

Saldatura TIG di compositi Al 7005/Al₂O₃

M. Vedani, A. Moriggi

Nel presente articolo vengono descritti i risultati delle indagini svolte su saldature TIG di compositi a matrice in lega di alluminio 7005 rinforzati con il 10% in volume di particelle di allumina. Sono stati realizzati giunti aventi diverse configurazioni geometriche abbinando piastre di spessore 6 mm con tubi di diametro 33 mm e spessore 1,5 mm, entrambi in materiale composito. Le diverse saldature si differenziavano inoltre per l'impiego di diversi materiali d'apporto, scelti tra le leghe convenzionalmente impiegate nella saldatura dell'alluminio non rinforzato oppure in materiale composito, con fili d'apporto direttamente ricavati per lavorazione dal metallo base studiato. Le prove sperimentali hanno evidenziato che anche con l'impiego di leghe d'apporto non rinforzate si otteneva la formazione di una struttura composita nel metallo saldato avente una soddisfacente distribuzione delle particelle di rinforzo, esente da difetti di saldatura rilevanti e con buone caratteristiche meccaniche. Nelle saldature realizzate con filo d'apporto in materiale composito si è ottenuta una soddisfacente qualità microstrutturale del giunto ma la presenza di difetti legati ad una inferiore fluidità del metallo allo stato liquido e una migliorabile qualità del filo d'apporto hanno portato a scarse caratteristiche meccaniche.

Parole chiave: alluminio e sue leghe, compositi, saldatura

INTRODUZIONE

La rilevante mole di ricerche sperimentali e teoriche compiute sui materiali compositi a matrice metallica soprattutto in questo ultimo decennio ha portato allo sviluppo e alla completa caratterizzazione di efficienti materiali per impieghi sia strutturali che funzionali. Rispetto alle precedenti fasi pionieristiche sono state migliorate soprattutto le tecniche di fabbricazione dei compositi in modo da garantire una maggiore affidabilità dei prodotti. Parallelamente sono state definite la quantità del rinforzo, la sua forma, le sue dimensioni ottimali in abbinamento alla composizione e all'eventuale trattamento termico della matrice, il tutto in relazione alle proprietà finali desiderate per il materiale composito [1-5].

In diretta successione allo sviluppo di base dei materiali compositi, la ricerca tecnologica tende ora a indirizzarsi verso i processi di trasformazione di questi materiali per garantirne una effettiva ed economicamente conveniente possibilità di utilizzo nelle applicazioni pratiche. Sono così stati pubblicati studi sulla lavorabilità per deformazione plastica, per asportazione di truciolo e sulla saldatura [3,5-8].

La saldatura, e in particolare quella per fusione, costituisce una delle tecnologie di lavorazione di maggiore rilevanza per l'assemblaggio di parti di componenti. Recenti studi hanno dimostrato che i compositi a matrice in lega di alluminio rinforzati con particelle sono potenzialmente saldabili a patto che lo sia la lega che costituisce la matrice [6,7,9-11]. Nonostante una certa carenza di dati sulle caratteristiche generali (soprattutto meccaniche e a corrosione) dei giunti saldati ottenibili, sembra che la maggior parte dei procedimenti di saldatura adatti alle leghe monolitiche sia applicabile anche ai corrispondenti compositi ottenuti con l'aggiunta di particelle ceramiche, seppure con una maggiore cautela e con la necessità di una più accurata messa a punto dei parametri di saldatura. Dal punto di vista del comportamento fondamentale del composito, è possibile stabili-

re che in saldatura, con parametri di processo correttamente regolati, solo la matrice prende parte alla fusione mentre le particelle di rinforzo rimangono allo stato solido. A supporto di questa ipotesi si constata che i difetti di saldatura dei compositi corrispondono sostanzialmente ai tipici difetti riscontrabili anche nelle leghe di alluminio monolitiche seppure amplificati o abbinati ad ulteriori aspetti critici indotti dalla presenza del rinforzo ceramico.

Le principali problematiche peculiari della saldatura dei compositi a matrice in lega di alluminio riguardano il controllo delle possibili reazioni tra matrice e rinforzo con sviluppo di fasi fragili e indesiderate all'interfaccia o nella matrice [12-15]. La presenza di particelle allo stato solido disperse nel metallo liquido provoca un aumento della viscosità che, seppure favorevole in certe situazioni operative di saldatura, riduce la penetrazione del cordone di saldatura e la miscelazione con il metallo base [16,17]. L'omogeneità della dispersione delle particelle, spesso derivante dagli effetti dei processi di deformazione plastica durante il ciclo di fabbricazione del composito, viene fortemente influenzata nel cordone di saldatura dai fenomeni di drenaggio da parte del fronte di solidificazione con conseguente segregazione del rinforzo nelle zone interdendritiche e calo di duttilità nel metallo saldato [18-20]. Infine, anche i gas assorbiti che si sviluppano durante la solidificazione del cordone di saldatura risultano meno facilmente eliminabili dal liquido per la tendenza delle particelle di rinforzo ad aderire alla superficie delle bolle di gas rallentandone la risalita [6].

MATERIALI E PROCEDURE SPERIMENTALI

Il composito oggetto del presente lavoro sperimentale è una lega di alluminio 7005 rinforzata con una frazione in volume del 10% di particelle di allumina. Il materiale era stato prodotto mediante tecniche di miscelazione del rinforzo nella matrice allo stato fuso e in seguito estruso per ottenere piastre di spessore 6 mm e larghezza 125 mm oppure tubi senza saldatura con diametro esterno di 33 mm e spessore 1,5 mm. Preliminarmente ad ogni indagine, i compositi sono stati trattati termicamente allo stato T6 consistente in una tempra di soluzione a 480°C per 1 ora e spegnimento in acqua e in seguito un invecchiamento artificiale a 125°C per 24 ore.

