

Giunzioni di Al-CMM mediante Friction Stir Welding: influenza sulla distribuzione e sulle dimensioni delle particelle della fase dispersa

L. Marzoli, A. V. Strombeck, J. Dos Santos, C. Gambaro, M. Volpone, E. Rizzuto

In questa memoria si descrivono i risultati delle analisi svolte su giunti realizzati con la tecnologia friction stir welding (FSW), su lamiere di materiale composito a matrice metallica (lega di alluminio 6061) rinforzato con il 20% in volume di particelle di allumina (Al_2O_3).

Nell'introduzione vengono descritti i principi su cui si basa la innovativa tecnica FSW, che permette di realizzare saldature allo stato solido e senza il ricorso a materiali d'apporto. Inoltre vengono evidenziate le principali problematiche che si incontrano quando si giuntano compositi a matrice metallica adottando le tradizionali tecniche di saldatura per fusione. Durante la sperimentazione descritta nel presente articolo, sono state saldate di testa, mediante tecnica FSW, lamiere estruse di spessore pari a 7 mm; la microstruttura dei giunti è stata esaminata al microscopio ottico e le immagini sono state analizzate mediante un apposito programma. Le analisi hanno evidenziato una alterazione della distribuzione delle particelle, rispetto a quanto rilevabile nel materiale base, nonché una leggera frammentazione ed un arrotondamento delle particelle stesse.

Le prove di microdurezza hanno evidenziato una diminuzione dei valori nella zona saldata, coerentemente con l'andamento tipico della durezza nei giunti saldati con FSW.

I risultati ottenuti permettono di affermare che la FSW è senza dubbio un metodo utilizzabile per saldare compositi a matrice metallica ed aprono la strada a più approfondite analisi.

Parole chiave: materiali compositi, saldatura, caratterizzazione materiali

INTRODUZIONE

La friction stir welding è una delle più interessanti tecniche di saldatura che siano state inventate e sviluppate nell'ultimo decennio.

Inventata e brevettata dal The Welding Institute (TWI), deriva dalla tradizionale saldatura per attrito e sfrutta i vantaggi della saldatura allo stato solido anche nella fabbricazione di giunti di testa e a sovrapposizione di notevoli lunghezze (fino a 14 m); si possono realizzare giunti di geometrie anche complesse, con distorsioni post-saldatura molto ridotte.

Una saldatura FSW (fig. 1) si effettua utilizzando un utensile che presenta una spalla ed una punta leggermente più corta dello spessore dei pezzi da unire. L'utensile viene posto tra le due superficie da saldare; la spalla dell'utensile deve essere a contatto con la superficie superiore dei pezzi e l'utensile viene mosso lungo la linea di giunzione. La rotazione

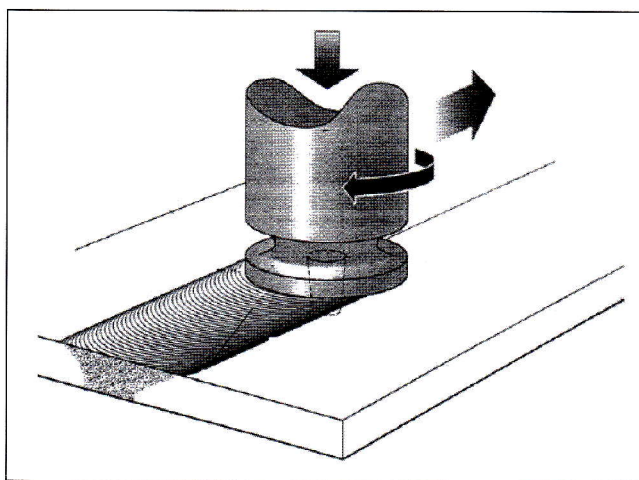


Fig. 1 Schema della Friction Stir Welding

Fig. 1 Scheme of Friction Stir Welding

dell'utensile provoca l'attrito che scalda il metallo e lo plasticizza. Mentre la punta dell'utensile si muove nella direzione di saldatura, la sua faccia anteriore, grazie ad uno speciale profilo, spinge il materiale plasticizzato verso il retro dell'utensile.

