

# Studio di saldabilità (LBW,FSW, EBW) di leghe da pressocolata a base alluminio

G. Luvarà, P. Piccardo, F. Casarotto, L. M. Volpone

*Le leghe da pressocolata sono generalmente difficilmente saldabili con i processi ad arco tradizionali a causa dei cicli termici di saldatura blandi che possono provocare la precipitazione di fasi fragili in ZTA e al tempo stesso la complicata geometria dei pezzi può di fatto rendere inapplicabili certe tecnologie (saldature in interstizi non raggiungibili con torce di saldatura tradizionali). Di qui l'esigenza di uno studio di saldabilità con processi alternativi come quelli ad energia concentrata (fascio laser e fascio elettronico) o il caratteristico processo Friction Stir che permette di saldare facilmente materiali basso fondenti come le leghe di alluminio senza portarle a fusione (fattore che in questo caso può rivelarsi molto positivo). Lo studio in questione ha previsto l'utilizzo delle tre tecnologie di saldatura sopracitate tramite la tecnica conosciuta come "beads on plate" che consiste nella realizzazione di cordoni di saldatura direttamente su materiale base senza unire fisicamente due pezzi ma che di fatto permette ugualmente di stabilire l'applicabilità o meno di un determinato processo. Come materiali per la sperimentazione è stato previsto l'utilizzo di lastre pressofuse da 2 e 4 mm di spessore, di due differenti leghe Al/Si modificate allo Stronzio riconducibili ai gruppi AlSi9Mn ed AlSi9MgMn. La prima caratterizzata dall'assenza di Magnesio, la seconda con tenori dello stesso compresi fra lo 0.1 e lo 0.5% (quindi inquadrabile come lega indurente per precipitazione).*

## Parole chiave:

alluminio e leghe, saldatura, pressocolata

### SCOPO DELLA RICERCA

Questo studio si prefigge l'obiettivo di capire se è possibile ottenere dei giunti privi di difettosità saldando delle particolari leghe da pressocolata con processi innovativi quali Friction Stir, Fascio Elettronico e Fascio Laser.

### MATERIALI OGGETTO DELLO STUDIO

I materiali oggetto di questo studio sono state due leghe per pressocolata commercialmente note con i nomi di Castasil-37® [AlSi9Mn] e Silafont-36® [AlSi9MgMn] prodotte dalla ditta Rheinfelden GmbH (Rheinfelden, Germania). Le cui rispettive composizioni chimiche sono riportate nelle tabelle 1 e 2 di seguito riportate.

La peculiarità di queste leghe è quella di essere leghe modificate allo stronzio che permette alla fine del processo di pressocolata di ottenere un materiale con una struttura dell'eutettico molto fine cosa che garantisce delle proprietà meccaniche superiori rispetto alle omologhe leghe senza stronzio.

Le proprietà meccaniche sono principalmente determinate dal-

lo stato di fornitura e dal contenuto di magnesio della lega. Infatti all'aumentare del contenuto di magnesio (come è stato citato in precedenza) aumenta anche la resistenza meccanica ma diminuisce l'allungamento a rottura. Quindi se si predilige la resistenza si utilizzano tenori di magnesio tra 0,3 e 0,4% mentre se si vuole ottenere un pezzo con allungamenti a rottura fino al 15% il contenuto di magnesio deve essere attorno allo 0,15%. Aumentando ulteriormente il tenore di magnesio al di sopra dello 0,5% non si hanno ulteriori incrementi delle proprietà meccaniche perché quello in eccesso precipita come fase a se stante Mg<sub>2</sub>Si e non contribuisce ad un ulteriore indurimento della fase di alluminio.

