materiale saldato mediante tecnica FSSW è la lega d'alluminio 6082 T6, con la seguente composizione nominale: Si 0.7-1.3; Cr < 0.25; Fe < 0.5; Zn < 0.20; Cu < 0.1; Ti < 0.10; Mn 0.4-1.0; Mg 0.6-1.2; Al il resto (% in peso).

Per le osservazioni di MO i campioni sono stati preparati mediante attacco elettrochimico a temperatura ambiente in una soluzione di acido nitrico (33% in volume) e metanolo e una densità di corrente di circa 1.4 A/cm², utilizzando un catodo di acciaio inox. Le osservazioni microstrutturali sono state effettuate sul retro della saldatura, in sezione longitudinale, per monitorare l'effetto termo-meccanico della FSSW nel punto centrale del giunto.

Nelle successive indagini sperimentali, si è stabilito di effettuare prove non distruttive attraverso la tecnica FIMEC sulla sezione longitudinale della saldatura allo scopo di evidenziare la variazione in direzione radiale del comportamento meccanico del giunto.

La prova FIMEC (*Flat-top Cylinder Indenter for Mechanical Characterization*) è un test di indentazione strumentata che utilizza una punta cilindrica [17, 18]. La punta indentatrice di carburo di tungsteno sinterizzato che si è usata ha diametro di 2 mm. Durante il test vengono registrati sia il carico applicato, che la profondità di penetrazione. Dividendo il carico per l'area di contatto si ottengono curve pressione - penetrazione. Dall'analisi del tratto lineare delle curve, in determinate condizioni di prova (velocità di penetrazione 0.1 mm/min), è possibile ricavare il valore del carico di snervamento utilizzando la nota relazione $\sigma_y \approx p_y / 3$. Le misure di diffrazione dei raggi X sono state eseguite usando la radiazione Mo-K α ($\lambda = 0,709 \text{ \AA}$).

Risultati MO, SEM e TEM

La lega di alluminio 6082 T6 tal quale ha una dimensione media del grano di circa 27 μm (Fig.1).

Le micrografie TEM del materiale tal quale hanno messo in evidenza un elevato numero di precipitati della dimensione di circa 1 μm insieme con altri di dimensioni minori (Fig. 2).

La Fig. 3 evidenzia, in una schematizzazione della sezione assiale della giunzione, la suddivisione del giunto saldato in 3 zone; t_1 e t_2 rappresentano gli spessori delle due lamiere in materiale tal quale (BM).

L'attacco ha messo in evidenza lo stato tensionale del retro della saldatura (Fig. 4) che riproduce l'azione meccanica dell'utensile durante il processo di saldatura. Il flusso plastico risulta essere più accentuato in prossimità della linea di saldatura, in corrispondenza della zona termicamente alterata.

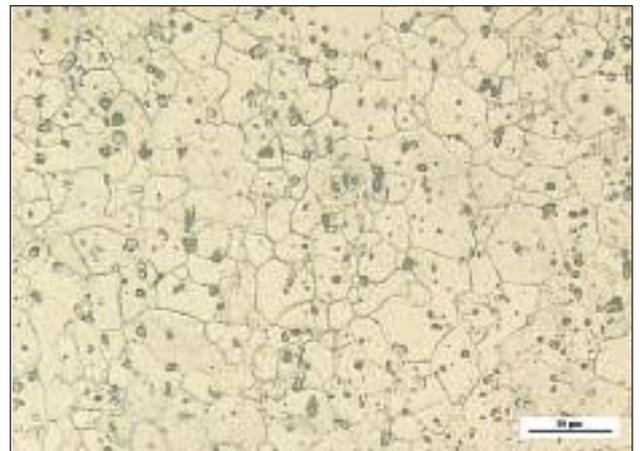


FIG. 1 *Materiale tal quale o base material (BM).*
Base material.

