

Comparazione sui giunti di lega Mg AZ31 saldati FSW da uno e due lati

G. Quercetti, E.Santecchia, S.Spigarelli, D. Ciccarelli, M. Pieralisi

In questo studio sono state confrontate due differenti tecniche di Friction Stir Welding (FSW) su lamiere in lega di magnesio AZ31B. Gli effetti del processo di saldatura sulle proprietà meccaniche e microstrutturali dei giunti sono state investigate tramite analisi metallografiche al microscopio ottico, prove di microdurezza Vickers, prove di trazione a temperatura ambiente e analisi della zona di frattura dopo trazione mediante microscopio a scansione elettronica (SEM). Dai risultati si è evidenziato che nella tecnica con saldatura doppia, da entrambi i lati, rispetto la tecnica con saldatura da un solo lato, la zona di mescolamento presenta una maggior omogeneità, una dimensione minore del grano ed una durezza con distribuzione simmetrica dei profili. Inoltre, i difetti macroscopici presenti nel giunto singolo si sono notevolmente ridotti in quelli con saldatura da due lati. Dalle prove di trazione si è registrato un incremento del carico di rottura (UTS) di circa il 9% confrontando la doppia con la singola passata ed un allungamento finale (UE) maggiore del 25% con la disposizione FSW AS-AS rispetto la singola. Dall'analisi della zona di frattura con microscopio elettronico a scansione ad alta risoluzione, si osserva che la frattura è di tipo transgranulare in entrambi i campioni saldati da due lati.

Parole chiave: Metalli non ferrosi - Trasformazioni di fase - Saldatura - Metallografia - Microscopia elettronica - Prove meccaniche

INTRODUZIONE

La necessità di riduzione del peso, nel settore aeronautico ed aerospaziale, ha suscitato interesse riguardo l'utilizzo di leghe di magnesio per sostituire quelle di alluminio in alcune parti meccaniche e strutturali. In effetti, la densità delle leghe di magnesio è inferiore del 36% rispetto all'alluminio, con un elevato rapporto resistenza/peso. Nonostante la lavorabilità limitata a temperatura ambiente, a causa della loro struttura esagonale compatta con un limitato numero di sistemi di scorrimento, le leghe di magnesio hanno altre qualità che le rendono interessanti, come per esempio, una buona formabilità ad alta temperatura, proprietà schermanti all'interferenza elettromagnetica, una buona

resistenza specifica agli stress termici e meccanici e una buona possibilità di riciclo del materiale.

Le leghe di magnesio possono essere unite utilizzando una varietà di processi, ma quelli convenzionali hanno mostrato una serie di svantaggi che portano ad un decadimento delle proprietà meccaniche: una grande zona termicamente alterata (ZTA), elevate porosità, perdita degli elementi di lega da evaporazione, criccabilità a caldo ed elevate tensioni residue con conseguenti distorsioni [1 - 10].

La Friction Stir Welding (FSW) è un metodo alternativo che potrebbe superare gli inconvenienti dei suddetti problemi metallurgici, permettendo di ottenere una saldatura di buona qualità ottimizzando i parametri della saldatura stessa. Infatti, la saldatura Friction Stir Welding è una tecnologia di giunzione allo stato solido, perché viene eseguita a temperatura inferiore a quella di fusione del materiale da saldare. Durante la saldatura, il materiale è deformato grazie al calore sviluppato dal movimento dell'utensile che ruota ed avanza all'interno delle zone da saldare, giungendo ad una temperatura alla quale diviene plastico. In tal modo si elimina il rischio di presenza di zone fuse con conseguenti problemi di presenza di zone interdendritiche o fasi eutetiche fragili e la formazione di porosità da ritiro.

Questa tecnologia permette di saldare materiali sia di leghe omologhe (per esempio Al-Al, Mg-Mg) sia di leghe dissimili (per esempio Al-Mg) con ottimi risultati microstrutturali e può essere applicata a vari tipi di giunzioni (butt joint, lap joint, T butt joint and fillet joint) [2]. Tuttavia, la FSW presenta una serie di svantaggi e limitazioni tecnolo-

G. Quercetti, S.Spigarelli, D. Ciccarelli, M. Pieralisi

D.I.I.S.M-Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche, Università Politecnica delle Marche, Via Brecce Bianche, 60131, Ancona; g.quercetti@univpm.it, s.spigarelli@univpm.it d.ciccarelli@univpm.it, mapieralo@gmail.com

E.Santecchia

SIMAU-Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, delle Acque ed Urbanistica, Università Politecnica delle Marche, Via Brecce Bianche, 60131, Ancona; e.santecchia@univpm.it

	Al	Mn	Zn	Si	Fe	Cu	Ni	Atri	Mg
AZ31B	3.19	0.334	0.810	0.020	0.005	0.005	0.005	0.300	bal.

Tab. 1 - Composizione chimica nominale (% in peso) della matrice in lega AZ31B

Tab. 1 - Chemical composition (wt. %) of AZ31B

gici/operativi che rendono il processo di difficile controllo durante l'effettuazione della saldatura. Ad esempio, il pin dell'utensile non può avere una dimensione uguale o maggiore della lamiera saldata, con un conseguente effetto di intaglio nella zona che corrisponde al suo estremo, creando dei difetti macroscopici in prossimità della parte opposta a quella dell'utensile.

Per questo motivo, nel presente studio sono state effettuate giunzioni butt joint a piena penetrazione, su lamiera di magnesio AZ31, con saldatura da singolo lato e saldatura da entrambi i lati e direzione concorde e discorde alla prima passata. Per direzione concorde (di seguito chiamata AS-AS) si intende una disposizione della lamiera in cui i lati advancing e retreating sono gli stessi per entrambi i cordoni effettuati, per direzione discorde (di seguito chiamata AS-RS) i lati advancing e retreating sono opposti. Per i giunti così ottenuti sono state analizzate e confrontate le prove macro e microstrutturali con microscopio ottico, prove di microdurezza Vickers, prove di trazione e analisi della zona di frattura dopo trazione mediante microscopio elettronico a scansione (SEM).

PROCEDURA SPERIMENTALE

La composizione chimica nominale della matrice AZ31B è riportata in Tab. 1 [3].

I campioni sono stati preparati in accordo alla UNI EN ISO 25239-4:2012 che fornisce i requisiti per la specificazione e la qualificazione delle procedure di saldatura FSW dell'alluminio. Essendo l'unica norma armonizzata attualmente a disposizione per la FSW, si è deciso di procedere allo stesso modo anche per le leghe di Mg trattate nel presente lavoro.

