

# Aspetti microstrutturali di un giunto friction stir welded tra una lega di magnesio (AZ31) e una di alluminio (AA6061)

M. Cabibbo, D. Ciccarelli, A. Di Salvia, G. Quercetti, S. Spigarelli

*In questo studio sono stati caratterizzati giunti Friction Stir Welded (FSW) di due metalli diversi: una lega di alluminio AA6061 e una lega di magnesio AZ31B. Sono state eseguite analisi metallografiche sia mediante microscopia ottica (dimensione media dei grani nella zona del nugget), che mediante microscopia elettronica a scansione (microanalisi dei precipitati presenti nelle due leghe all'interno del nugget). Prove di microdurezza sono state effettuate lungo tutto il profilo del giunto saldato nel lato advancing, retreating e lungo il cordone stesso. Il nugget è caratterizzato da estesi fenomeni di ricristallizzazione dinamica, con conseguente grani fini ed equiassici, generati dalla deformazione plastica e la forte escursione termica in fase di saldatura FSW. La durezza diminuisce dal metallo base verso la zona di mescolamento dove i valori sono più bassi, nonostante i grani siano di ridotte dimensioni. Le osservazioni mediante microscopia elettronica a scansione, accoppiate dalle indagini microanalitiche, hanno chiaramente evidenziato la formazione di fasi secondarie all'interno dei due materiali nella zona del nugget, generate dal moto rotativo di spin del pin e dalle conseguenti escursioni termiche.*

## Parole chiave:

Metalli non ferrosi, trasformazione di fase, saldatura, caratterizzazione materiali, microscopia elettronica, prove meccaniche

## INTRODUZIONE

Tra le tecnologie di giunzione allo stato solido che si sono sviluppate a livello industriale, la Friction Stir Welding (FSW) risulta particolarmente adatta per la saldatura di leghe difficilmente saldabili con tecnologie fusorie, ad esempio i processi TIG e MIG, in quanto si riducono o si evitano problematiche legate alla cricatura a caldo, porosità di gas occluso, elevato apporto termico e distorsioni. [1-2].

La Friction Stir Welding (FSW) è una tecnologia utilizzata principalmente per la giunzione di metalli non ferrosi e loro leghe. Si tratta di un processo allo stato solido che non fonde il materiale da saldare ma lo porta allo stato plastico grazie al calore sviluppato dal movimento dell'utensile che ruotando e avanzando all'interno delle zone da saldare ne genera la giunzione [1-2].

Nel processo di saldatura (Fig. 1) un utensile cilindrico, composto da una spalla (shoulder) e da una punta (pin), opportunamente sagomato, viene posizionato all'altezza della linea di giunzione dei componenti, che devono essere rigidamente accostati, quindi posto in rotazione e fatto traslare lungo la linea di giunzione.

L'attrito che si genera nel contatto tra l'utensile ed il materiale,

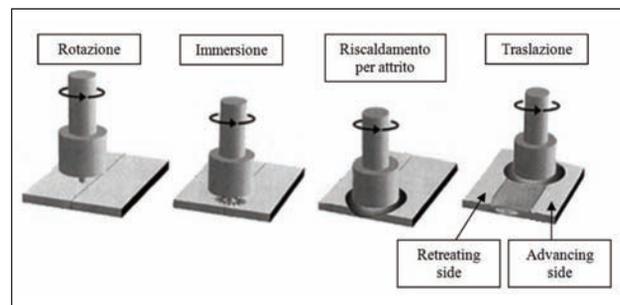


FIG. 1 Schematizzazione del processo FSW.

FSW schematic representation.

nel suo moto di roto-traslazione lungo la linea di giunzione, provoca un riscaldamento localizzato senza che venga mai raggiunta la temperatura di fusione, favorendo alti tassi di deformazione e il rimescolamento plastico dei lembi di saldatura.

Il flusso del materiale, durante il processo, è particolarmente complesso in quanto dipende da più parametri, quali: geometria dell'utensile, velocità di rotazione e traslazione della saldatura, senso di rotazione (orario o antiorario), angolo di inclinazione del pin, proprietà del materiale etc. [3].