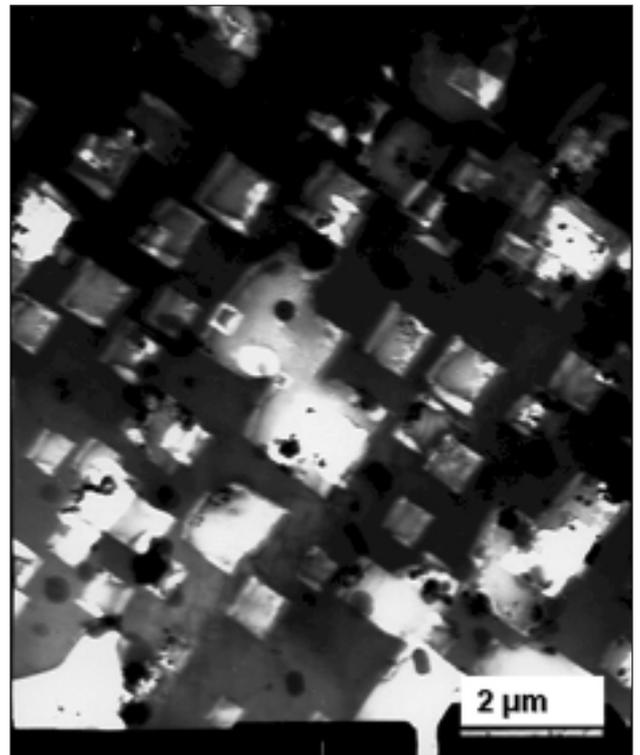


FIG. 2 *Micrografia TEM del materiale tal quale.*
TEM micrograph of base material.

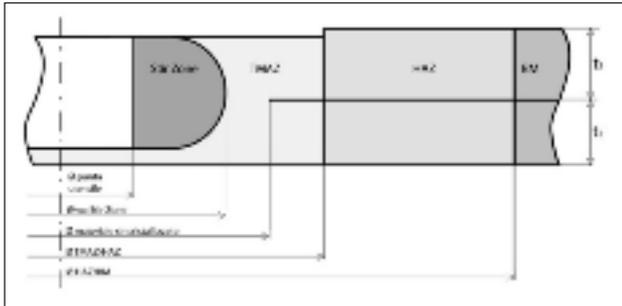


FIG. 3 Schematizzazione della saldatura nella sezione longitudinale del provino passante per l'asse del punto saldato.

Junction zones with different mechanical characteristics.



FIG. 4 Centro del retro della saldatura.
Centre of the back-welding.

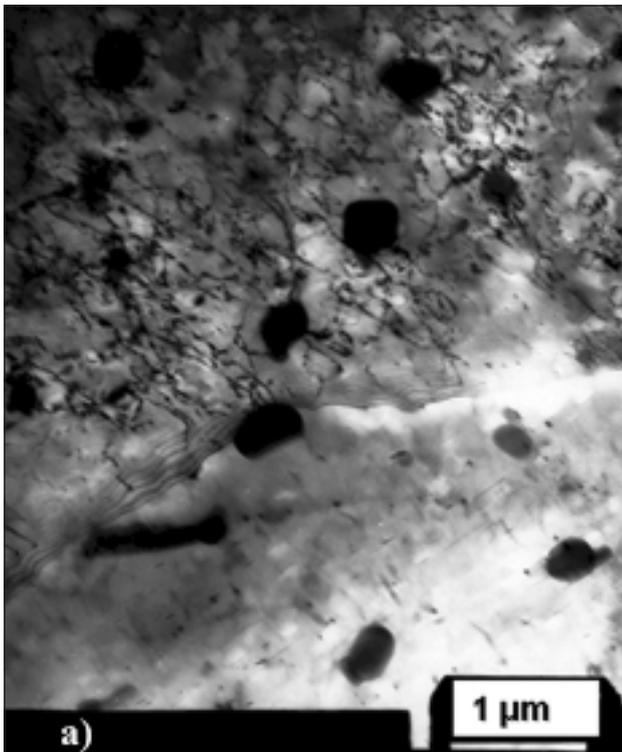


FIG. 5 Micrografie TEM al centro della saldatura.
TEM micrographs of the weld nugget.

Al di fuori della zona riportata in Fig. 4 la dimensione del grano è risultata prossima a quella del materiale tal quale (Fig. 1). Dall'analisi delle immagini TEM al centro della saldatura si ottiene una distribuzione non omogenea della dimensione media del grano. In Fig. 5 a) si possono comunemente osservare strutture di dislocazioni che costituiscono i bordi dei subgrani con dimensione dell'ordine di 100-200 nm e una distribuzione di precipitati fini e grossolani (Fig. 5 a-b).