Da studi che sono stati effettuati sugli effetti che il magnesio ha nei confronti dell'aumento delle proprietà meccaniche della lega si è visto che la soglia dello 0,060% è quella che divide le leghe che mostrano sensibilità all'invecchiamento da quelle non sensibili all'invecchiamento. Infatti al di sotto dello 0,060% dopo trattamento di invecchiamento si osservano dei modesti incrementi di resistenza mentre al di sopra di questo valore

G. Luvarà  
(Università di Genova)

P. Piccardo  
(Università di Genova)

F. Casarotto  
(Rheinfelden GmbH,  
Rheinfelden)

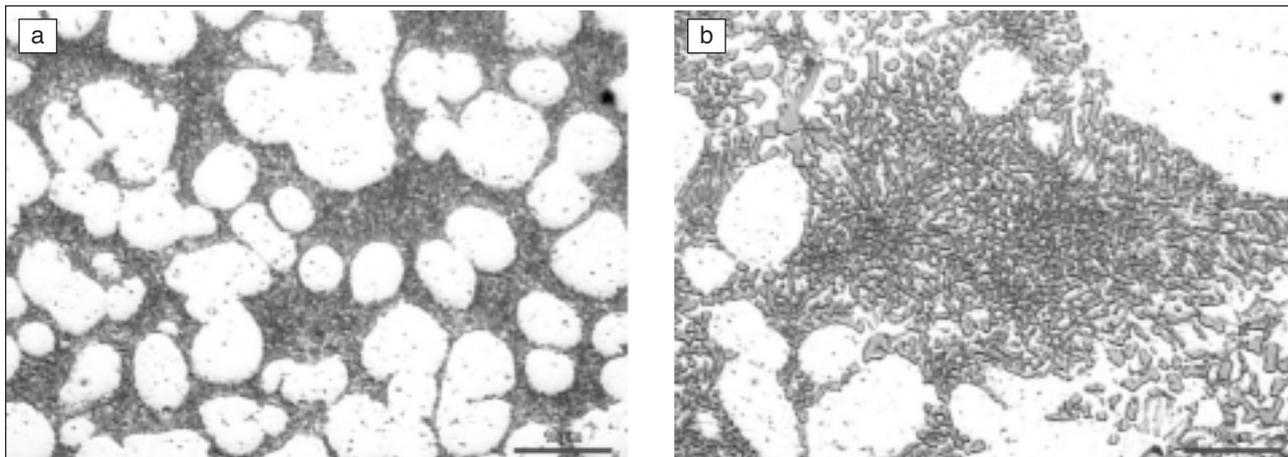
L. M. Volpone  
(Consulente, Genova).

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Sr	P	Altri
Min.	9,5	-	-	0,5	0,1	-	0,04	0,010	-	-
Max.	11,5	0,15	0,03	0,8	0,5	0,07	0,15	0,020	0,001	0,10

TAB.1 *Composizione chimica della lega AlSi9MgMn.* Chemical composition of the AlSi9MgMn alloy.

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Mo	Zr	Ti	Sr	Altri
Min.	8,5	-	-	0,35	-	-	-	-	-	0,006	-
Max.	10,5	0,15	0,05	0,60	0,06	0,07	0,3	0,3	0,15	0,025	0,10

TAB. 2 *Composizione chimica della lega AlSi9Mn.* Chemical composition of the AlSi9Mn alloy.



**FIG. 1** *Micrografie al M.O. della lega AlSi9Mn (a) e AlSi9MgMn (b).*

*O.M. micrography of the AlSi9Mn alloy (a) and of the AlSi9MgMn alloy (b).*

si hanno dei marcati effetti di incremento della resistenza meccanica grazie all'invecchiamento. Quindi in sostanza, la lega AlSi9Mn non risulta particolarmente sensibile al fenomeno dell'invecchiamento, mentre risulta esserlo la lega AlSi9MgMn[1,2,3].

A questo proposito si riportano in Figura 1 le immagini prese al M.O. delle due leghe in questione, da notare che la microstruttura fra le due risulta essere molto simile a meno di una differente dimensione della fase eutettica che risulta generalmente essere un po' più grossolana nel caso della lega AlSi9MgMn.