In genere, si può osservare un flusso plastico asimmetrico che identifichi due zone definite "advancing side" e "retreating side" poste ai lati della linea media del cordone e designate sulla base delle direzioni delle velocità di rotazione e di avanzamento. La microstruttura della zona saldata consiste in una zona cen-

M. Cabibbo\*, D. Ciccarelli, A. Di Salvia,  
G. Quercetti, S. Spigarelli

Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche  
(DIISM), Università Politecnica delle Marche,  
Via Brecce Bianche, 60131 - Ancona  
Corresponding author: Prof. Marcello Cabibbo  
(Tel. 0712204728; Fax: 0712204801, Email: m.cabibbo@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	resto
AA6061	resto	0.100	0.009	0.650	0.150	0.180	--	Cr 0.190 Ti 0.02	0.970

**Tab. 1** Composizione chimica nominale (% in peso) delle matrici in lega AZ31B e AA6061.

Chemical composition (wt. %) of AZ31B and AA6061.

trale “nugget”, una zona termo-meccanicamente alterata (TMAZ) ed una zona termicamente alterata (HAZ).

Il processo è descritto in modo dettagliato in diversi lavori di recente pubblicazione [1-8].

In questo lavoro, l'attenzione è rivolta all'analisi ed interpretazioni delle caratteristiche microstrutturali di saldature di leghe dissimili: AZ31B e AA6061. In particolare, sono qui illustrate e caratterizzate le modificazioni microstrutturali che sono indotte dal processo di saldatura per FSW nella zona critica di interdizione del nugget.

## PROCEDURE SPERIMENTALI

Le composizioni chimiche nominali delle rispettive matrici sono riportate in Tab. I.

Le lamiere di dimensione 200 mm x100 mm e spessore 3,175 mm sono state saldate mediante Friction Stir Welding presso il Mechanical Engineering Department del Braude College, Karmiel (Israele), utilizzando una macchina VA65II SEIKI CNC con un utensile di acciaio H-13, con spalla del diametro di 20 mm e pin conico con base di diametro 6,3 mm, punta con diametro di 4,5mm e lunghezza 3 mm. La saldatura è stata realizzata applicando una forza verticale di 10 kN costante, una velocità di rotazione di 800 rpm e una velocità di traslazione di 75 mm/min. Per effettuare le analisi microstrutturali e le misure di microdurezza, i campioni sono stati ricavati nel centro dei giunti saldati e perpendicolarmente alla linea di avanzamento dell'utensile.

Sui giunti FSW non è stato eseguito alcun trattamento termico post-saldatura.

Per osservare il campione al microscopio ottico si è proceduto con operazioni di lucidatura meccanica della superficie seguita da attacco chimico con soluzione di acido picrico con 10 ml di acido acetico, 4,2 g di acido picrico, 10 ml di acqua distillata, 70 ml di etanolo al 95%, per la parte in Magnesio, e soluzione di soda caustica con 1 g NaOH in 100 ml di acqua distillata e tempo di immersione 5-10 secondi, per l'Alluminio.

I campioni sono stati analizzati tramite il microscopio Reichert Jung, modello MEF 3. La panoramica del giunto saldato è stato realizzata a bassi ingrandimenti (<100x) per poter visualizzare i materiali base, la zona di mescolamento e le zone di transizione all'interno del nugget e nelle regioni ad esso prospicienti. Sono invece stati adottati ingrandimenti di almeno 1000x, per le osservazioni microstrutturali della zona del nugget.

Le osservazioni e analisi quantitative dei fenomeni di interdizione che avvengono nel nugget tra magnesio e alluminio, sono state eseguite mediante microscopia elettronica a scansione utilizzando uno Zeiss-Supra 40 (FEGSEM) equipaggiato da un sistema di microanalisi EDS (Energy Dispersive Spectrum).

Le valutazioni delle dimensioni medie dei grani sono state fatte mediante il metodo delle intercette lineari.

Le misure di micro durezza sono state effettuate con un microduremetro Remet modello HX 1000 ed un carico di 100gf. Sono state effettuate un totale di 100 misurazioni lungo tutto il profilo del giunto saldato dal metallo base AA6061 al metallo base AZ31, attraversando le zone termicamente alterate (HAZ e TMAZ) ed il nugget, sia nella zona advancing che in quella retreating.