Risultati XRD

Gli spettri di diffrazione dell'alluminio tal quale e di quello nella zona al centro della saldatura (Fig. 6) evidenziano la presenza di una tessitura {100} nel materiale tal quale, che risulta attenuata a seguito del processo di saldatura, come mostra anche il confronto con la scheda del database JCPDS-ICDD in tabella 1. Attraverso l'analisi dei picchi di precisione dei raggi X è stato possibile misurare la densità delle dislocazioni ρ presenti prima e dopo la saldatura. Si è dapprima separata la componente $K\alpha_1$ da $K\alpha_2$, si è misurata la larghezza a metà altezza, si è sottratto l'allargamento strumentale per ottenere l'allargamento totale β (2θ) dovuto sia ai domini che diffrangono coerentemente che alle microdeformazioni. L'eq. (1) mostra i due contributi:

$$\beta(2\theta) = \frac{0.89\lambda}{\cos\theta} \langle D \rangle + 2.5g\theta \quad (1)$$

dove $\langle D \rangle$ è la dimensione media dei domini che diffrangono coerentemente, λ la lunghezza d'onda della radiazione incidente, θ l'angolo di Bragg, ζ la microdeformazione legata alla densità delle dislocazioni. Considerando l'allargamento di più righe di diffrazione si è determinato il valore di ζ e da questo infine si è calcolata la densità delle dislocazioni con la relazione:

$$\rho = \frac{K}{Fb} \zeta^2 \quad (2)$$

essendo b il modulo del vettore di Burgers, F e K due costanti ($F = 1$ e $K = 16.1$).

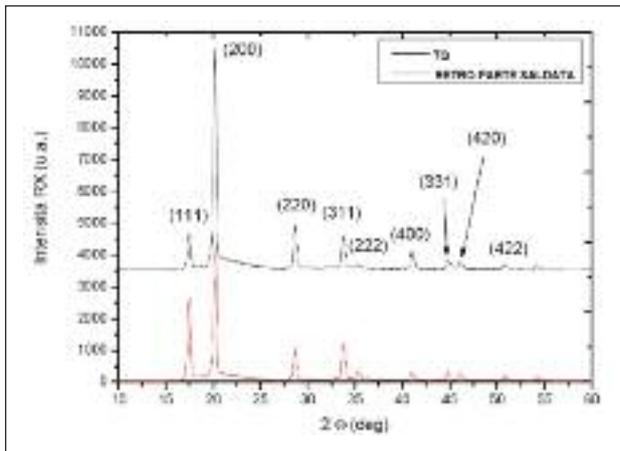


FIG. 6 Confronto tra gli spettri di diffrazione dell'alluminio tal quale e quello al centro della saldatura.

Diffraction patterns of the aluminum as fabricated and centre of weld joint.

Per il materiale tal quale il valore di ρ è $2 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$. Tale densità è molto elevata e conferma l'incrudimento iniziale del materiale base.

Nel caso del materiale saldato nella zona del *nugget*, la dimensione media dei subgrani è risultata di circa 180 Å, valore coerente con quanto osservato al TEM, mentre è trascurabile il secondo termine della relazione (1) per effetto della diminuzione della densità di dislocazioni non organizzate in celle e subgrani in tale zona, in accordo anche con quanto osservato da altri [11].

Prove FIMEC

In Fig. 7 è mostrato il confronto tra le curve FIMEC ottenute sul materiale tal quale e nelle diverse zone della saldatura.

Si osserva chiaramente che la curva del materiale tal quale raggiunge il valore massimo del carico, mentre nel giunto saldato si riscontra una graduale diminuzione del carico passando dal centro verso l'esterno. In Tab. 2 sono riportati i valori di carico di snervamento ottenuti dalle curve FIMEC sul giunto di saldatura. Le misure del carico di snervamento nel materiale tal quale, riportate in tabella 2, hanno fornito un valore minore di quello caratteristico per la lega d'alluminio 6082 T6. Tale discrepanza può essere associata alla dimensione troppo ridotta dello spessore della singola lamina su cui è stato effettuato il test FIMEC. Questo problema non si è ripresentato per le prove realizzate sul giunto per via del suo spessore più alto.