M. Vedani

Politecnico di Milano - Dipartimento di Meccanica, Milano

A. Moriggi

F.lli Moriggi Srl, Cormano (MI)

Memoria presentata al 28° Convegno Nazionale AIM, Milano 8-10 novembre 2000

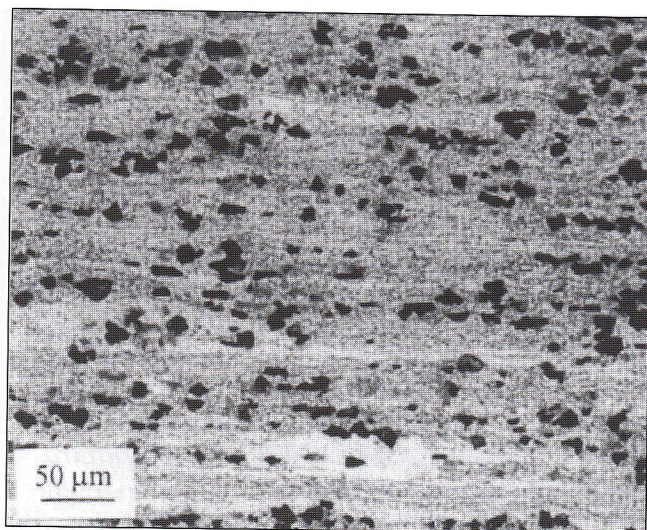


Figura 1. Micrografia ottica del materiale composito base Al 7005/Al₂O₃.

Figure 1. Optical micrograph of the composite base metal Al 7005/Al₂O₃.

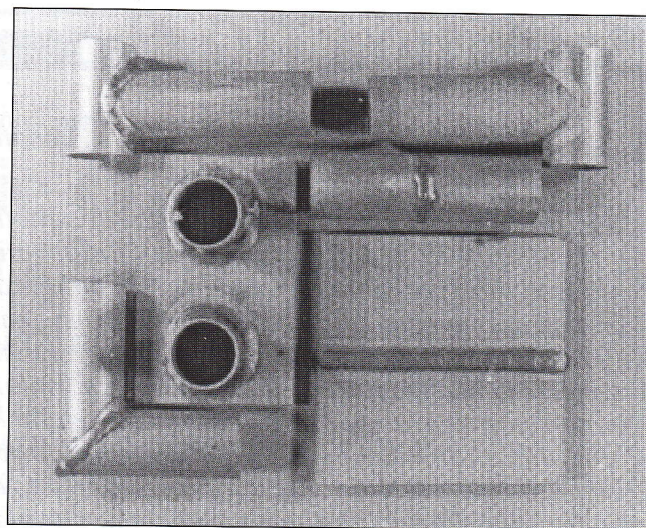


Figura 2. Geometria di alcuni giunti saldati in materiale composito Al 7005/Al₂O₃ eseguiti mediante procedimento TIG.

Figure 2. Geometry of some Al 7005/Al₂O₃ metal matrix composite TIG welded joints.

La lega 7005 della matrice ha un'analisi chimica nominale contenente 4,6 % Zn, 1,4% Mg, 0,5% Mn, 0,1% Cr, 0,1% Zr. Si tratta di una composizione originariamente sviluppata per leghe di alluminio monolitiche facilmente saldabili e destinate a componenti strutturali con discreta resistenza meccanica [21].

La figura 1 riporta una micrografia ottica tipica del composto oggetto delle indagini. Si nota la fine dimensione dei grani della matrice allungati nella direzione di estrusione (orizzontale in figura) e la sostanziale omogeneità della distribuzione delle particelle di rinforzo.

Per le prove di saldatura sono stati prodotti vari giunti: tubo/tubo, tubo/piastra, piastra/piastra, con le diverse configurazioni illustrate in figura 2. In tutti i casi è stato adottato un procedimento di saldatura TIG manuale a corrente alternata con forma d'onda modificata. Prima della saldatura le parti da unire sono state accuratamente decapate per rimuovere l'ossido superficiale e nel caso dei giunti piastra/piastra le parti sono state bloccate alla distanza predefinita su un supporto rigido per limitare le distorsioni. Per il materiale d'apporto sono state considerate diverse possibilità: sono state selezionate leghe Al-5%Si (4043) oppure Al-12%Si (4047) per favorire la fluidità del metallo fuso; è stata utilizzata una lega d'apporto Al-5% Mg (5356) per incrementare la resistenza del giunto; inoltre sono state ricavate delle bacchette di metallo d'apporto direttamente in composito, tranciando longitudinalmente delle strisce di materiale dai tubi per esplorare la possibilità di ottenere una saldatura completamente in materiale composito. In tabella 1 sono riportati i principali parametri di saldatura adottati per le differenti configurazioni di giunto.

Come risulta dalla tabella, nei giunti piastra/piastra sono state considerate due diverse geometrie. In una prima fase sono state eseguite saldature testa-testa in due passate (una sul diritto e la seconda sul rovescio) senza alcuna preparazione delle estremità per promuovere, e quindi meglio valutare, la

diluizione del metallo saldato e per studiare condizioni di saldatura particolarmente critiche: per parti in alluminio, uno spessore di 6 mm è considerato il limite massimo per potere evitare la preparazione dei lembi nei giunti testa-testa [22]. Una seconda serie di saldature piastra/piastra è stata poi eseguita con lembi preparati a V con inclinazione delle facce a 60° in tre passate (due di riempimento sul diritto, molatura ad U del fondo, passata sul rovescio) per migliorare la qualità della saldatura e potere quindi valutare i potenziali valori di resistenza ottenibili dal giunto.

Alcune delle saldature eseguite sono state sottoposte a indagini metallografiche dopo essere state sezionate e preparate con tecniche di metallografia standard (attacco chimico con reagente di Keller quando necessario). Sono state eseguite analisi in microscopia ottica ed elettronica a scansione con l'utilizzo di microanalisi EDS per studiare la distribuzione degli elementi di lega nella saldatura. Sulle sezioni sono inoltre stati eseguiti profili trasversali di microdurezza Vickers per misurare gli effetti dei cicli termici di saldatura e per valutare il possibile indurimento legato a fenomeni di invecchiamento naturale nel tempo. Infine dai giunti piastra/piastra sono stati ricavati provini di trazione trasversalmente alla saldatura con tratto utile di sezione quadra 6x10 mm. Sono state eseguite prove di trazione a temperatura ambiente ed esami frattografici SEM sulle superfici di frattura così prodotte.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Aspetto macroscopico dei giunti

In generale, il controllo della forma del cordone di saldatura e la distribuzione del metallo d'apporto da parte dell'operatore sono risultati piuttosto agevoli ed hanno consentito di eseguire saldature con un aspetto esteriore regolare ed esente da difetti grossolani, come illustrato nelle figure 3 e 4.