La preparazione e le dimensioni seguono la figura 1 richiamata dalla norma stessa e precisamente:

- $t = 2,0$ mm
- $l = 500$ mm
- $b = 150$ mm
- $a = 0$ mm

Le lamiere sono state saldate con una macchina a controllo numerico con un utensile di acciaio H-13 (HRC=52), con spalla del diametro di 12 mm e pin troncoconico con base di diametro 3,5 mm, un angolo di 30° e lunghezza di 1,7 mm. La direzione di saldatura era perpendicolare a quella di laminazione della lamiera. La saldatura è stata realizzata applicando una forza verticale di 10 kN costante, una velocità di rotazione di 1500 rpm e una velocità di traslazione di 60 mm/min. La profondità di affondamento

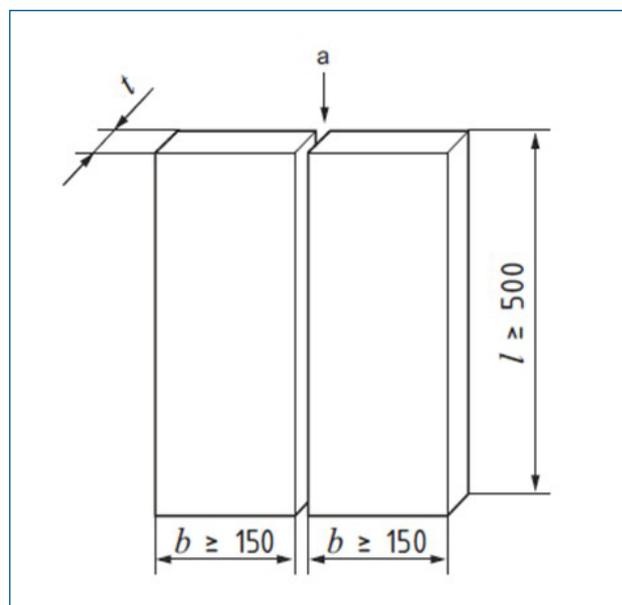


Fig. 1 - Preparazione campioni per la saldatura FSW testa-testa, piena penetrazione.

Fig. 1 - Preparation of specimens for the FSW butt weld full penetration.

dello shoulder calcolata è stata circa 0,1 mm.

I provini, sono stati ricavati nel centro dei giunti saldati e perpendicolarmente alla linea di avanzamento dell'utensile ed inglobati con resina a caldo (150°). Si è proceduto con operazioni di lappatura e lucidatura per la preparazione della superficie del metallo. L'operazione di smerigliatura è stata effettuata tramite lappatrice Struers LaboPol-21 e carte abrasive a granulometria progressivamente decrescente 600, 800, 1200, 2400, 4000 e quindi lucidatura con l'ausilio di un panno.

L'attacco chimico è stato effettuato con soluzione di acido picrico con 10 ml di acido acetico, 4,2 g di acido picrico in polvere, 10 ml di acqua distillata e 70 ml di etanolo al 95% per circa 6 sec e fino la completa visualizzazione della struttura dei grani. L'analisi microstrutturale è stata effettuata tramite il microscopio Reichert Jung, modello MEF 3, collegato ad una macchina fotografica digitale. I complessivi dei giunti saldati sono stati visualizzati a bassi ingrandimenti (< 100x) per l'individuazione di eventuali difetti macroscopici, e ad ingrandimenti fino 940x per un'analisi microstrutturale più approfondita.

Le dimensioni del grano sono state ottenute in accordo agli standard ASTM E112 con il metodo dell'intercetta lineare.

Una serie di test di microdurezza per campione sono stati effettuati in direzione dell'asse centrale dei campioni sal-

dati, utilizzando un microdurometro Remet modello HX 1000 ed applicando un carico di 100 gf (1 N) con tempo di permanenza di 15 sec e interdistanza di 0,5mm.

Le prove di trazione sono state eseguite a temperatura ambiente su campioni realizzati con direzione di carico perpendicolare alla linea di saldatura ed in conformità alla norma UNI EN ISO 4136:2011 " Prove distruttive sulle saldature di materiali metallici - Prova di trazione trasversale".

Dopo le prove di trazione, i campioni a doppio cordone AS - AS e AS - RS sono stati esaminati tramite microscopio elettronico a scansione ad alta risoluzione (HRSEM) e spettroscopia a dispersione di energia (EDS). Le osservazioni sono state eseguite con un microscopio ad emissione di campo Zeiss Supra 40, equipaggiato con microanalisi a raggi X Bruker Quantax 200-Z10.

CARATTERIZZAZIONE MACRO E MICROSTRUTTURALE

Le figure 2a e 2b mostrano l'aspetto micrografico del materiale tal quale. La figura 3a mostra la mappatura del giunto a basso ingrandimento in sezione trasversale della direzione di saldatura ed ottenuto con singolo cordone FSW in lega AZ31. Si può osservare la macro e microstruttura tipica della FSW formata dal materiale base (MB), la zona termicamente alterata (ZTA), la zona termomeccanicamente alterata (TMAZ) e la zona di mescolamento (SZ). Da una prima osservazione macrografica si nota una discontinuità lineare sulla parte inferiore del campione e lungo quasi tutta la dimensione della zona di mescolamento (evidenziata con riquadro rettangolare). Questo difetto può essere attribuito principalmente a due fattori: una scelta non idonea dei parametri di saldatura (velocità di traslazione e/o rotazione dell'utensile) e ad una limitazione tecnologica della FSW che richiede un pin di dimensione inferiore allo spessore del pezzo da giuntare.

Le figure da 3b a 3g mostrano alcuni particolari micrografici. In particolare, nella 3b si può notare la zona inalterata del materiale base (MB) che non ha subito alcuna trasformazione dal processo di saldatura; nella 3c si vede la zona termomeccanicamente alterata con un elevato grado di distorsione del grano di comune osservazione da diversi ricercatori [3 - 4]; la 3d è un ingrandimento dell'estremità della zona saldata sulla superficie lato utensile; nella 3e si può osservare la zona di mescolamento, caratterizzata da grano fine dinamicamente ricristallizzato a causa della deformazione plastica e al calore di attrito sviluppato dal perno (pin) dell'utensile rotante e la sua spalla (shoulder) nella zona nugget durante la saldatura [4]. Nella figura 3f si nota una cricca nella zona di mescolamento sul lato opposto dell'utensile e probabilmente causata da un inadeguato miscelamento del flusso durante la saldatura; nella 3g si osserva la zona termicamente alterata che subisce un ciclo termico, ma non essendo sottoposta a deformazione plastica, conserva la stessa struttura dei grani di quella del materiale base.