A causa delle elevate forze applicate durante il processo, i pezzi da saldare devono essere fissati ad una piastra di appoggio e serrati in modo tale da evitare che si possano sepa-

L. Marzoli, A. V. Strombeck, J. Dos Santos
GKSS Forschungszentrum, Geesthacht, Germania

C. Gambaro
Dipartimento di Ingegneria della Produzione, Università di Genova

M. Volpone
Fincantieri Cantieri Navali Italiani S.p.A., Genova

E. Rizzuto
Dipartimento di Ingegneria Navale e Tecnologie Marine, Università di Genova

Memoria presentata al 29° Convegno Nazionale AIM, Modena, 13-15 novembre 2002

rare durante l'operazione.

L'attrito prodotto dalla rotazione dell'utensile, oltre a plasticizzare il materiale, rompe gli ossidi superficiali e mescola e ricombina il materiale nella scia dell'utensile. In tal modo, gli ossidi presenti sulle superfici non rappresentano più un problema, contrariamente a quanto accade con le tecniche di saldatura tradizionali. L'azione di polverizzazione, rimescolamento e ricombinazione del materiale produce nella saldatura una struttura dai grani assai più piccoli di quelli presenti nel materiale di base. Per questo motivo, di solito, le caratteristiche meccaniche del materiale del giunto sono migliori di quelle della zona termicamente alterata (ZTA).

Per giudicare i risultati ottenibili con la FSW, sono state inizialmente eseguite saldature di leghe di alluminio non rinforzate ma ritenute "difficili" da saldare. Visti gli eccellenti risultati ottenuti, si è passati alla saldatura di altri materiali: i CMM.

I compositi a matrice metallica (CMM) sono materiali molto promettenti, dal punto di vista delle applicazioni strutturali; infatti, essi uniscono alle proprietà della matrice (leggerezza, buona conducibilità termica, duttilità) quelle del rinforzo, di solito ceramico (elevata rigidità, elevata resistenza ad usura, basso coefficiente di dilatazione termica).

Questi materiali rivestono particolare interesse nel settore automobilistico, in componenti quali bielle, pistoni, valvole, dischi dei freni, ecc., nel campo dell'elettronica e delle telecomunicazioni e nel settore del tempo libero (articoli sportivi) [1].

La maggior parte degli studi sui compositi è incentrata su quelli a base di alluminio, e questo in virtù della sua leggerezza, duttilità, bassa temperatura di fusione e possibilità di indurimento per trattamento termico.

Tipici materiali di rinforzo sono carburo di silicio e allumina (Al_2O_3). Il rinforzo discontinuo, che è la tipologia più comune e più economica, in quanto di più semplice fabbricazione, ha un effetto positivo su proprietà quali durezza, resistenza all'usura, stabilità dimensionale. I materiali così rinforzati mostrano inoltre un significativo aumento della rigidità, e per contro una ridotta duttilità ed una bassa tenacità alla frattura.

Uno dei maggiori vantaggi dei compositi a rinforzo discontinuo è la possibilità (soprattutto nel caso di leghe di alluminio rinforzate) di lavorarli con le normali tecniche di laminazione, forgiatura ed estrusione, oppure mediante lavorazioni meccaniche per asportazione di truciolo; tuttavia, l'aggiunta della seconda fase dura comporta una veloce usura dell'utensile ed è quindi necessario ricorrere all'uso di utensili diamantati.

Sfortunatamente, saldare gli Al-CMM rappresenta a tutt'oggi un compito non facile. Infatti, oltre a presentare tutti i problemi delle leghe base, come la presenza di un ossido molto compatto, un'elevata conduttività termica, la tendenza alla formazione di cricche a caldo ed un'alta solubilità dall'idrogeno ad alte temperature, gli Al-CMM presentano problemi specifici. Infatti è ovvio che l'aggiunta del rinforzo alla matrice ne cambi le proprietà chimiche e fisiche, influenzando la saldabilità dei compositi. Non bisogna poi dimenticare che i rinforzi hanno densità minore di quella della matrice e fondono a temperature più elevate rispetto ad essa. Questo fa sì che le particelle galleggino sul bagno di fusione, impoverendo la matrice e formando agglomerati non certo benefici per il giunto.