Tabella 1. Principali parametri di saldatura adottati per i giunti saldati TIG in materiale composito Al 7005/Al₂O₃.

Table 1. Parameters adopted to produce the TIG welded joints with the Al 7005/Al₂O₃ MMC.

Giunto	Preparazione lembi	Numero passate	Corrente (A)	Tensione (V)	Gas di protezione
piastra/piastra	retti	2	130-140	26-27	Argon
piastra/piastra	a V 60°	3	150-160	26-27	Argon
piastra/tubo	retti	1	100-110	26-27	Argon
tubo/tubo	retti	1	60-70	26-27	Argon

Figura 3. Aspetto macroscopico di alcuni giunti tubo/tubo e tubo/piastra.

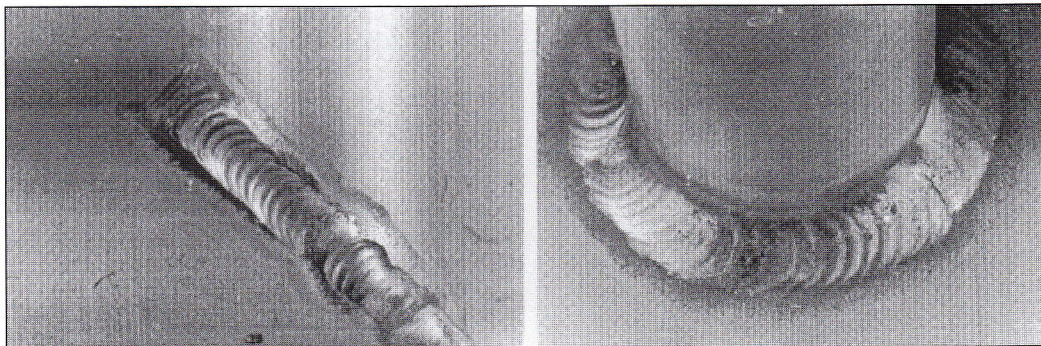


Figure 3. Macroscopic view of the pipe-to-pipe and of the pipe-to-plate welded joints.

Figura 4. Macrografie del cordone di saldatura di giunti piastra/piastra.

- (A) metallo d'apporto Al-5%Si;
- (B) metallo d'apporto Al-5%Mg;
- (C) metallo d'apporto Al 7005/Al₂O₃.

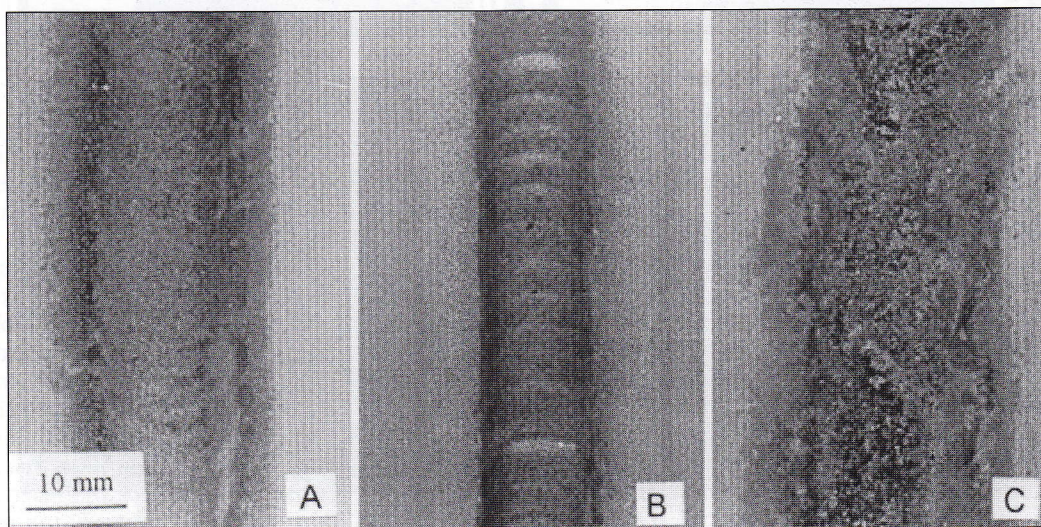


Figure 4. Macroscopic views of plate-to-plate weld beads.

- (A) Al-5%Si filler metal;
- (B) Al-5%Mg filler metal;
- (C) Al 7005/Al₂O₃ filler metal.

Figura 5. Micrografie SEM di sezioni di un giunto piastra/tubo realizzato con materiale d'apporto Al-5%Si (a) e piastra/piastra con cianfrino a V e materiale d'apporto Al-5% Mg (b).

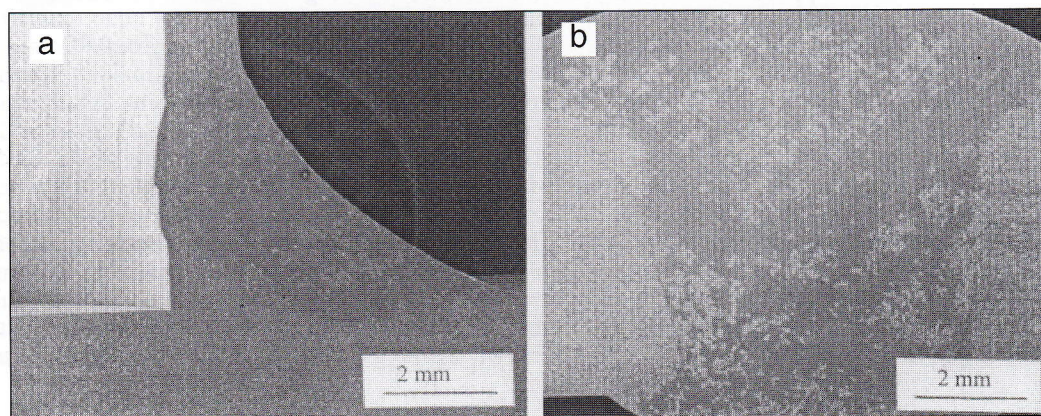


Figure 5. SEM micrographs of a sectioned pipe-to-plate joint welded with Al-5%Si filler metal (a) and of a plate-to-plate joint welded with Al-5%Mg filler metal (b).