Da un confronto della figura 2 con la 3 si nota subito come

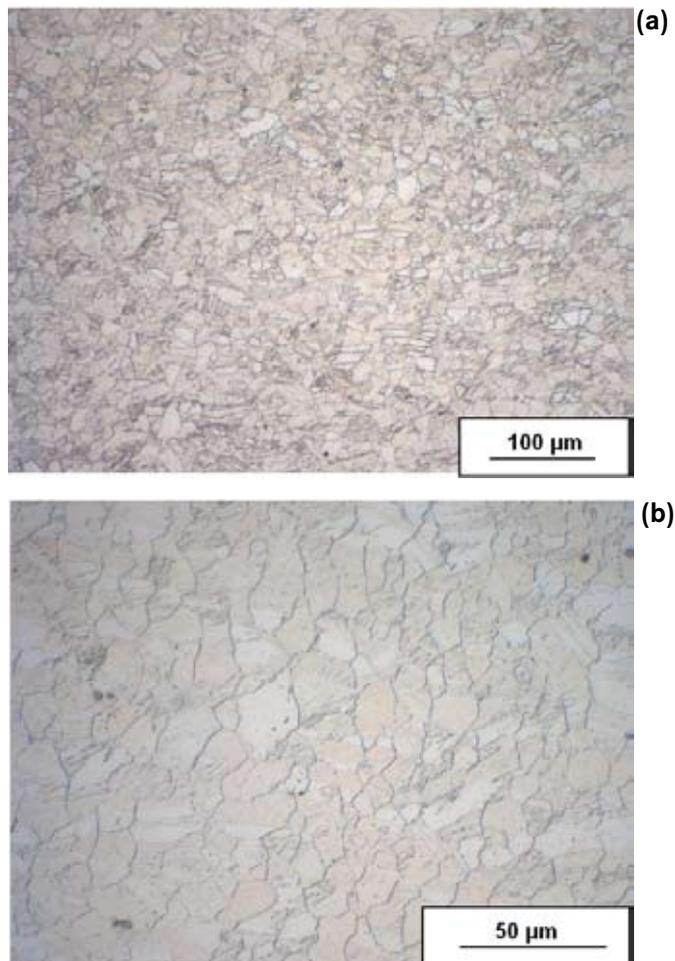


Fig. 2 - Aspetto microstrutturale del materiale base; ingrandimento per 2.a 200x e 2.b 500x.

Fig. 2 - Microstructure of the material base; magnification for 2.a and 2.b, 200x 500x.

i grani del metallo base, con forma inizialmente allungata, sono diventati equiassici e ricristallizzati sia nella zona di mescolamento sia nella zona di transizione tra quella termomeccanica e la nugget dopo Friction Stir Welding.

Nella figura 4 si può osservare la macro e microstruttura della FSW con disposizione AS - RS. Da una prima osservazione macrografica si nota che continua ad essere presente la discontinuità lineare precedentemente evidenziata nel giunto a singolo cordone, anche se, da un'analisi dimensionale del difetto si evidenzia una parziale riduzione della sua lunghezza complessiva e la sparizione della cricca sul fondo della lamiera. Questo aspetto porta a pensare ad una tendenza verso l'eliminazione delle discontinuità avute con singola passata. A compensare questi vantaggi, si sono ottenute ulteriori cavità di dimensioni maggiori.

Le figure da 4b a 4g mostrano alcuni particolari micrografici. In particolare, nella 4b si può notare la zona inalterata del materiale base (MB); nella 4c si vede la zona di mescolamento; la 4d e 4g mostrano alcuni particolari della zona di transizione tra quella di mescolamento e materiale base con grani ricristallizzati dinamicamente di dimensione del

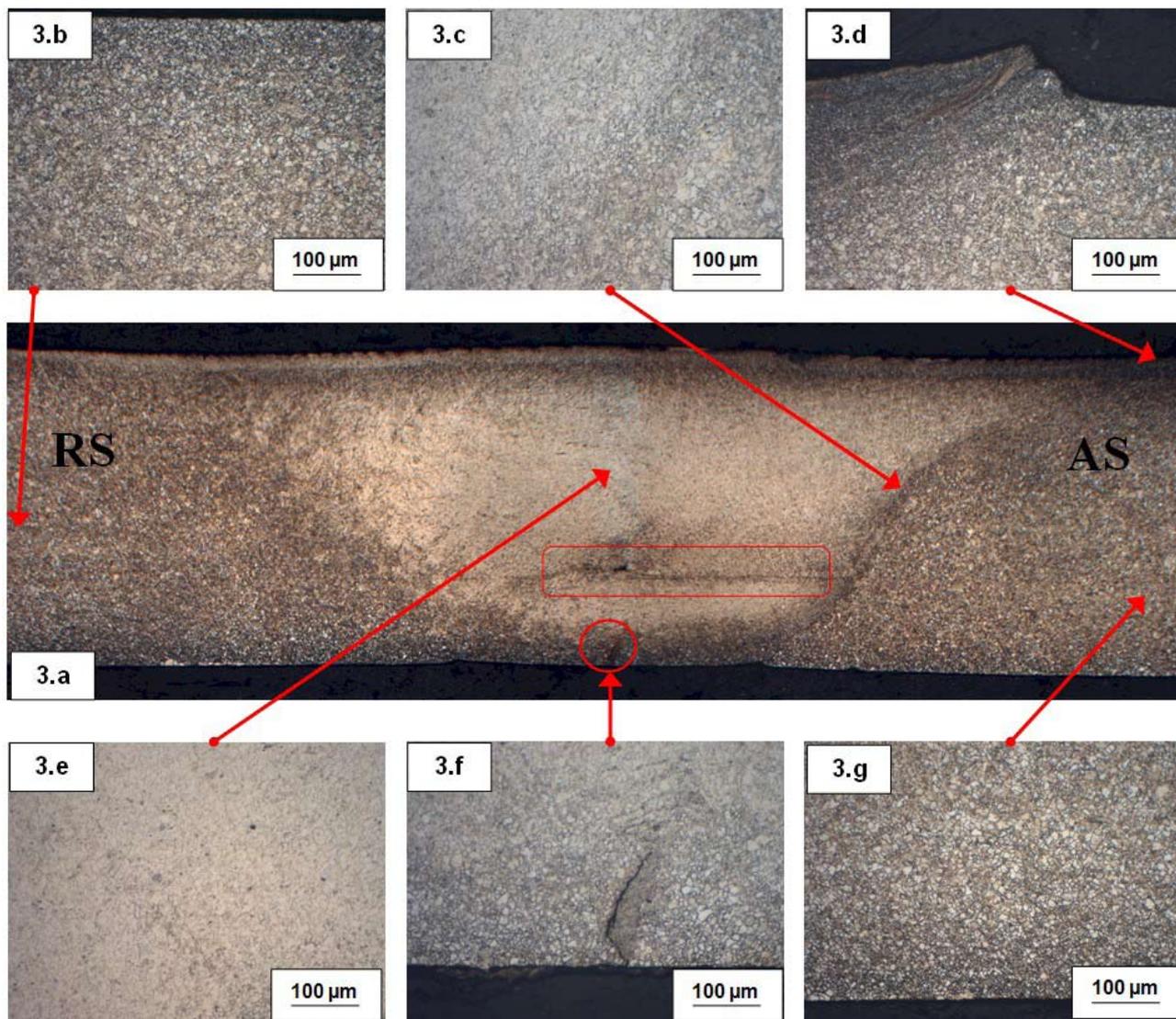


Fig. 3 - (a) Mappatura FSW a singolo cordone di AZ31B; (b) materiale base; (c) zona di transizione termomeccanicamente alterata; (d) zona di materiale deformato all'estremità dell'utensile; (e) zona di mescolamento; (f) cricca sulla parte inferiore del campione; (g) zona termicamente alterata.