La FSW, dimostratasi ottimale nel caso delle "normali" leghe di alluminio, ha dunque potenzialmente le carte in regola per dimostrarsi un ottimo processo anche per i CMM. A tutt'oggi non vi sono stati, però, molti studi sulla FSW applicata ai compositi [2] e, ancora più rari sono gli studi della microstruttura delle giunzioni su composito. Saldature per fusione effettuate con la tecnologia laser hanno evidenziato la migrazione del rinforzo verso la zona termicamente alterata, con conseguente impoverimento del centro della saldatura [3, 4] e presenza di porosità all'interno della stessa [5].

MATERIALE E PROCEDURA SPERIMENTALE

Materiale

Il composito oggetto del presente studio, è una lega di alluminio 6061, rinforzata con il 20% in volume di particelle di allumina (Al_2O_3). Il materiale è stato prodotto per fusione, con il metodo del Compocasting, quindi estruso e sottoposto a trattamento di tempra T6. Questo trattamento termico prevede una solubilizzazione, una tempra ed un invecchiamento artificiale. Le tabelle 1, 2 e 3 riportano rispettivamente la composizione chimica del materiale, il trattamento termico effettuato e le caratteristiche meccaniche dichiarate dal produttore.

Il materiale è stato fornito in forma di barre di dimensioni 1000x100x7 mm.

6061+20% Al_2O_3	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr
	0.65	0.15	0.18	0.10	0.97	0.009	0.02	0.19

Tab. 1 Composizione chimica del materiale

Tab. 1 Chemical composition of the material

6061+20% Al_2O_3	Solubilizzazione	Tempra	Invecchiamento
	a 560 °C per 2h	H_2O a 25 °C	a 177 °C per 10h

Tab. 2 Ciclo di trattamento

Tab. 2 Heat treatment

6061+20% Al_2O_3	UTS [N/mm ²]	Rp [N/mm ²]	A [%]
	385	370	4

Tab. 3 Principali proprietà meccaniche nominali

Tab. 3 Mechanical characteristics (nominal)

Procedura sperimentale

Le saldature sono state realizzate nei laboratori del GKSS Forschungszentrum, nell'ambito di un comune progetto di ricerca tra il GKSS stesso, i Dipartimenti di Ingegneria della Produzione ed Ingegneria Navale dell'Università di Genova e la società Fincantieri di Genova.

Le saldature sono state effettuate utilizzando sempre lo stesso tipo di utensile, ma variando la velocità di avanzamento dell'utensile e la pressione esercitata dallo stesso sul materiale.

Il diametro della spalla dell'utensile è di 20 mm, mentre quello del pin alla base è di 8 mm e decresce costantemente. Il materiale utilizzato per realizzare l'utensile ha durezza tale da garantire la necessaria resistenza all'usura, dovuta alle particelle di allumina.

Le saldature sono state realizzate con un robot a cinque assi, a controllo numerico, modello Triceps 805 prodotto dalla NEO, che, essendo dotato di una elevata rigidità ed essendo in grado di applicare forze notevoli, permette di saldare anche leghe ad alta resistenza e spessori fino a 10 mm.

Dal momento che la disponibilità di materiale era limitata, alcune barre sono state tagliate in pezzi di dimensioni 75x100 mm, nella direzione di estrusione; i cordoni saldati hanno dunque lunghezza di 50 mm.

Dai cordoni sono stati estratti campioni per l'analisi microstrutturale e per prove di microdurezza.

Alcune delle micrografie ottenute sono poi state analizzate con il programma ImageC. La stessa procedura è stata seguita per il materiale base, al fine di poter fare un confronto. Misure di microdurezza Vickers sono state eseguite lungo una sezione trasversale del giunto, a tre diverse profondità

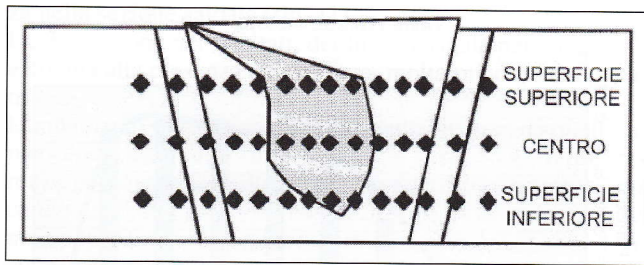


Fig. 2 Schema della microdurezza

Fig. 2 Scheme of microhardness

(superficie superiore, metà spessore e superficie inferiore), come riportato in figura 2. In tal modo si è determinato il profilo della microdurezza e le sue variazioni nella sezione.