In particolare, in figura 4 viene proposto un confronto tra saldature analoghe per geometria ma prodotte con l'impiego di differente metallo d'apporto. Si nota che con l'impiego di leghe di alluminio di tipo convenzionale, quindi non rinforzate con particelle ceramiche, (figg. 4a e 4b) il cordone di saldatura risultante aveva un aspetto omogeneo, del tutto simile a quello riscontrabile nelle comuni leghe di alluminio saldate. Al contrario, con l'utilizzo di filo d'apporto in materiale composito si riscontrava una certa penalizzazione nella fluidità e nella possibilità di controllo della forma del cordone di saldatura (fig. 4c); lo stesso mostrava una forma più allargata e piatta rispetto ai casi precedenti con aspetto superficiale apparentemente poroso e meno promettente.

Microstruttura e composizione dei giunti

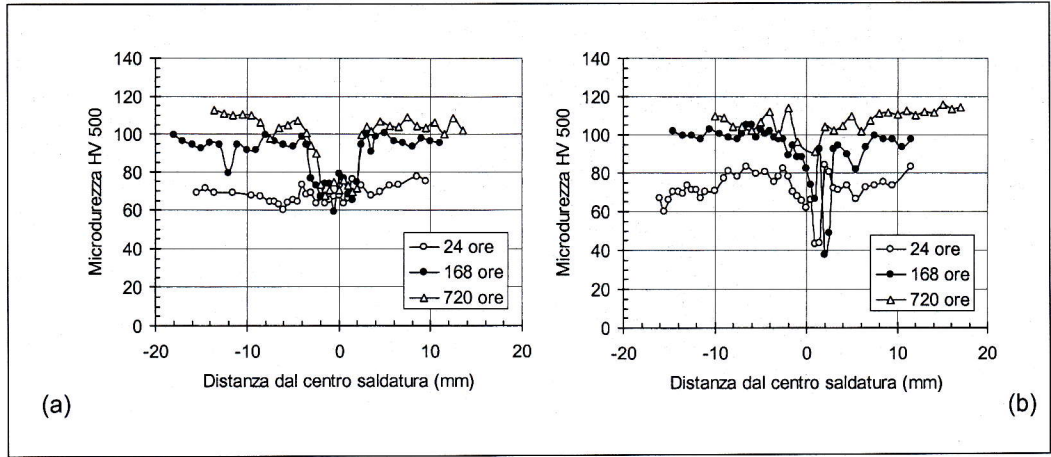
Nella seguente figura 5 sono riportate alcune micrografie a basso ingrandimento della struttura dei giunti realizzati. L'ingrandimento proposto consente di valutare nel complesso la distribuzione del rinforzo ottenibile nel metallo saldato e la eventuale presenza di difetti macroscopici. Dagli esempi

appare evidente che il metallo saldato possiede la struttura di un composito anche utilizzando un metallo d'apporto non rinforzato per gli attesi fenomeni di diluizione con il metallo base. In tutto il volume del cordone di saldatura si notano zone con presenza di particelle che tuttavia non sono distribuite in modo del tutto omogeneo ma raccolte in aggregati discreti. Si suppone che tali zone siano la conseguenza dei complessi flussi convettivi che si instaurano nel metallo saldato allo stato liquido e della differente densità della fase di rinforzo rispetto a quella dell'alluminio liquido. La loro presenza non è stata giudicata particolarmente preoccupante poiché la frazione in volume locale di rinforzo non superava quella del materiale composito base e quindi era tale da garantire comunque, da questo punto di vista, una adeguata combinazione di resistenza a tenacità anche nella saldatura. Negli esempi riportati non sono visibili particolari difetti di saldatura; si segnala tuttavia che in alcuni casi sono state rilevate inclusioni di gas e zone di incompleta fusione nella parte centrale della saldatura.

Nelle saldature eseguite utilizzando materiale d'apporto in

Figura 8. Profili di microdurezza Vickers in funzione del tempo di invecchiamento a temperatura ambiente dopo saldatura. Giunti piastra/piastra realizzati con metallo d'apporto Al-5%Mg (a) e Al7005/Al₂O₃ (b).

Figure 8. Vickers microhardness profiles plotted as a function of natural aging time after welding. Plate-to-plate joints welded with Al-5%Mg filler metal (a) and Al 7005/Al₂O₃ filler metal (b).



ben definita da un punto di vista microstrutturale ma era identificabile nei suoi contorni generali dalla differente distribuzione delle particelle ceramiche tra metallo base e metallo saldato e per le eventuali modificazioni della struttura delle matrici nei casi in cui la lega d'apporto differiva dal composito base, come illustrato in figura 7b. Nella stessa figura si nota anche che nella zona termicamente alterata (visibile in alto a destra nella foto) si rendeva evidente un ingrossamento del grano confinato entro una distanza di poche centinaia di micron. Il controllo della dimensione del grano nei compositi in lega di alluminio, in saldatura e in altri processi a caldo, non rappresenta in genere un aspetto di particolare preoccupazione in quanto la dispersione delle particelle ceramiche stimola la ricristallizzazione della matrice in grani molto fini che risultano in seguito molto resistenti ai processi di ingrossamento [23,24].