## RISULTATI E DISCUSSIONE

### Caratterizzazione microstrutturale

La Fig. 2 riporta la mappatura del giunto oggetto di studio, ottenuta componendo una serie di micrografie ottiche (ca. 30). Nella struttura generale non si osservano difetti di saldatura del giunto, come cavità, porosità, inclusioni e questo indica che i parametri di saldatura scelti sono idonei. La Fig. 2(a) evidenzia la classica struttura di un tipico giunto saldato per FSW, composta da quattro zone distinte e simmetriche rispetto al cordone di saldatura: zona di mescolamento termo-meccanico (nugget), zona termo-meccanicamente alterata (TMAZ), zona termicamente alterata (HAZ) e zone di materiale base, AZ31B e AA6061, non alterate.

L'intera zona di mescolamento è identificata dalla presenza dei tipici “onion rings”, caratteristici della FSW. Studi precedenti, Sutton [5] e Krishnan [6], hanno analizzato il meccanismo di formazione dei “onion rings” in leghe di alluminio, e hanno suggerito che la distanza tra gli anelli è proporzionale al movimento in avanti dello strumento in rotazione.

Maggiori ingrandimenti della zona nugget hanno evidenziato una struttura ricristallizzata dinamicamente (dinamically recrystallized zone, DXZ) a grano fine dovuta all'intensa deformazione plastica ed all'effetto ciclo termico per attrito durante la saldatura (Fig. 2V e 2VI).

Nelle Fig.2(V) e 2(VI) si può osservare una microstruttura a due bande con contrasto differente. La banda di color grigio scuro è la lega di magnesio, mentre quella più chiara è la lega di alluminio. Inoltre, nella zona del nugget, si è rilevata una riduzione della spigolosità dei grani, generata dall'effetto dell'azione abrasiva esercitata dall'utensile, con una conseguente riduzione degli sforzi cui il materiale è sottoposto durante il processo FSW. Il materiale base AZ31B ed AA6061 può essere visto in fig. 2(I) e 2(VIII), rispettivamente.

La Fig. 2(II) mostra i grani di Mg ricristallizzati nella zona di transizione termicamente alterata (HAZ). Questa zona subisce il ciclo termico, ma non è sottoposta a deformazione plastica, conserva la stessa struttura dei grani di quella del materiale base. Tuttavia, l'esposizione termica oltre i 250°C, esercita un significativo effetto sulla struttura dei precipitati. Le Fig. 2(III) e 2(IV) mostrano una microstruttura a banda lamellare ricca di precipitati di Al e Mg già studiate in altri lavori su saldature dissimili FSW [7]. Fig. 2(VII) mostra la microstruttura nella zona di transizione tra la lega di Al materiale di base e la zona di mescolamento.

La Fig. 3 riporta alcune immagini rappresentative della zona di interdizione del nugget. Nella figura sono inoltre riportati anche i diagrammi EDS che mostrano la natura chimica dei precipitati formati nel processo di saldatura all'interno di alluminio e magnesio. Le analisi EDS mostrano, infatti, che i precipitati di seconda fase che si sono formati a seguito del passaggio del pin nel cordone di saldatura (zona del nugget) sono, rispettivamente, Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>, nella AZ31, e Mg<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>, nella AA6061. La Fig. 3(e) illustra il processo di compenetrazione tra le due leghe nella zona del nugget.

Si noti (Fig. (3e)) che i grani della lega di magnesio AZ31 sono

FIG. 2

**Mappatura e micrografie, del giunto saldato, su una sezione longitudinale alla direzione di avanzamento del nugget;** (a) Mappatura FSW di AZ31B con AA6061; (I) materiale base AZ31B; (II) zona di transizione termicamente alterata lato AZ31B; (III-IV) zone a bande ricche di precipitati; (V-VI) zone di mescolamento con microstruttura a bande; (VII) zona di transizione lato AA6061; (VIII) materiale base AA6061.

(a) FSW Nugget zone showing both the AZ31B and AA6061 grained structure; (I) AZ31B base material; (II) AZ31B TMAZ; (III-IV) bands of grains decorated by precipitate particles; (V-VI) mixed zone of AZ31B and AA6061 grains; (VII) transition zone within AA6061; (VIII) AA6061 base material.