RISULTATI E DISCUSSIONE

A differenza delle saldature per fusione, i giunti realizzati tramite FSW hanno un aspetto “pulito” e sono soprattutto esenti da incisioni marginali.

La superficie della saldatura appare come lavorata, per via della rotazione della spalla dell’utensile. La vista dall’alto di un cordone è riportata in figura 3.

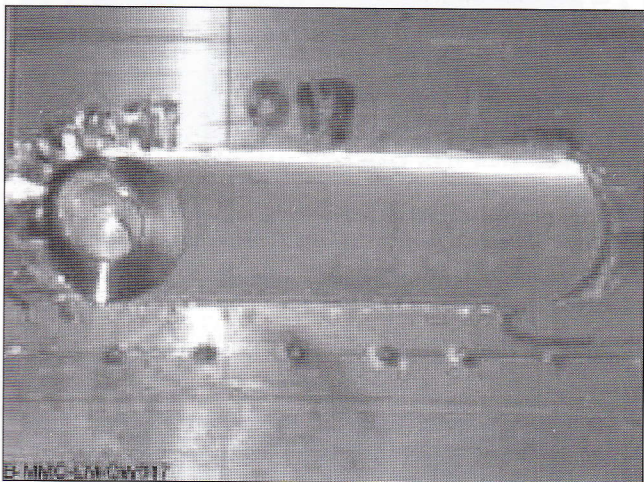


Fig. 3 Vista dall’alto di un giunto FSW

Fig. 3 View of a FSW joint

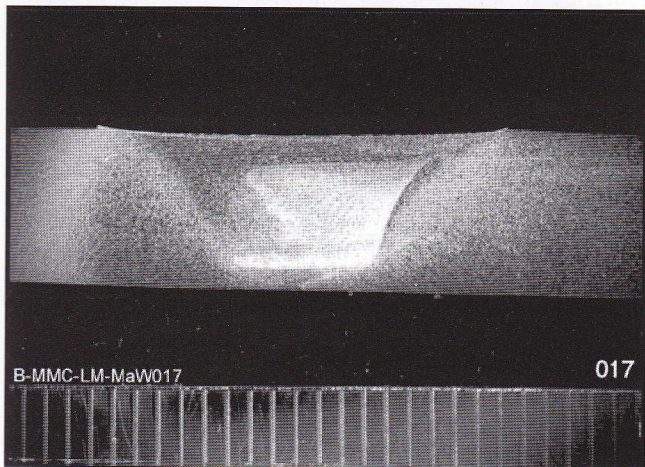


Fig. 4 Macrografia della saldatura FSW di Al-CMM, senza attacco chimico

Fig. 4 Macrograph of a FSW joint, without etching

Anche se sono stati realizzati cordoni di saldatura piuttosto corti, la rilevazione delle temperature sviluppate durante la saldatura, effettuata mediante l’uso di termocoppie, permette di affermare che durante il processo è stata raggiunta la stabilità termica [6]. Questo è anche confermato dal fatto che tutte le saldature prodotte sono risultate prive di difetti.

Analisi macrostrutturale

La saldatura presenta la macrostruttura tipica dei giunti FSW. Infatti si può notare la presenza, anche se solo parziale, della struttura ad “anelli di cipolla” (fig. 4).

La particolare struttura del 6061 rinforzato con allumina permette di osservare questa caratteristica senza effettuare attacco chimico.

Analisi microstrutturale

E’ stata effettuata l’analisi microstrutturale sia del giunto sia del materiale base; sono state rilevate sostanziali differenze per quanto riguarda la distribuzione e le dimensioni delle particelle di rinforzo.

Per quanto riguarda il materiale base, dall’analisi effettuata nella direzione perpendicolare a quella di estrusione (fig. 5), si può notare una distribuzione casuale delle particelle anche se, in alcune zone, si notano degli addensamenti; la forma dei rinforzi è in generale spigolosa.