In tabella 2 sono riassunti i risultati delle microanalisi eseguite sulle sezioni dei giunti piastra/piastra, in diverse posizioni dello spessore del cordone di saldatura. I dati sono stati ottenuti correggendo numericamente le composizioni restituite dalla microsonda EDS in modo da sottrarre il contributo delle particelle ceramiche di allumina ed ottenere quindi l'effettiva composizione della sola matrice. I valori così ricavati dimostrano in tutti i casi esaminati una discreta e comunque uniforme diluizione tra il metallo base e quello d'apporto. In particolare, i tenori di Zn e Mg comunque presenti nel metallo saldato sono da considerarsi vantaggiosi poiché consentirebbero di ottenere un seppur moderato indurimento a seguito di eventuali trattamenti termici post-saldatura.

Microdurezza

I diagrammi in figura 8 illustrano l'andamento della microdurezza HV500 attraverso i giunti piastra/piastra saldati nel caso dell'impiego di due metalli d'apporto (Al-5%Mg e Al7005/Al₂O₃) e in funzione del tempo di invecchiamento naturale (dopo 24, 168 e 720 ore). Per brevi tempi dopo saldatura (24 ore) sono stati ottenuti dei profili con microdurezza sostanzialmente costante attraverso il giunto saldato per la presenza significativa di particelle ceramiche indurenti nel metallo saldato anche con l'impiego di leghe d'apporto

non rinforzate. Nel caso delle saldature realizzate con metallo d'apporto composito (fig. 8b) si notavano inoltre alcuni cali di durezza a centro saldatura imputabili ad occasionali difetti nel metallo saldato.

Particolarmente interessante è risultata l'evoluzione della durezza in funzione del tempo di invecchiamento a temperatura ambiente. I diagrammi mostrano che subito dopo saldatura, come era lecito attendersi, la zona termicamente alterata del materiale composito perdeva l'indurimento indotto dal trattamento T6 ed assumeva valori di durezza di poco superiori a 60 HV. Per merito della elevata temprabilità tipica della lega della matrice, una parte degli elementi indurenti potevano tuttavia rimanere in soluzione sovrassatura durante il raffreddamento seguente l'operazione di saldatura e in seguito riprecipitare durante l'invecchiamento naturale per consentire al materiale della zona termicamente alterata di raggiungere durezza superiore a 100 HV dopo un tempo di 720 ore, corrispondente a un mese. Quanto detto si applica evidentemente anche al metallo saldato nel caso in cui questo sia ottenuto con l'apporto di composito mentre per le altre leghe d'apporto utilizzate non si sono misurati incrementi significativi di durezza. Per questi casi, nonostante la presenza di elementi potenzialmente in grado di indurire la matrice nel risultante metallo saldato, si presume che la velocità di raffreddamento dopo saldatura non sia stata sufficiente per una efficace solubilizzazione della lega o che la risultante composizione non sia in grado di fornire incrementi di durezza significativi con un invecchiamento a temperatura ambiente.

Resistenza a trazione e indagini frattografiche

Le prove meccaniche eseguite su campioni ricavati trasversalmente alle saldature hanno fornito i valori riassunti in tabella 3. I dati, mediati su quattro prove per condizione, evidenziano in generale un'efficienza piuttosto bassa delle saldature realizzate. Tuttavia deve essere considerato che le leghe d'apporto utilizzate nella presente indagine hanno delle caratteristiche sicuramente inferiori a quelle del composito base e quindi le riduzioni di resistenza per le prime tre tipologie di saldature riportate in tabella sono del tutto plausibili e non imputabili a carenze nella saldatura. I dati ottenuti so-

Tabella 3. Resistenza a trazione del materiale composito base e di alcuni giunti saldati piastra/piastra.

Table 3. Composite base metal strength and cross-weld resistance of some of the investigated plate-to-plate welded joints.

Materiale base e d'apporto	Giunto	Rm (MPa)	RP _{0,2} (MPa)	ε _r (%)
Materiale base Al 7005/Al ₂ O ₃	-	374	313	7,9
Al 7005/Al ₂ O ₃ + Al-5%Si	lombi retti	117	-	0,4
Al 7005/Al ₂ O ₃ + Al-12%Si	lombi retti	217	158	1,4
Al 7005/Al ₂ O ₃ + Al-5%Mg	lombi a V 60°	276	158	5,3
Al 7005/Al ₂ O ₃ + Al 7005/Al ₂ O ₃	lombi retti	68	-	0,4
Al 7005/Al ₂ O ₃ + Al 7005/Al ₂ O ₃	lombi a V 60°	133	121	0,4

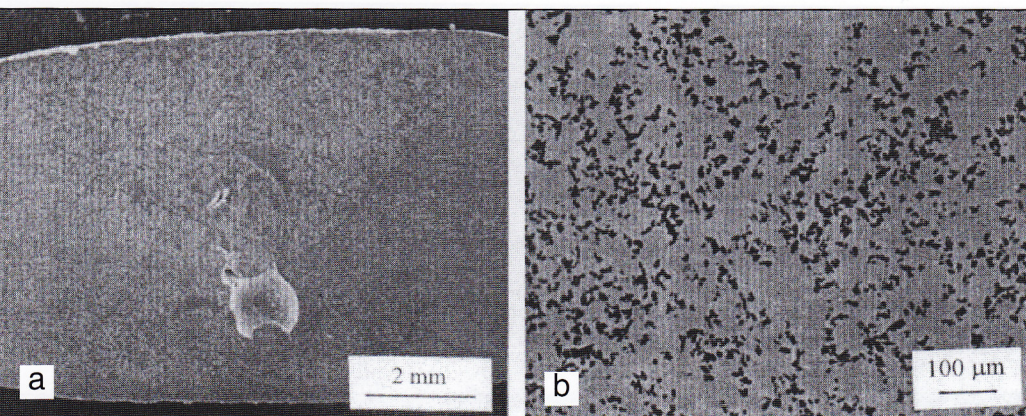


Figura 6. Micrografie SEM di una sezione di giunto piastra/piastra con cianfrino a V in composito Al 7005/Al₂O₃. Vista generale (a) e dettaglio della struttura del metallo saldato (b).