#### PIANO SPERIMENTALE

Si è proceduto realizzando dei cordoni di saldatura con tutte e tre le tecnologie sopra citate direttamente su lastrine pressocolate con le due differenti leghe in questione. La tecnica è nota con il nome di "beads on plate", in questo modo ci si affranca da quelle che sono le problematiche di accoppiamento dei pezzi e di preparazione dei lembi.

Per quanto riguarda le tecnologie Friction e Fascio Elettronico le superfici sono state solamente sgrassate prima di essere saldate mentre per il Fascio Laser si è proceduto anche con processi di rimozione dello strato superficiale di allumina, in particolare tramite spazzolatura con spazzola inox o tramite decapaggio chimico in soluzione di NaOH.

In seguito alla realizzazione delle passate di saldatura si è proceduto con il sezionamento e la successiva pulitura delle sezioni. Inizialmente queste sono state sottoposte ad una osservazione di tipo macroscopico e successivamente (per le sezioni che hanno suscitato interesse) ad una osservazione tramite microscopico (previa preparazione metallografica del campione da osservare).

#### SPERIMENTAZIONE CON FASCIO LASER

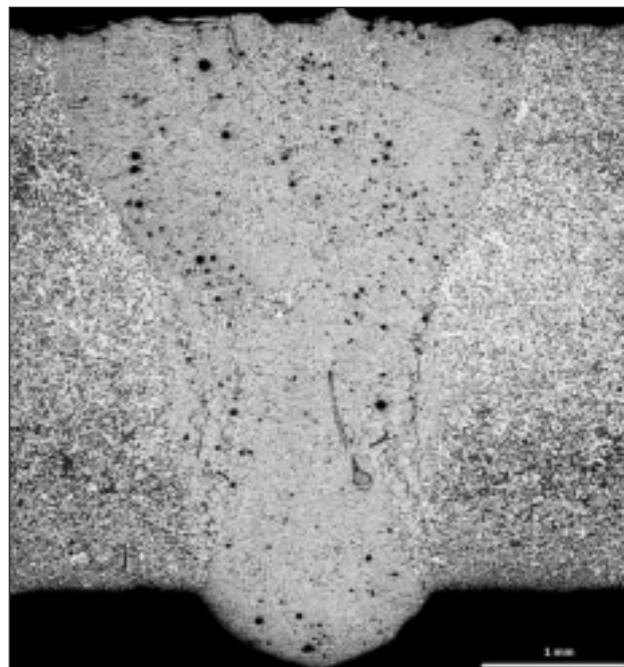
La sperimentazione tramite fascio laser si è avvalsa di una apparecchiatura di saldatura laser prodotta dalla società RTM S.p.A. (To) e di proprietà dell'Istituto Italiano della Saldatura (Genova).

L'attrezzatura in questione è un laser CO<sub>2</sub> in grado di erogare fino a 6 kW e dotato di una cella di saldatura con tavola cartesiana di corse X = 1200 mm Y = 700 mm, infatti il movimento non è dato dalla testa saldante ma dalla tavola sottostante su cui il pezzo da saldare viene opportunamente fissato. La testa di saldatura ha solo la possibilità di muoversi verticalmente (allontanandosi o avvicinandosi alla tavola mobile sottostante) con una corsa complessiva di 340 mm.

I parametri da impostare nel sistema e da regolare prima dell'esecuzione della saldatura sono:

- Rampa di potenza in ingresso;
- Potenza erogata durante la saldatura;
- Rampa di potenza in uscita;
- Portata di gas protezione/soppressione plasma;
- Velocità di avanzamento;
- Inclinazione della testa saldante.

La possibilità di gestire le rampe di ingresso e uscita permette di ottimizzare le fasi di inizio e di fine saldatura che possono risultare particolarmente delicate. Il gas di protezione affluisce



**FIG. 2** *Sezione osservata al MO a basso ingrandimento di una saldatura laser effettuata su lega AlSi9MgMn su spessore di 4mm con i seguenti parametri: Velocità di Avanzamento: 41,7 mm/s; Potenza: 4,1 kW; Portata di gas (He): 4 l/h.*

*OM low magnification micrograph of a laser welding on a 4mm thickness AlSi9MgMn alloy applying the following parameters: Feed rate: 41.7 mm/s; Power: 4.1 kW; Gas feed (He): 4 l/h.*

parallelamente al fascio laser attraverso un ugello in ottone, mentre quello di soppressione plasma fluisce tangenzialmente rispetto alla direzione di avanzamento attraverso un apposito ugello in rame[4,5].