I due fattori, spigolosità ed addensamento dei rinforzi, sono

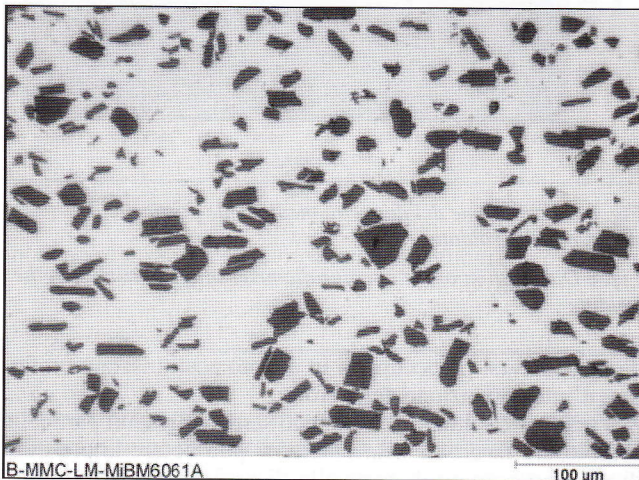


Fig. 5 Micrografia del composito (200X), senza attacco chimico

Fig. 5 Optical micrograph of the composite (200X), without etching

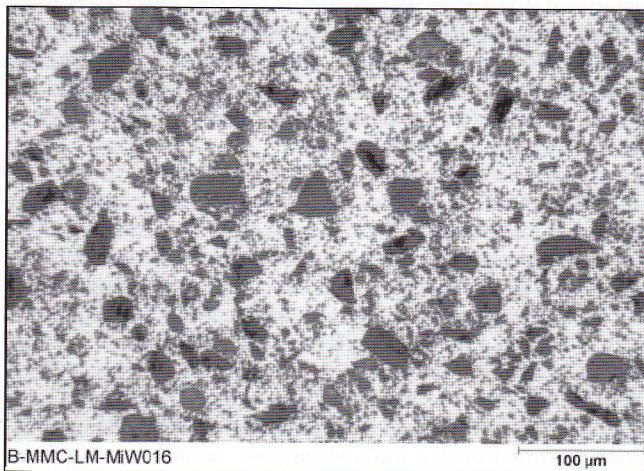


Fig. 6 Micrografia del centro (nugget) della saldatura FSW (200X), senza attacco chimico.

Fig. 6 Optical micrograph of the nugget (200X), without etching

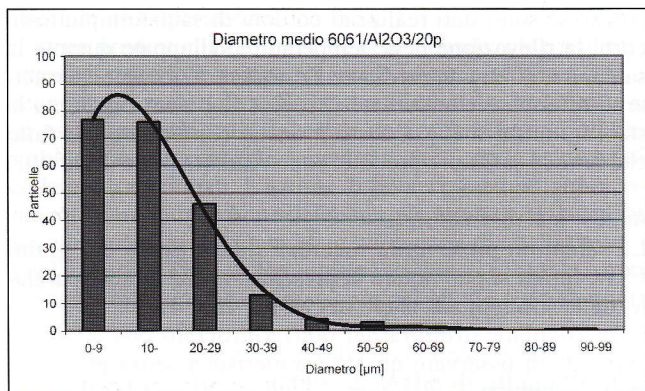


Fig. 7 Distribuzione del diametro medio delle particelle di rinforzo, nel materiale base

Fig. 7 Distribution of the average diameter of the particles, in the parent material

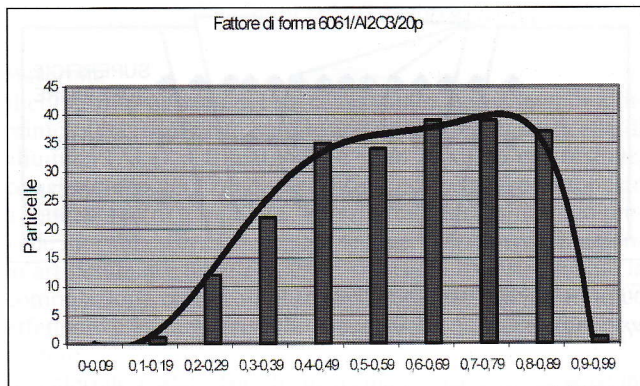


Fig. 9 Fattore di forma delle particelle di rinforzo nel materiale base (1 cerchio perfetto, 0 forma completamente irregolare)