Fig. 3 - (a) Mapping FSW single bead of AZ31B; (b) base material; (c) transition thermomechanical affected zone; (d) zone of material deformed at the end of the tool; (e) nugget zone; (f) crack on the bottom of the sample; (g) heat affected zone.

ordine di $1\mu\text{m}$; nelle 4e e 4f si notano alcune cavità formate nella zona di mescolamento.

Nella figura 5 si può osservare la macro e microstruttura della FSW con disposizione AS - AS. Da una osservazione della mappatura, sembrerebbe che il difetto lineare sia stato completamente eliminato. Le figure da 5b a 5g mostrano alcuni particolari micrografici ad ingrandimento 200x.

PROVE DI MICRODUREZZA HV

La figura 7 mostra l'andamento dei profili di microdurezza Vickers rilevati sulla linea mediana dello spessore (1mm di profondità) per i tre campioni saldati. Precedenti studi

sperimentali effettuati su giunti saldati a singola passata, mostrano chiaramente che la durezza è estremamente sensibile ai parametri di lavorazione. Una ricerca di Darras e dei suoi collaboratori [5], ha dimostrato le variazioni della durezza per diverse combinazioni di velocità di rotazione e traslazione. L'effetto della velocità di rotazione sulla durezza è mostrato in figura 6(b), dove si osserva come all'aumentare della velocità di rotazione, la durezza tenda a diminuire; un aumento della velocità di rotazione conduce ad un aumento della temperatura con conseguente incremento della dimensione media del grano e, secondo la relazione di Hall-Petch, richiamata anche da Sutton, la durezza è inversamente proporzionale alla granulometria [6]. Pertanto, un affinamento del grano può essere raggiunto a basse velocità di rotazione.

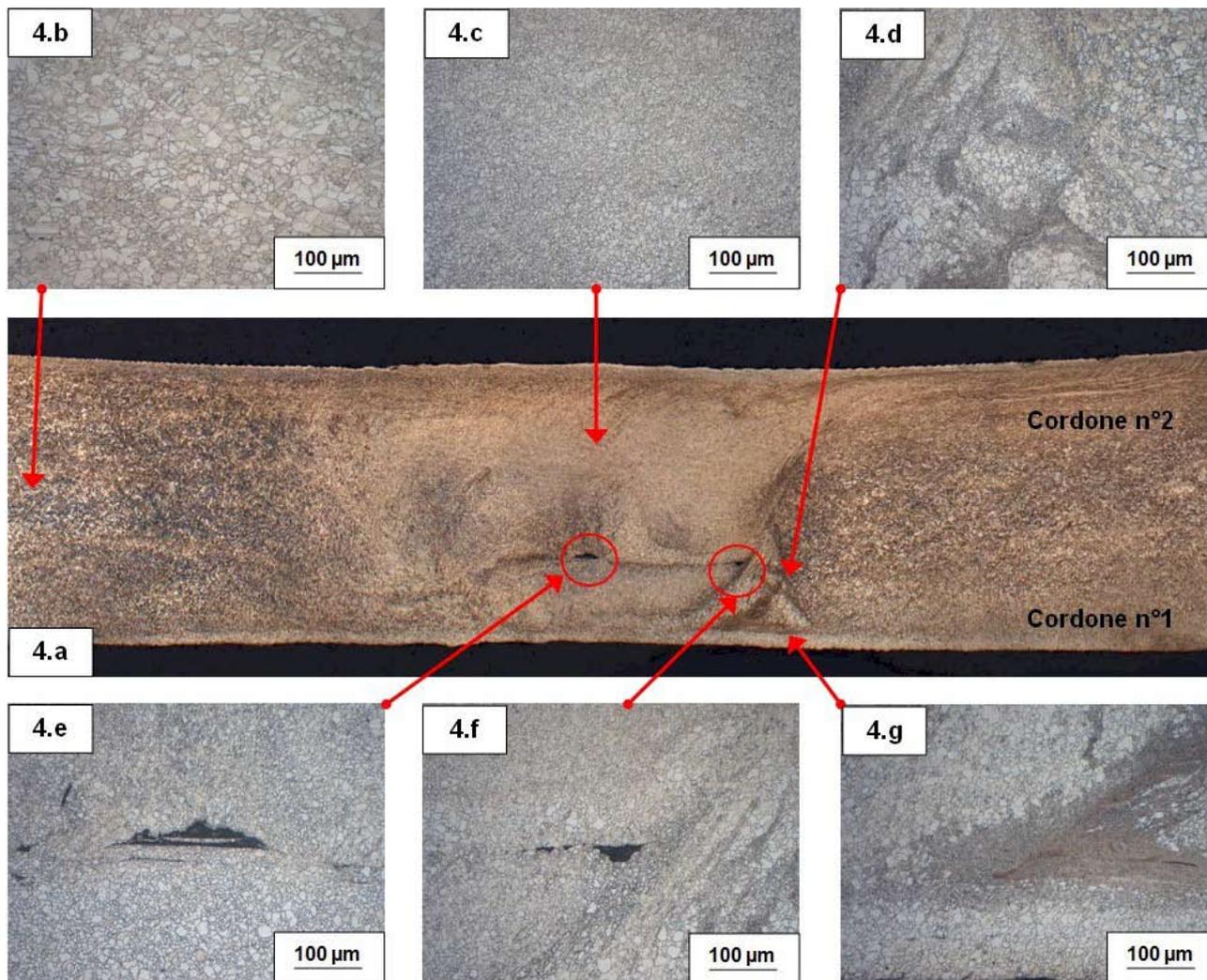


Figura 4. (a) Mappatura FSW a doppio cordone e disposizione di saldatura AS-RS di AZ31B; (b) materiale; (c) zona di mescolamento; (d - g) particolari della zona di transizione tra quella di mescolamento e materiale base; (e - f) ingrandimenti di cavità, formate nella zona di mescolamento.