Nella zona HAZ si ottiene una forte diminuzione del carico di snervamento, associabile alle variazioni microstrutturali avvenute a seguito del processo di saldatura e dell'aumento locale di temperatura. Queste variazioni sono principalmente la diminu-

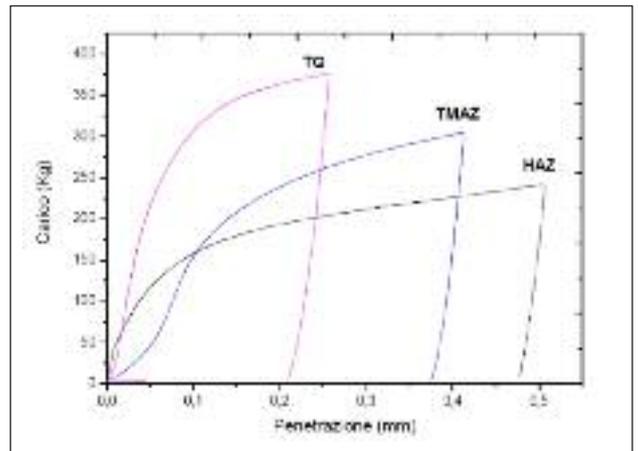


FIG. 7 Confronto delle prove FIMEC nelle diverse zone del giunto saldato e sul materiale tal quale.

Comparison of different FIMEC tests performed on different joint zones and on base material.

Zona della prova FIMEC	Carico snervamento (MPa)
Materiale tal quale	180
HAZ	43
TMAZ	150

TAB. 2 Valori di carico di snervamento (MPa) ricavati in base alle prove FIMEC sul materiale tal quale e nelle diverse zone del giunto di saldatura.

Yield stress values obtained by FIMEC tests on base material and on different joint zones.

zione della densità di dislocazioni e l'ingrossamento dei precipitati.

Nella parte centrale della saldatura è avvenuta una forte diminuzione della densità di dislocazioni, come osservato nei risultati XRD, che ha portato ad una diminuzione dell'incrudimento del materiale.

Il valore misurato del carico di snervamento nella TMAZ risulta minore rispetto a quello del materiale tal quale, ma comunque superiore a quello misurato nella HAZ.

Tale andamento di σ_y è correlabile alle variazioni microstrutturali della lega a seguito del processo termo-meccanico della FSSW. Nel materiale tal quale, infatti, come evidenziato attraverso le micrografie TEM (Fig. 2), si è individuata un'ampia distribuzione di precipitati che rinforzano il materiale e che non sono più osservabili al centro del giunto. Ciò può essere asso-

{hkl}	I/I ₀ % (tal quale)	I/I ₀ % (retro della saldatura)	I/I ₀ % (JCPDS-ICDD 4-787)
{111}	17	64	100
{200}	100	100	47
{220}	21	27	22
{311}	15	29	24
{222}	3	9	7
{400}	9	7	2
{331}	5	8	8
{420}	4	6	8
{422}	3	5	8

TAB. 1

Confronto tra le intensità dei picchi di riflessione di alluminio tal quale, retro della saldatura e la scheda di riferimento XRD.

Intensity of the diffraction peaks.

Materiale	E [MPa]	s_y [MPa]	s_R [MPa]
Al 6082 T6	65000	275	385

TAB. 3 *Caratteristiche meccaniche del materiale base utilizzato per i provini.*

Mechanical properties of base material of specimens.

ciato ad una solubilizzazione o ad una rottura dei precipitati stessi che produce una distribuzione di precipitati fini nella zona più centrale della saldatura.

Prove di trazione

I provini, del tipo a semplice sovrapposizione, sono stati realizzati giuntando lamierini in lega di alluminio 6082 T6 di data geometria (Fig. 8); tale materiale è stato preliminarmente caratterizzato con prove di trazione su provini standardizzati, con le quali si sono ricavati i valori delle caratteristiche meccaniche riportati in Tab. 3.

Le dimensioni del provino, costituito da due lamiere con spessore di 1.5 mm, sono riportate in Fig. 8; la profondità di afferraggio del medesimo sulla macchina di trazione è stata di 50 mm.

Lo spostamento è quello rilevato nei punti dell'estensometro utilizzato nei rilievi sperimentali. Lo strumento è stato posizionato all'estremità della zona di sovrapposizione delle due lamiere del provino tensile shear a semplice sovrapposizione che si è considerato (distanza base 25 mm). I risultati sperimentali sono descritti nel paragrafo successivo nel confronto con i risultati ottenuti con il modello FE di riferimento del provino connesso tramite FSSW.