Fig. 9 Particles' form factor in the parent material (1 perfect circle, 0 segment)

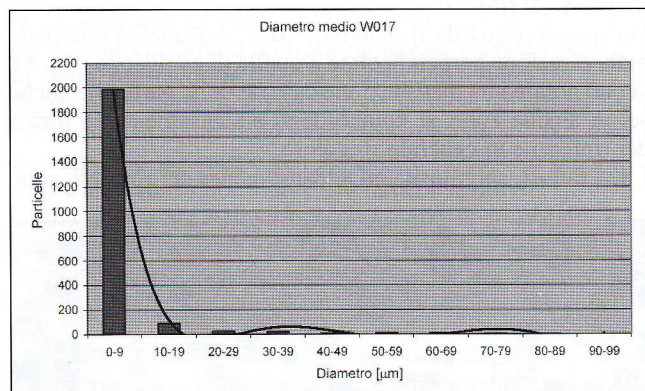


Fig. 8 Distribuzione del diametro medio delle particelle di rinforzo, nella saldatura

Fig. 8 Distribution of the average diameter of the particles, in the welding

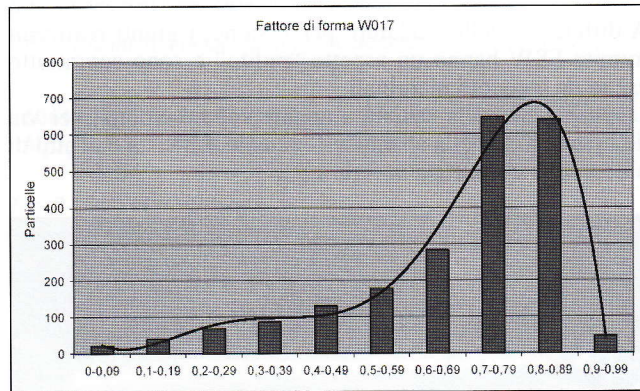


Fig. 10 Fattore di forma delle particelle di rinforzo nella saldatura (1 cerchio perfetto, 0 forma completamente irregolare)

Fig. 10 Particles' form factor in the welding (1 perfect circle, 0 segment)

da considerarsi preoccupanti in quanto costituiscono un fattore d'intensificazione degli sforzi.

Nel materiale saldato, pur essendo sempre presenti particelle spigolose e di grosse dimensioni, si può notare la presenza di un gran numero di particelle di piccole dimensioni e di forma arrotondata (fig. 6). L'aspetto del materiale concorda con quanto riportato in bibliografia [3, 4].

Questa differenza nella microstruttura del giunto rispetto al materiale base è dovuta probabilmente al rimescolamento causato dall'utensile. È verosimile, infatti, che la rotazione dell'utensile provochi l'abrasione della superficie delle particelle di allumina, causando il distacco di piccoli frammenti che poi rimangono all'interno del "nugget". Il fatto che anche le particelle grosse appaiano arrotondate confermerebbe questa ipotesi.

Le micrografie sono state poi analizzate tramite un software di analisi d'immagine, ImageC, per verificare che la forma delle particelle fosse effettivamente più arrotondata, dopo saldatura, e che il diametro medio delle stesse subisse una riduzione. È stata quindi analizzata, sia nel materiale base sia nel cordone di saldatura, la distribuzione del diametro medio delle particelle di rinforzo ed il fattore di forma; i risultati sono stati riportati in istogrammi di frequenza (figg. 7, 8, 9, 10).