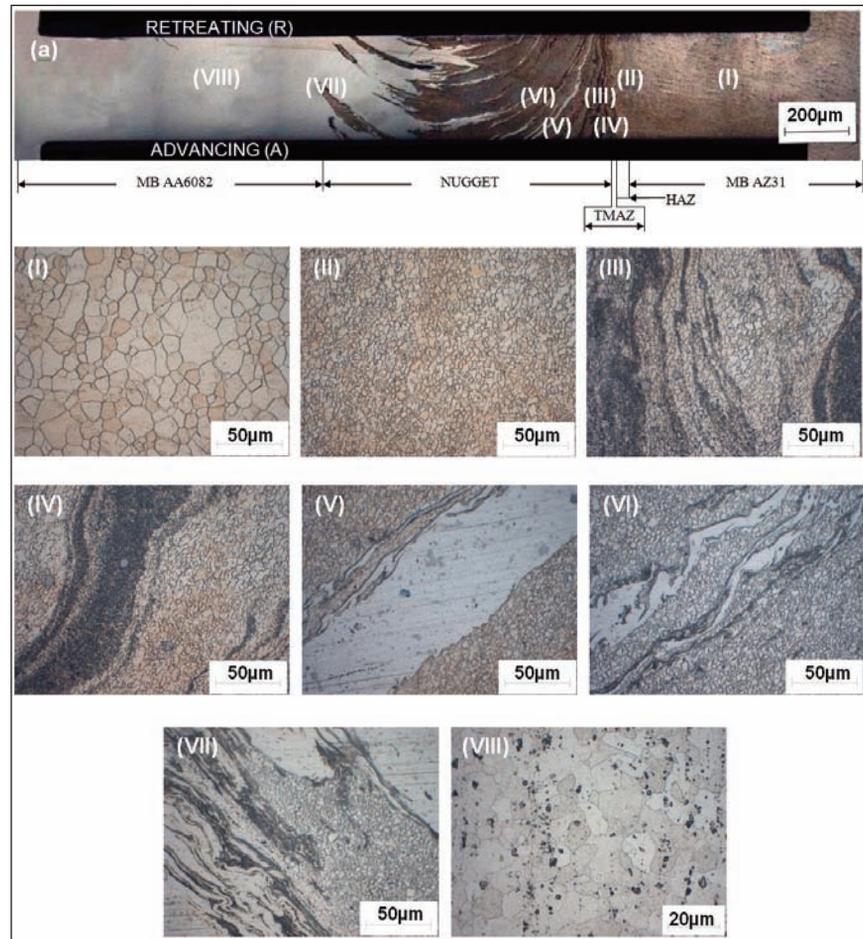
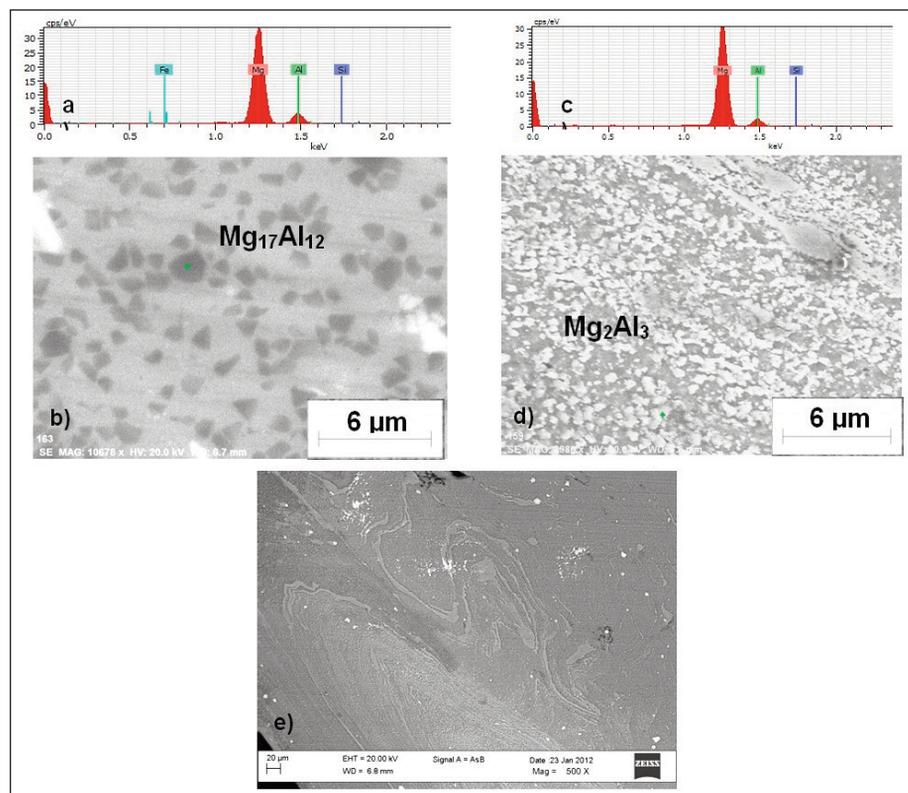