Figure 6. SEM micrograph of a sectioned V gap plate-to-plate Al 7005/Al₂O₃ welded joint. General view (a) and detail of the weld metal microstructure (b).

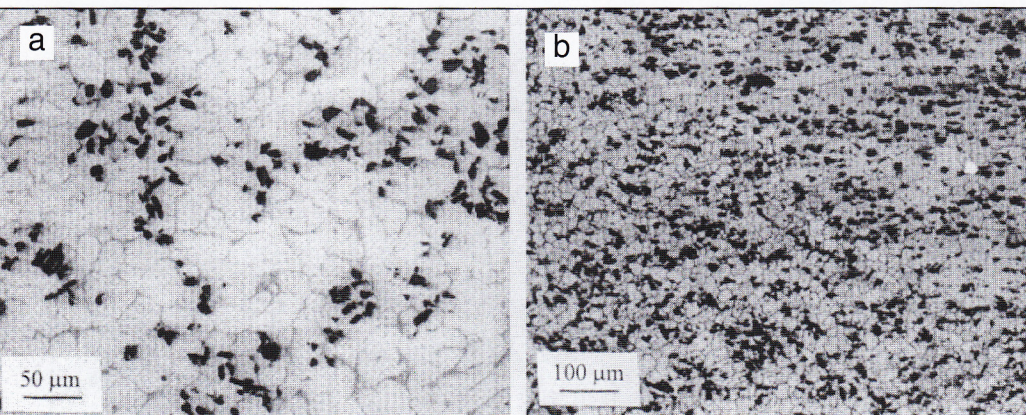


Figura 7. Micrografie ottiche di sezioni di giunto piastra/piastra realizzato con materiale d'apporto Al-5%Si (a) Al-5% Mg (b).

Figure 7. Optical micrographs of sectioned plate-to-plate joints welded with Al-5%Si filler metal (a) and Al-5%Mg filler metal (b).

Materiali base e d'apporto	Posizione	Si	Mg	Zn	Mn
Materiali base Al 7005/Al ₂ O ₃	-	-	1,3	5,4	0,6
Al 7005/Al ₂ O ₃ + Al-5%Si	A	3,8	0,6	2,2	0,3
	B	5,0	0,5	1,8	0,1
	C	4,1	0,6	2,1	0,3
Al 7005/Al ₂ O ₃ + Al-12%Si	A	11,1	0,3	1,6	0,1
	B	11,4	0,4	1,8	0,2
	C	11,4	0,4	1,4	0,1
Al 7005/Al ₂ O ₃ + Al-5%Mg	A	-	3,9	0,8	0,3
	B	-	4,0	0,5	0,3
	C	-	4,0	0,5	0,3
Al 7005/Al ₂ O ₃ + Al 7005/Al ₂ O ₃	A	-	1,1	5,3	0,4
	B	-	1,3	5,4	0,5
	C	-	1,2	5,4	0,6

Tabella 2. Composizione chimica (% in peso) della matrice del cordone di saldatura nei giunti piastra/piastra. Posizione A: centro spessore, B: parte superiore, C: parte inferiore.

Table 2. Chemical composition (in weight %) of the weld bead matrix for the plate-to-plate joints. Position A: weld bead centre, B: lower portion, C: upper portion.

composito Al 7005/Al₂O₃, si è ottenuta una distribuzione del rinforzo ben più omogenea, come illustrato in figura 6. Nonostante l'aspetto esteriore poco soddisfacente delle saldature, a livello microscopico si è potuto constatare la possibilità di un buon controllo della struttura del composito eccetto che per occasionali inclusioni di gas notate al centro dei giunti. Tali difetti sono in parte da mettere in relazione con la maggiore viscosità del metallo liquido all'atto della saldatura; si suppone inoltre che un copioso rilascio di gas possa essere stato causato dall'impiego di filo d'apporto ricavato in laboratorio per tranciatura longitudinale dai tubi e quindi con superfici non particolarmente curate, con forte tendenza ad assorbire umidità e gas che venivano poi liberati in fase di saldatura.

Sia nelle saldature realizzate con apporto di materiale composito che in quelle con leghe di alluminio non rinforzate, si è notato che le particelle ceramiche risultavano disposte in posizioni intragranulari (si veda a titolo di esempio la figura

7a) e quindi non influenzate da fenomeni di segregazione legati ai meccanismi di solidificazione. Osservazioni SEM ad elevati ingrandimenti hanno permesso di escludere la presenza di significative alterazioni all'interfaccia matrice-particelle in accordo con la elevata stabilità termodinamica del sistema Al-Al₂O₃. In base a studi pubblicati in letteratura è noto che l'unica reazione che potrebbe avvenire nel composito studiato è quella di combinazione del magnesio in lega nella matrice con l'alluminio per formare lo spinello MgAl₂O₄ [12,13]. In realtà tale reazione avviene in misura limitata già all'atto della fabbricazione del materiale composito lasciando limitate quantità dei suddetti composti spinodali sulla superficie delle particelle ceramiche; si può quindi ipotizzare che i brevi cicli termici di saldatura a cui viene sottoposto il composito non rappresentino da questo punto di vista un'aggravante ulteriore per la reazione all'interfaccia.