Sono state realizzate circa 30 passate di prova per ciascuna delle due leghe utilizzando lastre di spessori di 2 e 4mm, la problematica ricorrente che è stata riscontrata è quella della presenza di porosità e microporosità nella zona fusa del materiale (Fig. 2).

In Fig.2 si può osservare a titolo di esempio che la qualità dei giunti che si realizzano non è soddisfacente, in questo caso si riporta una sezione della lega AlSi9MgMn ma anche nel caso della lega AlSi9Mn si ha a che fare con lo stesso tipo di problema.

Si è provato ad ovviarlo puntando a ridurre al minimo tutte le potenziali fonti di idrogeno durante il processo di saldatura, quali:

- l'umidità presente nei tubi di afflusso del gas di soppressione/protezione;
- la rimozione meccanica o chimica dell'allumina superficiale prima del processo di saldatura;
- L'utilizzo di una seconda passata laser sulla saldatura appena realizzata.

Il fatto che le porosità persistano anche quando si utilizza una seconda passata è indice di un continuo apporto di umidità da parte del sistema di saldatura verso il bagno, infatti qualora le porosità fossero alimentate solo dal gas disciolto nel metallo, si dovrebbe osservare una diminuzione della presenza di pori all'interno della zona fusa. Cosa che di fatto non avviene.

## SPERIMENTAZIONE CON FASCIO ELETTRONICO

La fase di sperimentazione tramite fascio elettronico è stata possibile solo grazie alla disponibilità della ditta Pro Beam GmbH (Monaco di Baviera, Germania) che ha messo gentilmente a disposizione uno dei suoi macchinari di produzione per l'esecuzione delle saldature.

Le specifiche tecniche dell'apparecchiatura in questo caso sono coperte da segreto industriale ma genericamente si può dire che si tratta di un sistema equipaggiato con una camera di pre-vuoto che permette di separare la cella di saldatura dall'esterno. I parametri chiave da impostare nella macchina sono stati:

- Corrente del filamento;

- Differenza di potenziale fra anodo e catodo;
- Velocità di avanzamento;
- Posizione del fuoco.

La sperimentazione si è orientata da un lato sulla ricerca dei parametri tramite i quali le leghe possono essere saldate e dall'altra sull'adozione di due diversi tipi di stratagemmi per aumentare la qualità dei giunti quali il metodo della doppia passata ed il metodo della seconda passata superficiale (cosiddetta passata cosmetica) che ha portato a notevoli benefici per quanto riguarda la qualità del cordone di saldatura a livello superficiale (cordone perfettamente raccordato e saldatura pulita in superficie[5,6]).