Figure 4. (a) Mapping FSW double bead and arrangement of welding AS-RS of AZ31B; (b) base material; (c) nugget zone; (d - g) details of the transition zone between the mixing and the base material; (e - f) magnification of cavities, formed in the nugget zone.

L'effetto della velocità di traslazione sulla durezza è opposto a quello della velocità di rotazione come mostrato nella figura 6(a). Un aumento della velocità di traslazione, riduce il tempo di esposizione della zona trasformata a elevata temperatura generata dalla rotazione dell'utensile, che a sua volta limita la crescita del grano. Pertanto, si prevede che un maggior affinamento può essere ottenuto aumentando la velocità di traslazione.

Nel presente studio e con i parametri di saldatura scelti, il profilo della saldatura con singolo cordone presenta una durezza maggiore nella zona di mescolamento rispetto al metallo di base. Questo andamento può essere giustificato dalla dimensione minore del grano nella zona di mescolamento ($3 \pm 0.2 \mu\text{m}$) rispetto al materiale base ($12 \pm 0.9 \mu\text{m}$). In prossimità della zona di transizione TMAZ con ZTA

si registrano valori di durezza che scendono sotto quelli del MB. La caduta di durezza nella zona termicamente alterata è dovuta al fatto che, in tale zona, non vi è alcuna deformazione meccanica causata dal mescolamento dell'utensile, ma la temperatura massima raggiunta è sufficiente per portare ad un addolcimento del materiale. Questo risultato è in accordo con i risultati riportati in precedenza per diverse leghe di alluminio [7 - 11].

Nei giunti saldati con tecnica a doppia passata, si registra un aumento dei valori nella zona di mescolamento simili a quelli a singola passata e leggermente più elevati, ma si nota un miglior raccordo nella diminuzione dei valori fino ad arrivare nella zona inalterata del materiale base.

Il lieve incremento dei valori massimi è da attribuire all'ulteriore affinamento del grano nella zona di mescolamento

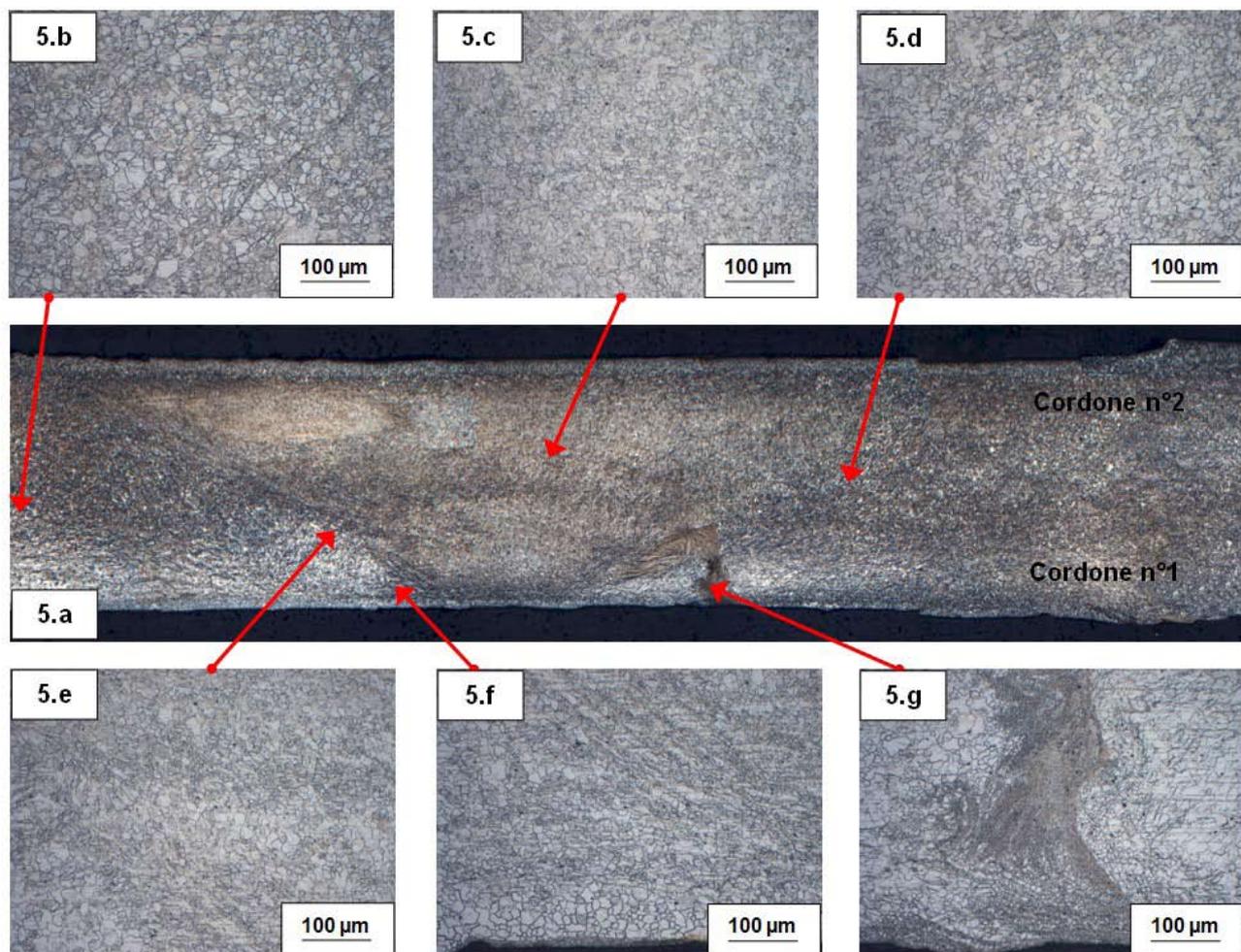


Figura 5. (a) Mappatura FSW a doppio cordone e disposizione di saldatura AS-AS di AZ31B; (b) materiale base; (c) zona di mescolamento; (d, e, f, g) particolari della zona di transizione tra quella di mescolamento e materiale base.

Figure 5. (a) Mapping FSW double bead and arrangement of welding AS-AS of AZ31B; (b) base material; (c) nugget zone; (d, e, f, g) details of the transition zone between nugget and base material.

registrato con la seconda passata ($2.6 \pm 0.2 \mu\text{m}$ anziché $3 \pm 0.2 \mu\text{m}$ con singola). Il profilo più regolare porta a pensare ad una maggiore uniformità microstrutturale ottenuta a seguito della FSW da due lati, rispetto alla singola FSW.