In generale la linea di fusione della saldatura non risultava

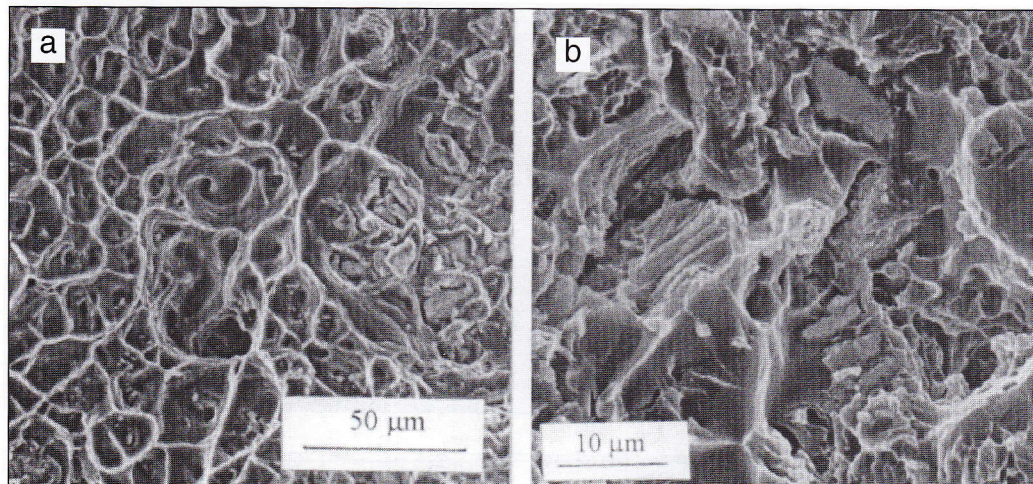


Figura 9. Frattografie di provini di trazione trasversali alla saldatura realizzati con materiale d'apporto Al-5%Mg (a) e Al-12%Si (b).

Figure 9. Fractographs of broken cross-weld tensile specimens welded with Al-5%Mg filler metal (a) and Al-5%Si filler metal (b).

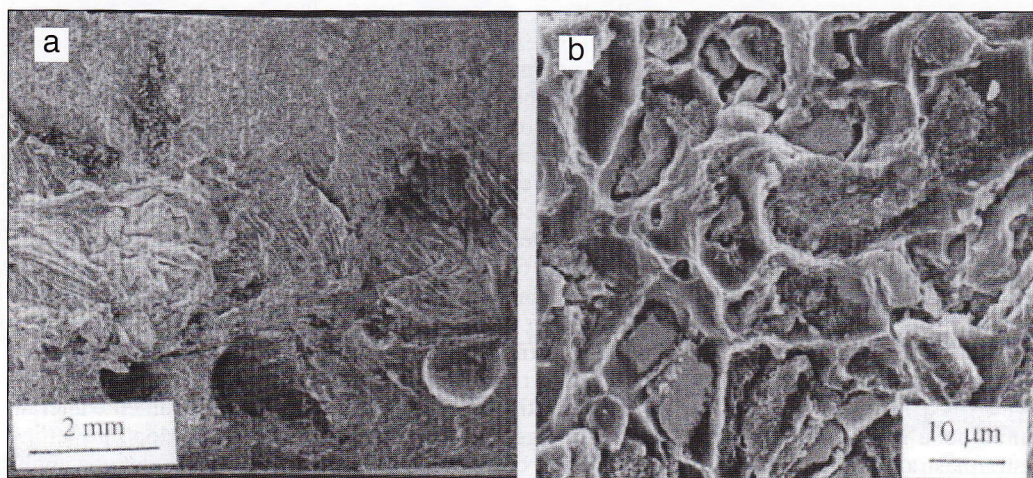


Figura 10. Frattografie di provini di trazione trasversali alla saldatura realizzati con materiale d'apporto composito Al-7005/Al₂O₃. Vista generale (a) cedimento in una zona esente da difetti (b).

Figure 10. Fractographs of broken cross-weld tensile specimens welded with Al-7005/Al₂O₃ composite material. General view (a) detail of the fracture surface in a region free from welding defects (b).

no peraltro comparabili con i valori tipici misurabili su getti allo stato grezzo delle stesse leghe monolitiche. In particolare i giunti Al 7005/Al₂O₃ + Al-5%Mg possiedono delle caratteristiche tensili molto interessanti abbinata a discrete caratteristiche di duttilità. Un commento a parte meritano invece le saldature realizzate con filo d'apporto in materiale composito Al 7005/Al₂O₃ che hanno fatto registrare valori medi di resistenza e di allungamento piuttosto modesti. Era già stata evidenziata per queste saldature la presenza di difetti e una forma macroscopica del cordone meno regolare, indice di una inferiore fluidità e possibilità di controllo del metallo saldato; anche i giunti con cianfrino a V, realizzati per favorire l'operazione di deposito del metallo saldato, non hanno fornito sostanziali miglioramenti.

Le indagini frattografiche hanno confermato i commenti sulla microstruttura delle saldature in relazione alle diverse leghe d'apporto esaminate. Nei giunti prodotti con leghe non rinforzate il cedimento avveniva in corrispondenza del cordone di saldatura secondo meccanismi tipici della frattura duttile dei metalli; si assisteva alla formazione di microvuoti originati dal cedimento delle particelle ceramiche di rinforzo sotto carico oppure dai precipitati caratteristici delle leghe di volta in volta utilizzate (figura 9).

Sulle saldature realizzate con filo d'apporto in materiale composito si sono ritrovati alcuni difetti caratteristici della saldatura dell'alluminio quali inclusioni gassose e pellicole di ossido, come mostrato in figura 10a. Tuttavia nelle zone esenti da tali difetti il cedimento della saldatura avveniva ancora una volta con meccanismo duttile, con caratteristiche analoghe a quelle già commentate (figura 10b).

CONCLUSIONI

Su un composito Al 7005/Al₂O₃ rinforzato con particelle sono state eseguite prove di saldatura con un procedimento TIG manuale. Sono stati realizzati giunti con differenti configurazioni mediante l'impiego di diversi metalli d'apporto. I risultati delle indagini sperimentali hanno consentito di trarre le seguenti conclusioni.