MODELLO NUMERICO DI RIFERIMENTO E CONFRONTO CON I RISULTATI SPERIMENTALI

La realizzazione di uno strumento di calcolo, in grado di cogliere il comportamento strutturale della giunzione in condizione di sollecitazione statica, richiede la definizione di un modello numerico agli elementi finiti il più possibile dettagliato e completo. L'elevata accuratezza del modello FE è necessaria per quantificare, anche mediante il confronto con i dati sperimentali, l'influenza che i parametri tecnologici hanno sulla rigidità e sulla resistenza della struttura. Le dimensioni caratteristiche delle zone a differente caratterizzazione del materiale nonché l'entità del degrado delle proprietà sono strettamente legate da un lato alla composizione della lega del materiale e, dall'altro, ai parametri tecnologici di processo. Risulta quindi evidente che un modello FE generale deve prevedere la parametrizzazione geometrica della giunzione, delle caratteristiche del materiale e del dominio delle singole zone. In questa prima analisi vengono

assunti i valori geometrici propri del modello sia direttamente dai provini sperimentali, mediante rilevazione diretta, sia operando un confronto con i dati reperibili in letteratura [8].

Il modello della giunzione è composto da elementi solid a 8 nodi e 3 gradi di libertà per la modellazione della giunzione e della zona di lamiera immediatamente adiacente il punto e da elementi shell a 4 nodi e 6 gradi di libertà per la lamiera del provino considerato. La scelta di utilizzo misto di elementi 3D e 2D è dettata dalla duplice necessità di un elevato livello di dettaglio nella simulazione della giunzione e dalla limitazione, per quanto possibile, dell'onerosità computazionale.

La Fig. 3 evidenzia, in una schematizzazione della sezione assiale della giunzione, la suddivisione del collegamento saldato in 3 zone; t_1 e t_2 rappresentano gli spessori delle due lamiere in materiale tal quale (BM). La più interna, la cosiddetta *Stir Zone*, che è a ridosso del foro cieco generato dalla punta dell'utensile, assume una forma irregolare con contorno assimilabile ad un semicerchio. Man mano che ci si allontana dall'asse del punto saldato, il materiale viene alterato sia meccanicamente, dall'utensile, sia termicamente, a causa del calore generato per attrito tra il metallo base e l'utensile stesso; questa zona, considerata assialsimmetrica, è denominata zona termo-meccanicamente alterata (TMAZ). Oltre quest'ultima zona, il materiale viene modificato, pur in assenza di una diretta interazione con l'utensile, esclusivamente dal calore dissipato dal processo di saldatura; in questo caso si parla di zona termicamente alterata (HAZ), anch'essa assialsimmetrica. Il restante materiale viene considerato inalterato dal processo di saldatura (BM).

Tutti i parametri geometrici sono stati rilevati direttamente sui provini realizzati.

Le modalità di carico e di vincolo nel suddetto modello numerico, riportato in Fig. 8, simulano la prova di trazione, con un'estremità completamente vincolata in tutti i suoi gradi di libertà e l'altra libera soltanto di traslare lungo l'asse principale del provino.

La simulazione è effettuata impostando un calcolo elasto-plastico: in questa fase l'interesse è focalizzato sulla resistenza della giunzione in campo elastico, fino all'insorgere dei primi fenomeni di plasticizzazione localizzata, ma anche su una prima valutazione delle modalità di cedimento della giunzione, sempre da confrontare con le evidenze sperimentali.

Quanto desunto dalle prove FIMEC è stato quindi implementato nel modello numerico nelle differenti zone schematizzate in Fig. 9, secondo i valori riportati in tabella 4. Le curve caratteristiche del materiale (tensione vera-deformazione vera) sono state simulate con legge bilineare.

Si è quindi eseguita un'analisi di confronto tra un modello del provino tensile shear, in cui il materiale non presenta variazioni di caratteristiche meccaniche (le caratteristiche sono ovviamente quelle del materiale base) ed un modello ove si è presa in con-

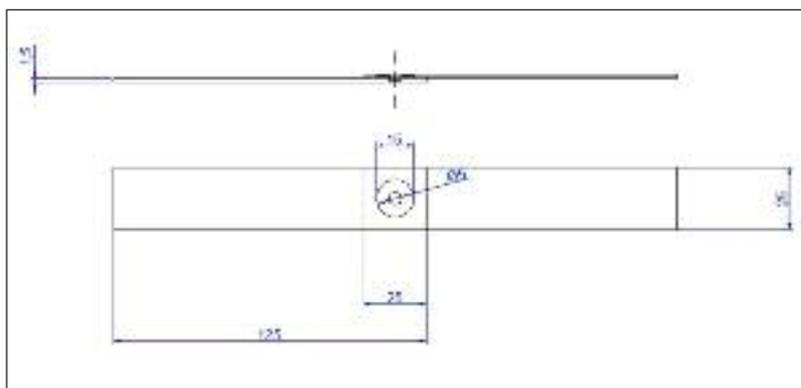


FIG. 8
Caratteristiche geometriche del provino a semplice sovrapposizione connesso con FSSW.