PROVE DI TRAZIONE

Le proprietà meccaniche dei tre giunti saldati sono state valutate mediante prove di trazione effettuate a temperatura ambiente e confrontate con quelle ottenute dal materiale base (MB). I provini sono stati estrapolati dalle lamiere saldate e le prove sono state effettuate con direzione di carico perpendicolare alla linea di saldatura. Nella tabella 2 sono riportate le proprietà meccaniche dei giunti saldati (tensione nominale massima UTS, tensione di snervamento $\sigma_0.2$, deformazione nominale a rottura UE). Nella figura 8 sono stati riportate le curve sollecitazione nominale (s) vs.

deformazione nominale (e). Sono state eseguite almeno tre ripetizioni per ogni condizione.

Per il campione a singola saldatura, la rottura è avvenuta nel lato advancing, tipico della tradizionale FSW [8], e per quelli a doppia, sempre nel lato advancing identificato dalla prima passata. Tutti i campioni, sia del materiale base sia quelli giunti FSW si sono fratturati a 45° rispetto al piano di sollecitazione. In particolare, per quello a singola passata e quello FSW AS-RS la frattura ha avuto inizio dalla parte inferiore (lato opposto all'utensile). Questo è caratterizzato dal fatto che in quella zona si è avuta una mancanza di fusione al vertice, oltre che un maggior numero di difetti volumetrici.

Inoltre, per i campioni saldati con doppia passata si è registrato un incremento del carico di rottura (UTS) di circa 9% rispetto a quello a passata singola. L'allungamento finale (UE) maggiore è stato ottenuto con la disposizione FSW AS-AS (UE=0.056).

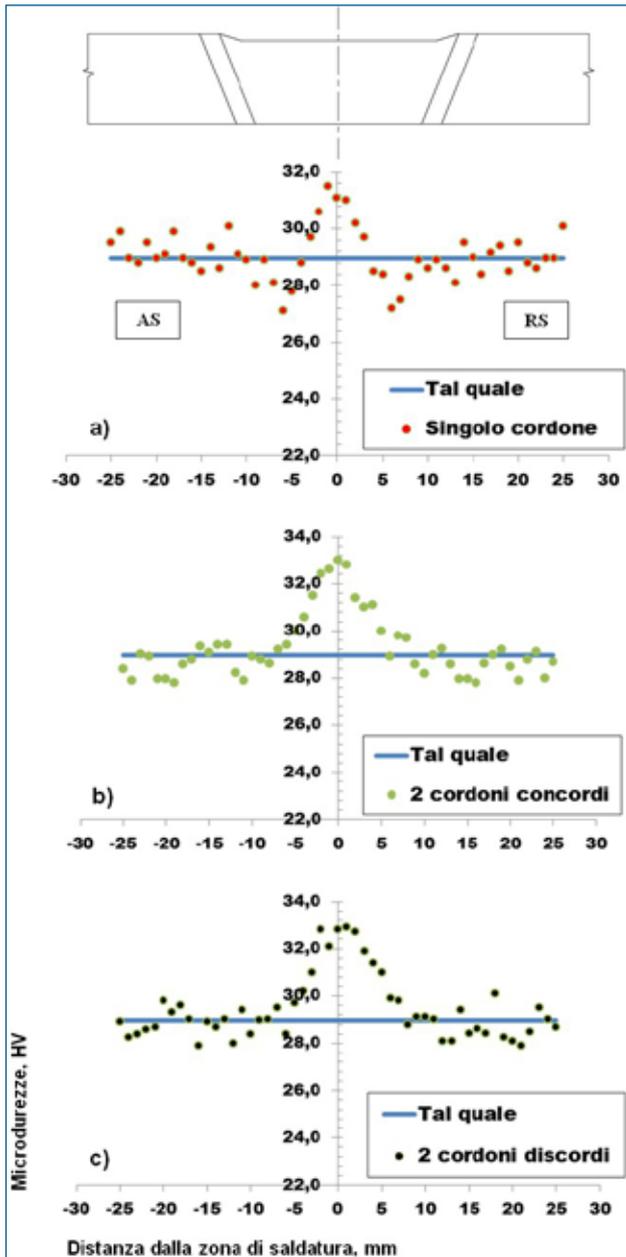


Fig. 6 - Variazione della durezza Vickers di un giunto FSW AZ31B (a) con la velocità di traslazione; (b) con la velocità di rotazione.

Fig. 6 - Plot of Vickers hardness of a joint FSW AZ31B (a) with the travel speed; (b) with the rotation speed.

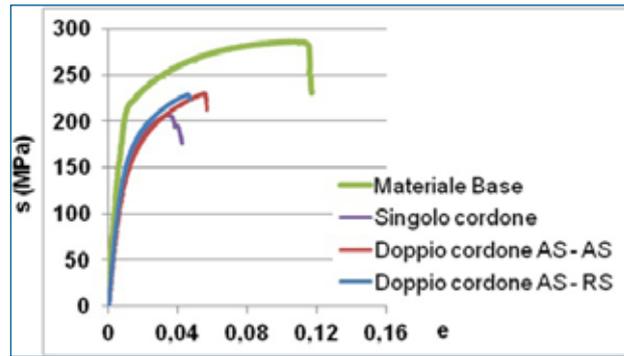


Fig. 8 - Curve tensione nominale vs. deformazione nominale dei giunti saldati con le diverse disposizioni ed a confronto con il materiale base.

Fig. 8 - Strain-stress curves of welded joints with different arrangements and in comparison with the base material.

ANALISI HRSEM E EDS

Dopo le prove di trazione, i campioni a doppio cordone AS-AS e AS-RS sono stati esaminati tramite microscopio elettronico a scansione ad alta risoluzione (HRSEM) e spettroscopia a dispersione di energia (EDS).

In entrambi i campioni si osserva che la frattura è di tipo transgranulare.

Sulla superficie di frattura, coerentemente con la presenza di microstrutture molto variabili, si riscontrano aree con caratteristiche differenti; in prossimità della zona di mescolamento (punta del campione) del punto di rottura si osservano dei microvuoti (dimples), mentre spostandosi verso l'interno compaiono anche strutture con caratteristiche più vicine a quelle del clivaggio. La presenza di dimples indica la presenza di discontinuità di varia natura (inclusioni, impurezze, pile-up, dislocazioni) e le dimensioni dei dimples sono legate al numero ed alla distribuzione dei microvuoti che hanno nucleato.

La principale differenza tra le due tipologie di campioni risiede nelle differenti dimensioni dei dimples. Nella zona di frattura del doppio cordone AS-RS, infatti, i dimples sono più piccoli e questo indica una maggiore presenza di discontinuità localizzate (inclusioni).

Come già osservato in precedenti lavori [Lim et al] [8], anche in questo caso la frattura ha probabilmente avuto inizio nelle zone di clivaggio, poi la coalescenza dei microvuoti durante l'applicazione del carico, ha causato la diminuzione della resi-

Campione	Proprietà meccaniche		
	UTS (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	UE
MB AZ31	280	217	0.118
SINGOLA FSW	206	131	0.041
DOPPIA FSW AS-AS	230	133	0.056
DOPPIA FSW AS-RS	228	141	0.047

Tabella 2. Proprietà meccaniche dei giunti saldati e del materiale base.