Dall'esame delle figure risulta confermato quanto evidenziato durante l'analisi microstrutturale: nel cordone di saldatura, le particelle hanno forma più regolare (la distribuzione del fattore di forma è spostata verso destra, rispetto a quella relativa al materiale base). Anche per quanto riguarda il diametro medio, la distribuzione risulta spostata rispetto a quel-

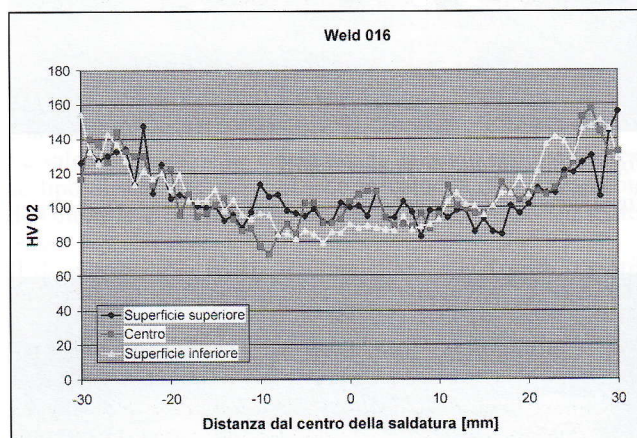


Fig. 11 Andamento della microdurezza Vickers

Fig. 11 Microhardness profiles

la relativa al materiale base, in questo caso verso sinistra e cioè verso diametri più piccoli.

Queste variazioni della microstruttura nella zona saldata rispetto al materiale base potrebbero avere influenza positiva per quanto riguarda la duttilità del giunto, in quanto dovrebbero diminuire il fattore di intensificazione degli sforzi.

Microdurezza

Le prove di microdurezza, eseguite dopo circa una settimana dalla realizzazione della saldatura, rivelano un calo di durezza

za nella sezione saldata (fig. 11).

La dispersione nei risultati, del tutto normale nei compositi, è dovuta alla presenza del rinforzo, molto più duro della matrice.

L'andamento della microdurezza risulta diverso da quello tipico delle leghe non rinforzate della serie 6000: tali differenze possono essere dovute alla presenza del rinforzo, che cambia la dinamica di ricristallizzazione e rinvenimento del materiale. Tuttavia si può notare il tipico andamento a W, anche se meno evidente di quanto rilevabile su giunti in alluminio non rinforzato.

I valori di durezza sembrano confermare la supposizione di duttilità del giunto.

CONCLUSIONI

L'analisi microstrutturale delle saldature eseguite su di un composito 6061/Al₂O₃/20p ha permesso di giungere alle seguenti conclusioni:

- l'azione dell'utensile provoca la rottura delle particelle di rinforzo;
- al centro della saldatura è presente un gran numero di particelle di forma arrotondata e di piccolo diametro;

- le particelle più grosse risultano comunque di forma arrotondata;
- la microdurezza diminuisce all'interno del giunto saldato. Tutto ciò fa presumere una buona duttilità ed una elevata tenacità del materiale in corrispondenza del cordone di saldatura. Sicuramente la tecnologia Friction Stir Welding permette di ottenere giunti senza i tipici difetti delle tradizionali saldature per fusione ed ha un'influenza benefica sulla distribuzione delle particelle di rinforzo.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- 1) ISRIM, Ricerca applicata, Internet ,www.ISRIM.it
- 2) R.A. Prado, L.E. Murr, D.J. Shindo, K.F. Soto, Scripta Materialia 45, 2001, p. 75.
- 3) S.C. Baxter, A.P. Reynolds, Proc. Ann. TMS Meet., New Orleans, USA, 2001, p.284.
- 4) M. Dabalà, M. Magrini, Sci.and Eng. of Comp. Mat., v. 9, n. 3, 2000, p. 123.
- 5) G.J. Grant, D.R. Herling, R.W Davies, Proc. 2001 TMS Fall Meet., USA, p. 177.
- 6) L.M. Marzoli, A. V. Strombeck, J. d. Santos, GKSS Int. Rep., 2002.

A B S T R A C T

AL-CMM FRICTION STIR WELDED JOINTS: INFLUENCE ON THE DISTRIBUTION AND PARTICLE SIZE OF THE DISPERSED PHASE

KEYWORDS:

metal matrix composites, welding, materials characterization

In this paper, the results of analysis performed on friction stir welded joints of aluminium metal matrix composites (Al-MMCs) are described.

Friction Stir Welding (FSW) is a new welding technique, invented, patented and developed by TWI in 1991, aimed to weld in particular light alloys, as aluminium and magnesium. FSW is a derivative of conventional friction welding and it enables the advantages of solid phase welding to be applied to the fabrication of long butt and lap joints (up to 14m), with very little, if any, post weld distortions.