Geometric characteristics of tensile shear specimen with FSSW joint.

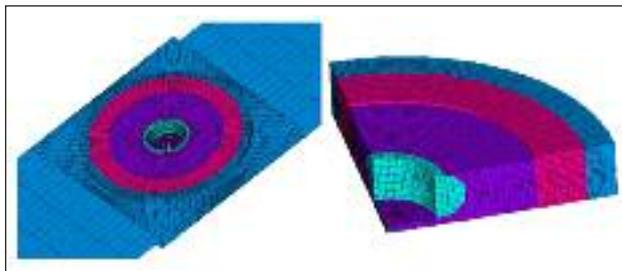


FIG. 9 Modello FE del provino tensile shear con giunzione FSSW e particolare della sezione della giunzione.

FSSW joint in reference FE model and a detail of joint section.

Zona	R_s [MPa]
BM	275
HAZ	43
TMAZ	150
SZ	150

TAB. 4
Valori della tensione di snervamento.

Yield stress values.

siderazione la sopra definita variazione di dette caratteristiche; in questo secondo calcolo, per il materiale in ciascuna delle tre zone dianzi individuate, si è assunta la medesima legge di incrudimento con curva caratteristica del materiale bilineare. La presenza di un anello di materiale così meccanicamente degradato attorno al punto determina un decadimento della rigidità della giunzione; ne risulta un comportamento prossimo a quello sperimentale, come evidenziato in Fig. 10. In detta figura è riportato l'andamento medio dei rilevamenti sperimentali relativi alle prove di trazione eseguite sui provini tensile shear. Gli spostamenti rilevati sono quelli riferiti alla lettura estensometrica, come descritto nel capitolo relativo alle prove di trazione. Si è poi analizzata numericamente l'evoluzione della deformazione subita dalla giunzione saldata. In particolare si è valutato l'andamento delle deformazioni plastiche nelle varie zone adiacenti alla medesima. I massimi valori delle deformazioni plastiche si verificano nella lamiera superiore, nella HAZ in corrispondenza della variazione di spessore ed in prossimità

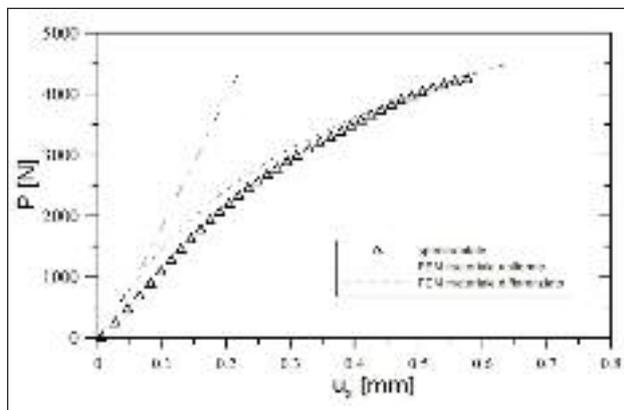


FIG. 10 Confronto tra risultati sperimentali e numerici con materiale uniforme e con materiale a caratteristiche differenziate nelle 3 zone.

Comparison between experimental and numerical results with uniform material and with differentiated material on three characteristic zones.

della TMAZ nonché dell'asse di applicazione del carico di trazione. Questo risultato è conforme con le rilevazioni sperimentali riscontrate nella totalità dei provini testati, che evidenziano (Fig. 11) la localizzazione delle fratture proprio lì dove risultano massime le deformazioni plastiche, derivanti solo dal modello numerico che tiene conto della differenziazione delle caratteristiche meccaniche dei materiali nelle tre zone (Fig. 12). È evidente che, a causa del forte decadimento delle caratteristiche meccaniche del materiale nella zona termicamente alterata, il cedimento del giunto sopravviene per sbottonamento verificantesi proprio in questa zona, ben prima che si facciano sentire gli effetti di intaglio all'interfaccia tra il nocciolo di saldatura ed i lembi delle due lamiere interconnesse, che è dislocata al diametro materiale ricristallizzato minore del diametro TMAZ/HAZ (Fig. 3).