Table 2. Mechanical properties of welded joints and base material.

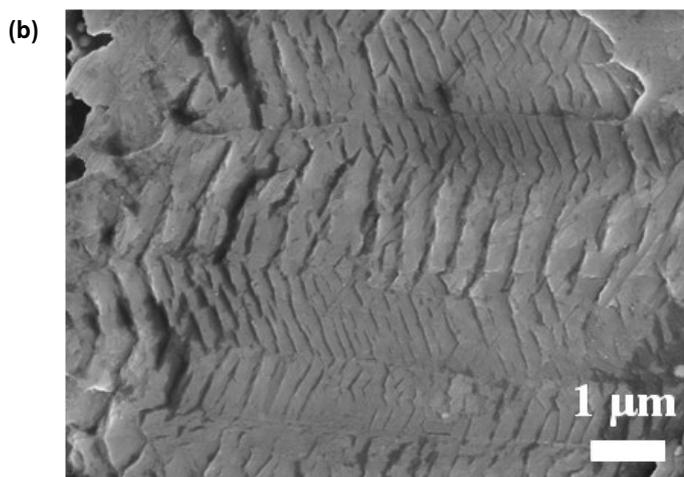
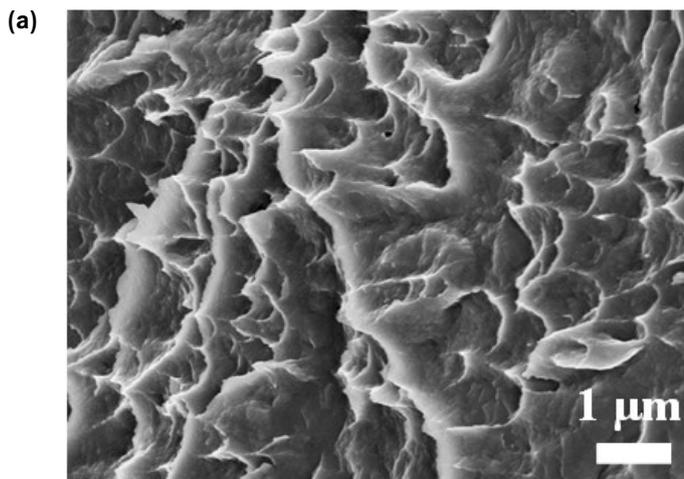


Fig. 9 - Campione doppio cordone concorde AS-AS:
a) Zona con dimples, b) zona con caratteristiche di
clivaggio.

Fig. 9 - Specimen double cord arrangement AS-AS: a) Zone with dimples, b) zone with characteristics of cleavage

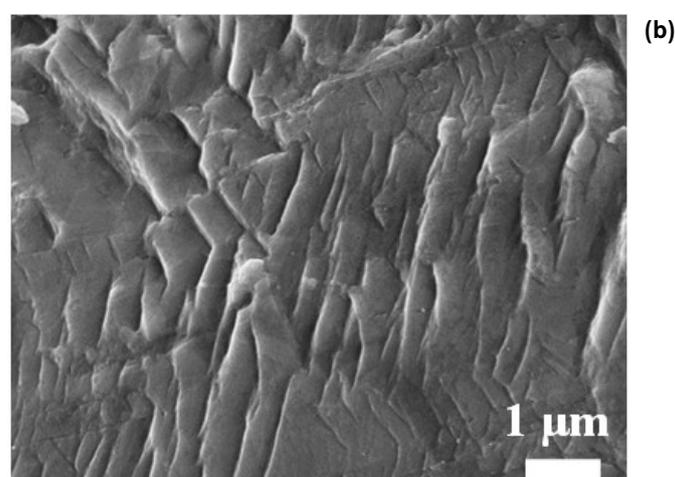
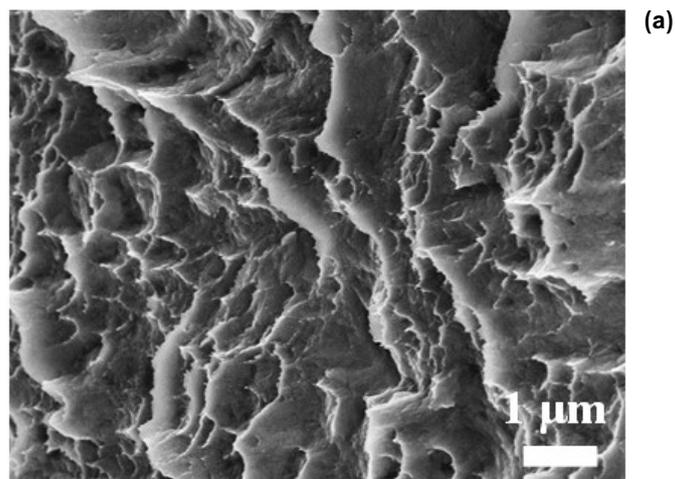


Fig. 10 - Campione doppio cordone discorde AS-RS:
a) Zona con dimples, b) zona con caratteristiche di
clivaggio.

Fig. 10 - Specimen double cord arrangement AS-RS: a) Zone with dimples, b) zone with characteristics of cleavage.

stenza a trazione e la conseguente rottura dei campioni. Le inclusioni, probabilmente rimaste intrappolate nella matrice durante il processo di FSW, sono state analizzate tramite microanalisi a raggi X eseguendo una scansione lungo la linea in giallo (Figura 11). In presenza delle particelle è evidente la differenza di composizione tra queste e la matrice circostante; nello specifico si osserva una diminuzione della quantità di Mg e la presenza di elementi quali C, Ca e O. Va ricordato che lo strato superficiale di ossido, presente inizialmente sulla lamiera, per effetto del processo di FSW viene trascinato all'interno del cordone, nella zona di mescolamento, e questo fenomeno può essere la causa della presenza delle inclusioni.

CONCLUSIONI

Dal confronto dei campioni per le diverse tecniche e condizioni di saldatura con Friction Stir Welding, si è evidenzia-

to che i campioni saldati con tecnica di saldatura da due lati, manifestano una tendenza verso l'eliminazione delle discontinuità avute con singola passata; Nella disposizione AS - AS sembrerebbe che il difetto lineare sia stato completamente eliminato. Nei giunti saldati con tecnica a doppia passata, si registra un aumento dei valori della durezza nella zona di mescolamento simili a quelli a singola passata e leggermente più elevati ma si nota un miglior raccordo nella diminuzione dei valori fino ad arrivare nella zona inalterata del materiale base. Dalle prove di trazione si registra che i campioni saldati con doppia passata hanno avuto un incremento del carico di rottura (UTS) di circa 9% rispetto a quello a passata singola. Inoltre, l'allungamento finale (UE) maggiore è stato ottenuto con la disposizione AS-AS ed è superiore di circa il 25% rispetto la singola saldatura. L'analisi della zona di rottura dei campioni con doppia saldatura evidenzia una frattura di tipo transgranulare e si riscontrano aree miste con microvuoti e strutture con caratteristica di clivaggio.