FIG. 3

**Analisi FEGSEM della zona del nugget.** a), b) interno di un grano di magnesio AZ31B, c), d) interno di un grano di alluminio AA6061. c) EDS dei precipitati all'interno dei grani di magnesio ( $Mg_{17}Al_{12}$ ), d) EDS dei precipitati all'interno dei grani di alluminio ( $Mg_2Al_3$ ). e) bande di grani di AA6061 e AZ31 generate dal pin nella zona del nugget. Le immagini sono state acquisite mediante segnale di elettroni retro diffusi e, pertanto, il contrasto cromatico riflette una differenziazione composizionale media tra precipitati e matrice circostante.

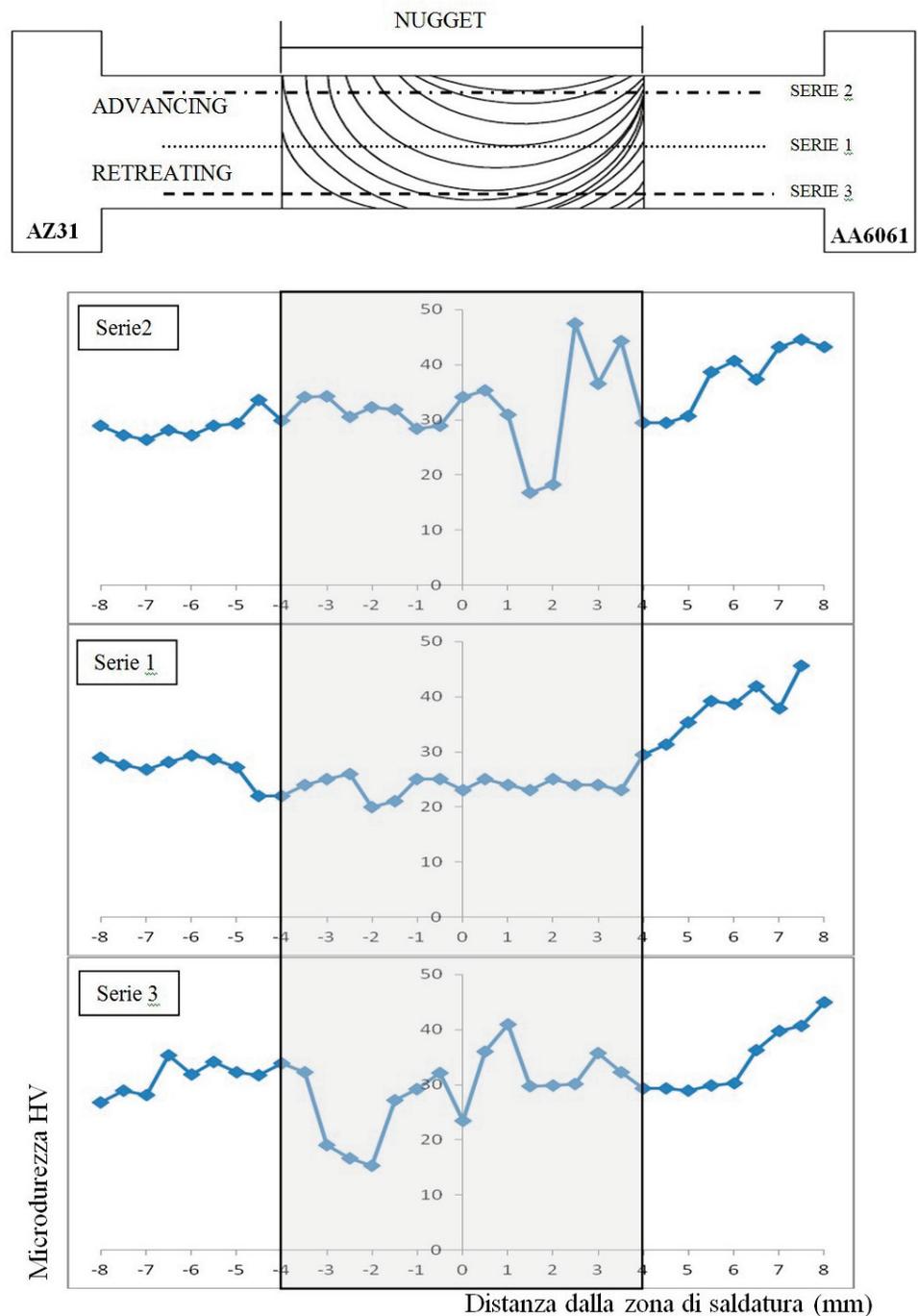
FEGSEM inspections and analyses of the nugget zone: a), b) AZ31B grain interior, c), d) AA6061 grain interior, c) EDS analyses of the detected secondary phase particles within the magnesium grains ( $Mg_{17}Al_{12}$ ), and within the aluminum grains ( $Mg_2Al_3$ ). AZ31 and AA6061 bands of grains were formed during the passage and material release of the FSW process and are shown in e).