FIG. 11 Modalità di cedimento provino tensile shear FSSW. Failure mode in tensile shear specimen with FSSW.

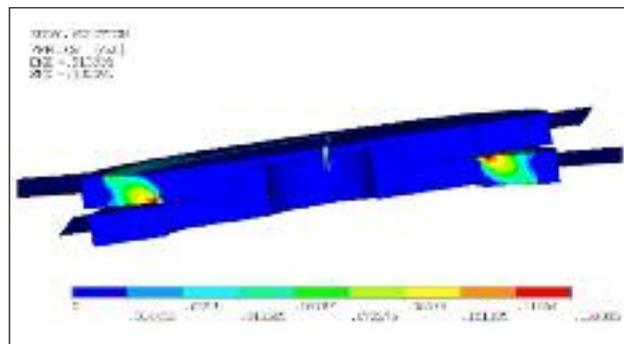


FIG. 12 Andamento della deformazione plastica equivalente secondo Von Mises nel punto. Carico $P = 4200$ N.

Equivalent Von Mises plastic deformation contour on spot. Load $P = 4200$ N.

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stata effettuata una completa caratterizzazione microstrutturale di giunti saldati mediante Friction Stir Spot Welding, realizzati in lega d'alluminio 6082, ed un'analisi strutturale in campo elasto-plastico di una giunzione saldata, sempre mediante FSSW, con lo scopo di individuare i parametri che risultino di maggiore rilevanza per la sua corretta modellazione, soprattutto in termini di valutazione della rigidità locale della giunzione.

La zona centrale dei giunti è stata caratterizzata tramite XRD evidenziando una diminuzione di tessitura e di densità delle dislocazioni rispetto al materiale tal quale. La zona deformata è stata analizzata con prove di indentazione strumentata FIMEC che sono state messe in relazione alle variazioni microstrutturali evidenziate tramite microscopia ottica, elettronica in scansione e in trasmissione.

Le informazioni derivanti dalle osservazioni sperimentali sono state quindi implementate in un modello numerico della giunzione ad alta parametricità che tiene conto della variazione delle caratteristiche meccaniche del materiale nelle diverse zone del giunto. La validazione del modello così ottenuto, mediante il confronto con i risultati delle prove sperimentali, ha permesso di definire un modello di simulazione macro strutturale che può permettere di considerare l'influenza dei parametri maggiormente influenti sul comportamento e sulla resistenza della giunzione stessa.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Centro Sviluppo Materiali di Castel Romano (RM) per il supporto offerto per la realizzazione dei provini.

BIBLIOGRAFIA

- [1] D.M. RODRIGUES, A. LOUREIRO, C. LEITAO, R.M. LEAL, B.M. CHAPARRO, P. VILAÇA, *Materials and Design* 30 (2009) p.1913.
- [2] V.-X. TRAN, J. PAN, T. PAN, *Journal of materials processing technology* 209 (2009) p.3724.
- [3] G. BUFFA, L. FRATINI, M. PIACENTINI, *Journal of materials processing technology* 208 (2008) p.309.
- [4] H. BADARINARAYAN, Y.SHI, X.LI, K.OKAMOTO, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 49 (2009) p.814.
- [5] Y. TOZAKI, Y. UEMATSU, K. TOKAJI, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47 (2007) p.2230.
- [6] P.-C. LIN, J. PAN, T. PAN, *International Journal of Fatigue* 30 (2008) p.74.
- [7] P.-C. LIN, J. PAN, T. PAN, *International Journal of Fatigue* 30 (2008) p.90.
- [8] D.-A. WANG, S.-C. LEE, *Journal of Materials Processing Technology* 186 (2007) p.291.
- [9] V.-X. TRAN, J. PAN, T. PAN, *International Journal of Fatigue* 30 (2008) p.2175.
- [10] Z. FENG, M. L. SANTELLA, S. A. DAVID, R.J. STEEL, S. M. PACKER, T. PAN, M. KUO, R. S. BHATNAGAR, *SAE International* 01 (2005) p.1248.
- [11] D. MITLIN, V. RADMILOVIC, T. PAN, J. CHEN, Z. FENG, M.L. SANTELLA, *Materials Science and Engineering A* 441 (2006) p.79.
- [12] K.V. JATA, S.L. SEMIATIN, *Scripta mater.* 43 (2000) p.743.
- [13] K.V. JATA, *Mater. Sci. Forum* 331 (2000) p.1701.
- [14] S. MANDAL, J. RICE, A.A. ELMUSTAFA, *Journal Of Materials Processing Technology* 203 (2008) p.411.
- [15] M. AWANG, V. H. MUCINO, Z. FENG, S. A. DAVID, *SAE International* 01 (2005) p.1251.
- [16] F. VIVIO, *International Journal of Solids and Structures* 46 (2009) p.4006.
- [17] P. GONDI, R. MONTANARI, A. SILLI, *Journal of Nuclear Materials* 212 (1994) p.1688.
- [18] B. RICCARDI, R. MONTANARI, L.F. MORESCHI, A. SILLI, S. STORAI, *Fusion Engineering and Design* 58 (2001) p.755.