A friction stir weld is formed by inserting a non consumable rotating shouldered pin tool, made of a harder material than the alloy being welded, and whose pin length is slightly less than the weld depth required, into the faying faces until the tool shoulder is in intimate contact with the work surface and then moving the work against the pin or vice-versa. The rotation of the pin within the pieces friction heats the metal and produces a plasticised tubular shaft of metal around the pin. As the pin is moved in the direction of welding, the leading face of the pin, helped by a special pin profile, forces the plasticised material to the back of the pin while applying

a considerable forging force to consolidate the welded metal. Because of the not negligible force applied during the process, to form a friction stir weld, the butt, or lap, joint parts are placed on a backing plate and clamped in a manner that prevents the abutting joint faces from being forced apart. One of the drawbacks of the process being the fact that, if the work pieces are not in close contact, the weld can't be made. The tool's advancement friction heats the abutting joint faces just ahead of the tool to a soft plastic state. It subsequently crushes the joint line, breaking up the oxide film, and stirs and recombines the crushed material on the trailing side of the tool where the material cools to form a solid phase weld. This is extremely important: in fact, this means that the oxide on the welding surfaces are not a problem, since they are broken into small pieces by the tool, which means that there is no need for a preparation of the surfaces prior to welding. The tool's crushing, stirring and forging produces a weld metal with a finer structure than the base material. This usually enables the weld metal strength, in the as welded conditions, to be higher than that in the HAZ; often also the fracture toughness is higher in the weld zone than in the base material. Fatigue properties are also far better then in the welds obtained with traditional fusion welding techniques.

The material analysed, which was in form of extruded plates 1000x100x7 mm, was an AA6061, reinforced with 20% of alumina (Al₂O₃) in T6 condition.

The project is a collaboration between GKSS Forschung-

szentrum, the Production and Naval Departments of the Engineering Faculty of the University of Genova, and Fincantieri Genova.

The material has been welded in GKSS research centre, using a Neo Triceps 805, a CN 5 axis robot.

All welds were produced using the same tool, but varying welding speed and downwards force.

The shoulder's diameter was 20mm, the pin's 8. The tool was made of an ultra-hard material, able to withstand the strong abrasion of the alumina particles.

Since the material was not much, the plates were cut in pieces of 75x100x7 mm: the joints are, therefore, 50 mm long.

From the joints, samples for microstructural analysis and microhardness were extracted.

Some of the micrographs were then analysed with the program ImageC. The same procedure was followed also for the base material, to allow a comparison.

Mechanical properties of the welds were evaluated by microhardness profiles (HV 0.2) across the welded joint.

Even though the welds were rather short, the thermal cycle registered through thermocouples shows that thermal stability has been reached during welding.

The macrograph showed that the typical FSW structure "onion rings" can be seen, even if only partially, in the welds.

Microstructural analysis has turned out to be more interesting. In fact, comparing the micrographs of the base material with the nugget, the difference between the two is rather

impressive. In the nugget the presence of a huge number of very small, roundish particles, totally absent in the base material can be noted. It can also be noted that the big particles, which are present both in the base material and the nugget, appear to be more rounded. This phenomenon can be explained with the stirring of the tool. It is highly probable that the tool's rotation abrades the surface of the alumina particles, causing the detachment of the pointed edges of the particles, thus creating the small particles and rounding up the bigger ones.

Micrographs were then analysed with an image analyser software, ImageC, to verify the hypothesis of the rounding of the particles and to determine the average diameter of the particles. The results were then plotted according to the frequency. The graphs confirms the observation: the particles in the nugget are more numerous and rounder. Smaller and rounder particles should have a positive effect on the joint ductility, since they should diminish the stress intensification factor.

Microhardness measurement, showed, as expected, a scatter in the results.

The loss of hardness in the weld zone is slightly different than expected. The 6xxx series have, in fact, a typical "W" diagram, while in this case, the "W" is not so evident. It is possible that the recrystallisation dynamics is changed by the presence of the reinforcement.

The hardness trend, with the loss in the weld, reinforces the hypothesis of a ductility increment in the joint.