All FEGSEM images were obtained using the back-scattered electron signal. Thereafter, the chromatic contrast is due to the different mean chemical composition of the particles respect the surrounding matrix.



**FIG. 4**  
**Profili di microdurezza Vickers del giunto FSW su una sezione longitudinale alla direzione di avanzamento della saldatura nelle zone advancing (serie 2), retreating (serie 3) e coassiale (serie 1) al cordone di saldatura.**

Microhardness profiles recorded across the FSW nugget: advancing side (serie 2), retreating side (serie 3) e along the mid welding line (serie 1).



stati deformati profondamente generando moti vorticosi all'interno della zona del nugget della parte dell'alluminio, dove i grani risultano essere deformati coinvolgendo un minor tasso di trasporto di materiale. Il ruolo del magnesio risulta essere pertanto fondamentale nel determinare la bontà ed efficienza del processo di saldatura per FSW in metalli diversi, come nel presente caso. In questo caso, infatti, il pin è stato piazzato all'interno del magnesio per favorirne la deformazione plastica alle alte temperature coinvolte nel processo di saldatura di non fusione, quale è la FSW. La compenetrazione delle due leghe è di fatto ad opera del magnesio, responsabile con le alte temperature raggiunte durante la saldatura di gran parte dell'interdiffusione atomica ( diffusa presenza di precipitazione di  $Mg_2Al_3$  all'interno della lega AA6061 e di  $Mg_{17}Al_{12}$  in AZ31). Le particelle bianche in Fig. (3e) sono intermetallici ricchi di ferro.

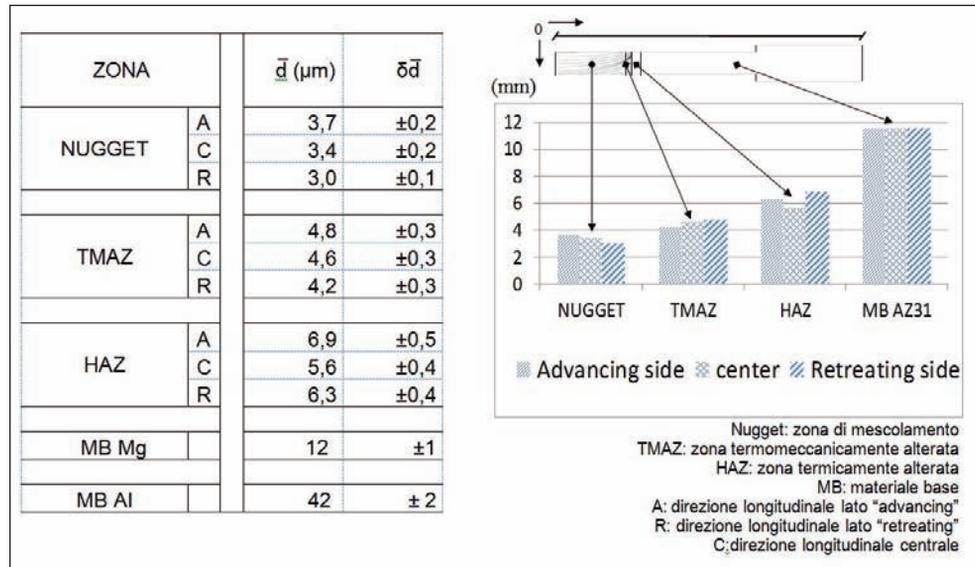
### Microdurezza Vickers

Test di microdurezza sono stati effettuati per misurare e valutare la resistenza alla penetrazione del materiale saldato nelle varie zone e l'eventuale presenza di composti precipitati. Sono state eseguite tre serie di impronte, parallele tra loro, con passo pari a 0,5mm. La prima è stata effettuata in direzione dell'asse centrale del campione, la seconda e la terza sono state effettuate nella parte retreating ed advancing rispettivamente e distanti 1mm dalle estremità laterali Fig.4.