- Il prelievo di particelle ceramiche per diluizione del metallo base porta alla formazione di cordoni di saldatura composti anche con l'impiego di leghe d'apporto non rinforzate. Seppure la distribuzione del rinforzo nel metallo saldato non è del tutto omogenea, gli arricchimenti locali riscontrati non raggiungono livelli tali da destare preoccupazione per possibili cali di duttilità indotti.
- Il materiale composito base ha mostrato una buona tolleranza alla saldatura evidenziando una zona termicamente alterata di limitata estensione e la possibilità di recuperare una buona parte dell'iniziale indurimento durante il processo di invecchiamento naturale post-saldatura.
- L'impiego di filo di metallo d'apporto composito direttamente ottenuto per lavorazione dal materiale base ha portato ad un aumento della viscosità del metallo saldato liquido e a una forma meno regolare del cordone di saldatura. Anche se da un punto di vista fondamentale la struttura risultante era soddisfacente per distribuzione delle particelle e condizione della matrice, sono stati rilevati difetti di saldatura di entità non trascurabile.
- Le prove di trazione eseguite su provini trasversali alla saldatura hanno fornito dati di resistenza confortanti nel caso dei giunti realizzati con l'impiego di leghe d'apporto non rinforzate ed hanno evidenziato la necessità di un

maggiore controllo della qualità del filo di materiale d'apporto e del processo di saldatura per le saldature completamente in materiale composito.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- 1) D.J. Lloyd. *Int. Mater. Rev.*, 39, 1 (1994) 1-23
- 2) I.A. Ibrahim, F.A. Mohamed, E.J. Lavernia. *J. Mater. Sci.*, 26 (1991) 1137-1156
- 3) T.F. Klimiwicz. *J.O.M.*, 46, 11 (1994) 49-53
- 4) B. Muruyama, W.H. Hunt. *J.O.M.* 11 (1999) 59-61
- 5) T.W. Clyne, P.J. Withers. *An Introduction to Metal Matrix Composites*. Cambridge University Press (1995)
- 6) M.B.D. Ellis. *Int. Mater. Rev.*, 41, 2 (1996) 41-56
- 7) M.B.D. Ellis, M.F. Gittos, P.L. Theadgill. *Mater. World*, 8 (1994) 415-417
- 8) H.W. De Vries, G. Den Ouden. *Mater. Sci. Techn.*, 15, 2 (1999) 202-206
- 9) S. Kou. In: "Welding metallurgy and weldability of high strength aluminium alloys", WRC Bulletin 1986
- 10) M. Balbi, M. Vedani. *Atti Conv. Int.: "Welding and Joining Science and Technology"*, ASM, Madrid (1997) pp. 416-424
- 11) Chidambaram, S.D. Bhole. *Scripta Mater.*, 35, 3 (1996) 373-378
- 12) B.C. Pai, G. Ramani, R.H. Pillai, K.G. Satyanarayana. *J. Mater. Sci.*, 30 (1995) 1903-1911
- 13) A.D. McLeod, C.M. Gabriel. *Metall. Trans.*, 23A (1992) 1279-1283
- 14) H. Liu, U. Madaleno, T. Shinoda, Y. Mishima, T. Suzuki. *J. Mater. Sci.*, 25 (1990) 4247-4254
- 15) A.E. Hughes, M.M. Hadgen, B.A. Sexton. *J. Mater. Sci.*, 25 (1990) 4856-4865
- 16) Kolsgaard, S. Brusethang. *Mater. Sci. Techn.*, 10, 5 (1994) 545-551
- 17) F.M. Yarandi, P.K. Rohatgi, S. Rav. In: "Transaction of American Foundrymen Society". 1992, pp. 575-581
- 18) D.M. Stefanescu, A. Moitra, A.S. Kacar, B.K. Dhindaw. *Metall. Trans.*, 21A (1990) 231-239
- 19) R. Sasikumar, M. Kumar. *Acta Metall. Mater.*, 39, 11 (1991) 2503-2508
- 20) Y. Wu, H. Liu, E.J. Lavernia. *Acta Metall. Mater.*, 42, 3 (1994) 825-837
- 21) I.J. Polmear. *Light alloys: metallurgy of light metals*. Arnold Publisher (1995) 3rd edition
- 22) Istituto Italiano della Saldatura. *Saldatura per fusione* (1995) vol. 2
- 23) M. Ferry, P. Munroe, A. Crosky, T. Chandra. *Atti conv. Int.: "12th RISØ Int. Symp. on Materials Science, MMC - Processing, Microstructure and Properties"*, (1991) pp. 337-342
- 24) D. Yu, P.R. Munroe, S. Bandyopadhyay, A.P. Mouritz. *Scripta Metall. Mater.*, 30, 7 (1991) 927-932

A B S T R A C T

TIG WELDING OF Al 7005/Al₂O₃ METAL MATRIX COMPOSITES

The present paper describes the results of welding tests performed on Al 7005/Al₂O₃ alloy composite reinforced with 10 vol.% alumina particles. TIG welds were produced by joining extruded plates having a thickness of 6 mm and tubes having an outside diameter of 33 mm and a wall thickness of 1,5 mm. Different joint configurations were considered, as shown in figure 2 in the paper. The weld investigated, further differed for the selection of the filler metal. Three different filler wire compositions were chosen with the aim of increasing molten metal flow during welding (Al-5%Si / 4043 alloy and Al-12%Si / 4047 alloy) and of improving the resulting joint strength (Al-5%Mg / 5356 alloy). In addition, composite filler wires were prepared by longitudinally cutting thin stripes from the Al 7005/Al₂O₃ composite tubes. Microstructural analyses were carried out by optical and scanning electron microscopy to characterise the weld metal and heat affected zone structures of the joints. Mechanical properties were evaluated by microhardness profile measurements and by room temperature tensile tests on

cross-weld specimens. The results showed that when using unreinforced filler metals, particle pick up from the parent metal generated a weld metal structure of composite type. The particle distribution featured a slight tendency toward clustering but the maximum local volume fraction achieved was always lower than that of the base metal. No particular welding defect was detected and satisfactory mechanical properties were measured also due to the increase in strength brought about by natural aging effect in the HAZ after welding. The welds performed by using composite filler wires featured promising matrix microstructure and a homogeneous particle distribution. The ability to recover the original T6 temper strength owing to post weld aging of both the heat affected zone and the weld metal was also verified. The use of a composite filler metal also introduced welding defects such as entrapped gas and oxide films that partially impaired the mechanical strength achieved by the joints. It was therefore supposed that improved properties could readily be achieved by a better control of the composite filler metal wire quality.