Abstract

Microstructural characterization and modelling of Friction Stir Spot welded joints in 6082 aluminium alloy

Keywords: Aluminum and alloys; Welding; Electronic microscopy; Non-destructive testing; Numerical simulation

Friction Stir Spot Welding (FSSW) is a novel technique of great industrial interest [1-16]. The microstructure of joints in 6082 T6 alloy, realized by FSSW, has been extensively examined and a new modelling procedure of the joints, which allows to correctly evaluate their mechanical behaviour, also developed.

The base metal (BM) and the joint structure have been investigated by XRD, optical microscopy, and TEM. The BM has a mean grain size of 27 μm (Fig.1); several precipitates of 1 μm and of smaller size are dispersed in the matrix (Fig. 2).

Fig.3 displays the zones of welded joint with different mechanical characteristics while the micrograph in fig. 4 shows the plastic flow on the joint back side.

In the nugget the grain size is not homogeneous and dislocation structures tend to form sub-boundaries (Fig. 5 a-b) of about 100-200 nm; a distribution of fine and coarse precipitates is also observed (Fig. 5 a-b). XRD confirms the results of TEM observations and shows that the {100} texture of BM results weakened in the central part of the joints (Fig. 6).

The joints have been also characterized by FIMEC indentation tests [17-18]. The comparison between the FIMEC curves obtained on the BM and in different parts of the weld joint are shown in Figure 7. The values of yield strength obtained from FIMEC curves, reported in the Table 2, indicate a remarkable softening of HAZ owing to the temperature increase during welding.

Tensile tests have been carried out on tensile-shear specimens with a unique FSSW joint (Fig. 8) and on standard probes of the BM (see Tab. 3). The elaboration of experimental results provides an information database for the creation of a numerical model of high complexity, with a high number of parameters so that it is possible to faithfully simulate experimental tests in both geometric and technological terms. Their determination is of great importance for the elaboration of a new numerical model of a joint combining efficiency, accuracy in results and fast calculation (Fig. 9). To this purpose, the FSSW joint is analysed by means of a complex 3D FE model (Fig. 9) which allows to evaluate, in a parametric manner, the multifaceted internal geometry of the joint and the distribution of material mechanical characteristics after welding (Fig. 3).

Once the model geometry is defined through experimental survey, it is necessary to determine the correct distribution of mechanical properties and the simulation methods of FE model. To this purpose the experimental results obtained from FIMEC test has been introduced in the numerical model characterizing the three different zones in Fig. 3, according to the value shown in Tab. 4. Through these information, it is possible to define in the reference FE model a differentiation of heat and thermo-mechanically affected zones, in order to accurately evaluate the resulting structural effects.

In fig. 10, the average values of experimental tests on tensile shear specimens are shown together with FE results. The displacements displayed are still those measured by the extensometer. The presence of a material ring so mechanically degraded around the spot causes the joint strength to drop; a behavior similar to the experimental one is obtained. In tensile shear FE model, an uniform material with unaffected properties is firstly introduced, followed by a differentiation of mechanical characteristics in the three zones with the values previously obtained from experimental tests. In all these material curves, a bilinear hardening is used.

Finally the strain evolution in the welded joint is analyzed numerically (Fig. 12). The highest values of plastic strain show on the top sheet, in the HAZ in correspondence of thickness variation, in the border with TMAZ aligned to the load axis. This result, related to the fact that the model presents a sharp variation of mechanical characteristics just in the HAZ, is coherent with experimental surveys (Fig. 13), where all specimens confirm such behavior. In Fig. 11, it is clear that the failure mechanism starts just where the highest values of plastic strain are obtained in the numerical model, in the case of a FE model with material characteristics differentiated in the three zone outlined previously (Fig. 12).