La Fig. 4 mostra l'andamento dei profili di microdurezza Vickers lungo la sezione longitudinale a tre diverse quote: mediana (serie 1), lato del retreating (serie 2), e lato dell'advancing (serie 3). Dai grafici ottenuti si osserva che la durezza diminuisce gradualmente dal metallo di base attraverso l'HAZ e TMAZ e quindi alla zona di mescolamento in cui si sono raggiunti valori più

**FIG. 5**  
**Dimensione di grano e deviazione standard delle zone del giunto AA6061-AZ31B saldato FSW.**

*Mean grain size and related standard deviation of the different zones of the FSW joint (AA6061-AZ31B).*



bassi. Precedenti studi spiegano la correlazione della crescita del grano alla diminuzione della durezza [8].

Nel presente lavoro si è trovato che la durezza nella zona nugget ha valori più bassi proprio dove il grano ha una dimensione minore. Inoltre, nella zona di mescolamento delle serie 2 e 3, corrispondenti alla zona advancing e retreating rispettivamente, l'andamento delle microdurezze è irregolare, mentre è più regolare nella serie 1. Queste brusche variazioni e picchi dei valori sono da attribuire alla microstruttura complessa con vortici e lamelle di materiale misto, composti intermetallici e bande ricristallizzate prive di dislocazioni.

### Dimensione del grano

La dimensione del grano e deviazione standard, calcolate con il metodo dell'intercetta lineare, per le diverse zone sono riportate in Fig. 5.

Il materiale base AZ31B inizialmente presenta un grano fine di dimensione 12  $\mu\text{m}$  circa. Il contributo di un'intensa deformazione plastica e di un'esposizione ad alta temperatura all'interno della zona di mescolamento durante la FSW, induce evidentemente una ricristallizzazione e un successivo sviluppo della struttura granulare del nugget. A causa dell'azione concomitante della severa deformazione plastica e del calore sviluppato per attrito, si è osservato un sostanziale affinamento dei grani della matrice nel nugget di entrambi i materiali. L'effetto di affinamento è da imputarsi alla ricristallizzazione dinamica della matrice indotta dal processo e favorita dalla presenza delle particelle di rinforzo, che agiscono da siti preferenziali di nucleazione.

Inoltre, la distribuzione della temperatura nel giunto saldato, che è massima in corrispondenza del centro di contatto tra pin e spalla dell'utensile, diminuisce allontanandosi e aumenta dalla superficie inferiore della piastra alla superficie superiore con conseguente raffreddamento più veloce nella zona centrale del giunto [9]. Questo indica che i tempi di raffreddamento non sono sufficientemente elevati per avere un accrescimento del grano nella zona a temperatura più elevata.

Pertanto, la distribuzione della temperatura durante la FSW influenza la microstruttura della saldatura attorno e all'interno della zona di mescolamento. Sulla base di precedenti lavori [9-12] si è portati qui a credere che i fenomeni di affinamento dei grani imposti dal processo di FSW, in corrispondenza alla zona del nugget, siano in massima parte attribuibili al fenomeno di ricristallizzazione dinamica che avviene al passaggio del pin e dello shoulder.

### CONCLUSIONI

Il presente lavoro è stato dedicato allo studio micro strutturale della zona di interdiffusione del nugget di un giunto saldato per friction stir welding di due metalli diversi, una lega di magnesio AZ31 ed una di alluminio, AA6061. Si è visto che:

- La zona del nugget è caratterizzata da estesi fenomeni di ricristallizzazione in entrambe le leghe.
- Fenomeni di interdiffusione di alluminio in magnesio, e magnesio in alluminio, sono stati osservati sotto forma di precipitazione secondaria. La generazione di calore e deformazione plastica, durante FSW, ha generato nel nugget la precipitazione di fasi secondarie quali  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  all'interno dei grani di magnesio, e  $\text{Mg}_2\text{Al}_3$ , all'interno dei grani di alluminio.
- Profili di microdurezza presentati irregolari distribuzioni ed il valore della microdurezza nella zona di mescolamento (retreating) è più basso di quello dei materiali base. Inoltre si è visto che i singoli valori delle microdurezze dipendono dal punto esatto di misurazione in quanto la zona di mescolamento è fortemente disomogenea.

### RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare il prof. Michael Regev del Mechanical Engineering Department, ORT Braude College, Karmiel, Israele, per la realizzazione dei giunti saldati FSW AZ31/AA6061.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Buffa, G. Campanile, L. Fratini, A. Prisco, Friction stir welding of lap joints: Influence of process parameters on the metallurgical and mechanical properties. *Mater. Sci. Eng.* A519 (2009) 19-26.
- [2] 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
- [3] H.N.B. Schmidt, T.L. Dickerson, J.H. Hattel, Material flow in butt friction stir welds in AA2024-T3. *Acta Mater.* 54 (2006) 1199-1209.
- [4] P.M.G.P. Moreira, T. Santos, S.M.O. Tavares, V. Richter-Trummer, P. Vilaça, P.M.S.T. de Castro, Mechanical and metallurgical characterization of friction stir welding joints of AA6061 with AA6082. *Materials and Design* 30 (2009) 180-187.
- [5] M.A. Sutton, B. Yang, P. Reynolds, R. Taylor, Microstructural studies of friction stir welds in 2024-T3 aluminum. *Mater. Sci. Eng.* A323 (2002) 160-166.
- [6] K.N. Krishnan, On the formation of onion rings in friction stir welds. *Mater. Sci. Eng.* A327 (2002) 246-251.
- [7] R.D. Flores, L.E. Murr, D. Shindo, E.A. Trillo, Friction-stir welding of

- metals and alloys: undamental studies of solid-state and intercalated flow. Proc. Int. Conf. on Processing and Manufacturing of Advanced Materials, Las Vegas, NV, 2000, 4-8.
- [8] W.B. Lee, Y.M. Yeon, S.B. Jung, Joint properties of friction stir welded AZ31B-H24 magnesium alloy. Mater. Sci. Technol. 19 (2003) 785-790.
- [9] R. Nandan, T. DebRoy, H.K.D.H. Bhadeshia, Recent advances in friction-stir welding - Process, weldment structure and properties. Progress in Materials Science 53 (2008) 980-1023.
- [10] M. Cabibbo, E. Meccia, E. Evangelista, TEM analysis of a friction stir-welded butt joint of Al-Si-Mg alloys, Mater. Chem. Physics 81 (2003) 289-295.
- [11] M. Cabibbo, H.J. McQueen, E. Evangelista, S. Spigarelli, M. Di Paola, A. Falchero, Microstructure and mechanical property studies of AA6056 friction stir welded plate, Mater. Sci. Eng. A460-461 (2007) 86-94.
- [12] H. J. McQueen, M. Cabibbo, E. Evangelista, Piercing/extrusion and FSW nugget microstructure formation in Al alloys, Mater. Sci. Techn. 23 (2007) 803-809.

## Abstract

### Microstructural aspects of a friction stir welded joint of magnesium AZ31 and aluminium 6060 alloys

#### Keywords:

Light alloys; Al-Mg; Friction Stir Welding; dissimilar metal welding; microstructure characterization; FEG-SEM.

This work presents a microstructure characterization of dissimilar FSW of AA6061 and AZ31B. Metallographic inspections were carried out either by optical microscopy (OM), and by scanning electron microscopy (FEG-SEM) techniques. OM was performed to obtaining the FSW panoramic survey and to determining the mean grain size in the nugget zone. To determining the chemical nature of the detected secondary phase particles within both AA6061 and AZ31B, in the nugget zone, FEG-SEM was coupled with energy-dispersive spectrum analysis. Microhardness measurements were carried out along the welded joint in the advancing, retreating, and centreline sides. Nugget was characterized by diffuse dynamic recrystallization phenomena, inducing a refined equiaxed grained structure. The fine grains in the nugget zone were formed by the rotating pin by the combined effect of shear deformation and high-temperature exposure followed by slow cooling to room temperature after the pin passage into the nugget. Microhardness values were observed to be lower in the nugget, although fine grains characterized the microstructure. The FEG-SEM inspections, and the microanalyses data, clearly revealed a diffuse presence of secondary phase fine particles in the nugget zone, either within the AA6061, and within the AZ31B deformed grains. These were induced to form and precipitate during the passage of the pin (that is during the high-temperature excursion and the shear plastic deformation, followed by a slow room temperature cooling).