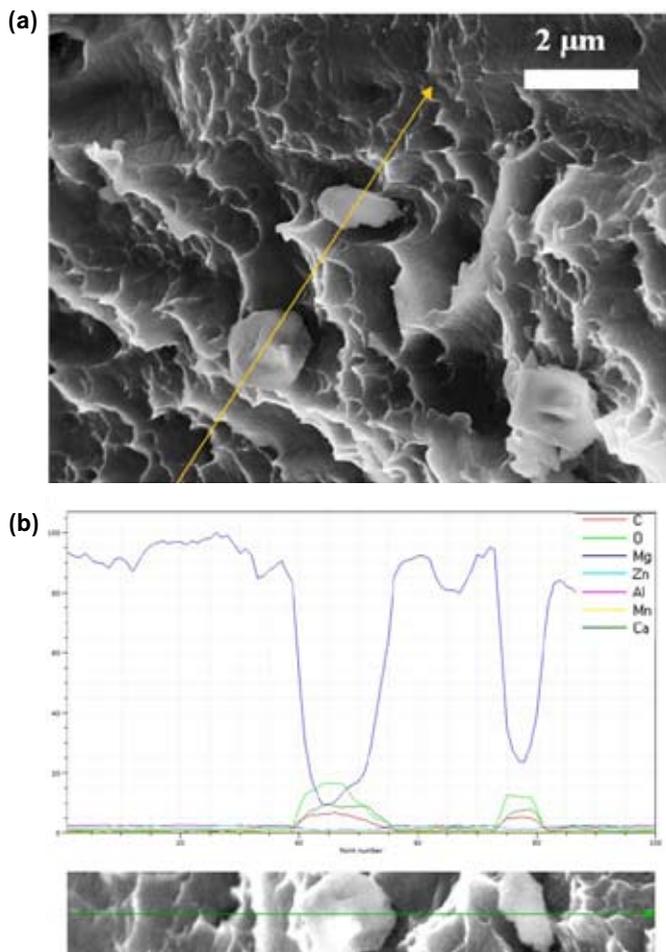


Fig. 11 - Microanalisi EDS eseguita in scansione di linea. a) Micrografia delle inclusioni, la linea gialla è quella lungo cui è stata effettuata la microanalisi punto per punto, b) Grafico della composizione in funzione dei punti della linea; risulta è evidente la variazione di composizione in corrispondenza delle discontinuità intercettate dalla linea.

Fig. 11 - EDS line scan performed. a) Micrograph of the inclusions, the yellow line is the one along which the microanalysis was carried out point by point, b) Graph of the composition as a function of the points of the line; results is evident the composition variation in correspondence of the discontinuities intercepted by the line.

BIBLIOGRAFIA

- [1] P. Cao, Ma Qian, D. H. StJohn, "Effect of Manganese on Grain Refinement of Mg-Al based Alloys", Scripta Materialia 2006, Vol. 54, 1853-1858.
- [2] Wang Xunhonga, Wang Kuaishe: «Microstructure and properties of friction stir butt-welded AZ31 magnesium alloy» Materials Science and Engineering A 431 (2006) 114-117.
- [3] G. Buffa, G. Campanile, L. Fratini, A. Prisco, «Friction stir welding of lap joints: Influence of process parameters on the metallurgical and mechanical properties», Materials science and Engineering A, 519 (2009) 19-26.
- [4] C. I. Chang, C. J. Lee, and J. C. Huang, "Relationship between

Grain Size and Working Strain Rate and Temperature during Friction Stir Processing in AZ31 Mg Alloy", Scripta Materialia, vol. 51, 2004, pp. 509-514.

[5] B.M. Darras, M.K. Khraisheh, F.K. Abu-Farha, M.A. Omar, «Friction stir processing of commercial AZ31 magnesium alloy», Journal of Materials Processing Technology 191 (2007) 77-81.

[6] Sutton, B. Yang, A. Reynolds, R. Taylor, «Micro structural studies of friction stir welds in 2024-T3 aluminum», Mater. Sci. Eng. A 323 (2002) 160-166.

[7] T. Nelson, R. Steel, W. Arbegast, «In situ thermal studies and post-weld mechanical properties of friction stir welds in age hardenable aluminum», Sci. Technol. Weld. Joining 8 (2003) 283-288.

[8] S. Lim, S. Kim, C. Lee, C. Yim, «Tensile behavior of friction-stir-welded AZ31-H24 Mg alloy», Metallurgical and Materials Transactions A June 2005, Volume 36, Issue 6, pp 1609-1612

[9] R. Nandan, T. DebRoy, «Recent advances in friction-stir welding - Process, weldment structure and properties», Bhadeshia Department of Materials Science and Engineering, Pennsylvania State University, University Park, PA 16802, USA.

[10] C.Gambaro, L.Fratini, A.Squillace, J.Adamowski, M.Ponte, G.Buffa, «Friction stir welding, Introduzione alla tecnologia», 2009, Aracne editrice, ISBN:978-88-548-2530-7.

[11] H.N.B. Schmidt, T.L. Dickerson, J.H. Hattel, «Material flow in butt friction stir welds in AA2024-T3» Original Research Article Acta Materialia, Volume 54, Issue 4, February 2006, Pages 1199-1209.

Comparison of joints AZ31 Mg alloy FSW welded on both side

Keywords: Mg AZ31, Friction Stir Welding both side welded; microstructure characterization light alloys, SEM.

In this study, we compared two different methods of Friction Stir Welding (FSW) of AZ31B magnesium alloy sheets. The effects of the welding process on the mechanical properties and microstructural joints were investigated by metallographic analysis by light microscopy, Vickers microhardness tests, tensile tests at room temperature and analysis of the fracture zone after tensile tests by means of a scanning electron microscope (SEM). From the results it is shown that in the technique with double welding, on both sides, compared with the technique welding from one side only, the mixing zone presents a greater homogeneity, a minor dimension of the grain and a hardness with symmetrical distribution of the profiles. In addition, macroscopic defects present in single joints have been significantly reduced in those with welding from both sides. From the tensile tests, there was an increase in the tensile strength (UTS) of about 9% comparing double with single pass and a final elongation (EU) increased by 25% with the arrangement FSW-AS AS than the individual. From the analysis of the fracture zone with a scanning electron microscope at high resolution, it is noted that the fracture is of type transgranular in both samples welded from two sides.