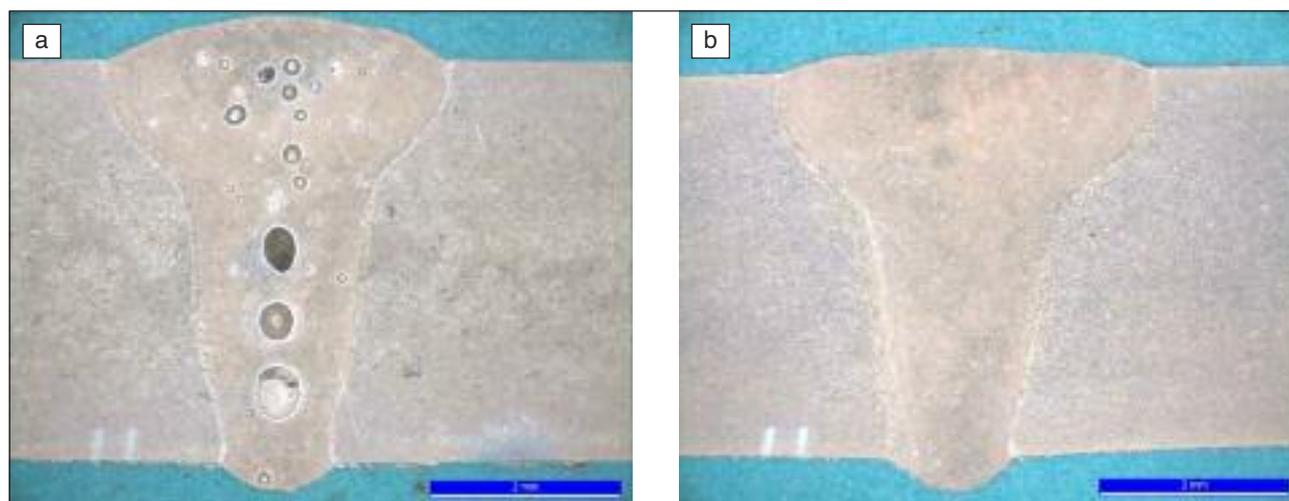
In questo caso, saldando in condizioni di vuoto si può escludere la presenza di umidità all'interno della camera di saldatura di conseguenza le porosità che si trovano all'interno della zona fusa sono quasi esclusivamente riconducibili all'idrogeno già disciolto nel metallo pressocolato. Di conseguenza si è visto che effettuando una seconda passata a fascio elettronico si dà il tempo al metallo che viene portato a fusione per una seconda volta di sviluppare completamente i gas disciolti al suo interno.

Questo risultato si è dimostrato lo stesso per entrambe le leghe e gli spessori, le porosità e le microporosità spariscono completamente grazie all'utilizzo della tecnica della doppia passata.

A questo proposito in figura 3 si riporta il confronto delle sezioni di due cordoni di saldatura, il primo (a sinistra) è stato realizzato con una singola passata mentre in secondo (destra) è stato realizzato con due passate successive utilizzando gli stessi parametri di saldatura.

Altra considerazione che può essere fatta riguarda l'ampiezza della zona fusa infatti, parlando del cordone con doppia passata, si ha che qualora si raffreddi il pezzo fra le 2 saldature successive si ottiene una sezione di geometria e dimensioni pressoché identiche mentre nel caso non si raffreddi il pezzo la zona fusa risulta più ampia a causa della temperatura iniziale del materiale che è ovviamente maggiore.

Nel caso illustrato in Fig.03 (destra) si è effettivamente fatta raffreddare la lastrina tra una passata e l'altra. Gli effetti benefici legati all'utilizzo della seconda passata sono chiari. A questo proposito si sono effettuate prove fino a velocità di avanzamento crescenti fino ad arrivare a 90mm/s, anche a questa



**FIG. 3** Sezioni di saldature in passata singola (a) e doppia (b) della lega AlSi9Mn su spessore di 4mm realizzate con i seguenti parametri: Velocità Avanzamento: 20mm/s; Corrente Filamento: 18 mA; Tensione: 80kV.

Single step (a) and double step (b) welding sections of the 4mm thickness AlSi9Mn alloy applying the following parameters: Feed rate: 20mm/s; Wire power supply: 18 mA; Voltage 80kV.

velocità ai limiti della funzionalità dell'apparecchiatura, tramite doppia passata si sono ottenuti gli stessi risultati soddisfacenti.

In generale per questa sperimentazione si sono adottati parametri variabili tra i 4 ed i 28 mA per quanto riguarda la corrente del filamento e velocità di avanzamento fino a 90 mm/s con una tensione pari a 80 kV.

## SPERIMENTAZIONE CON FRICTION STIR

La sperimentazione tramite processo di saldatura Friction Stir si è avvalsa di una apparecchiatura prodotta dalla società GKSS-Forschungszentrum (Germania) e di proprietà dell'Istituto Italiano della Saldatura.

L'apparecchiatura è costituita da una testa saldante fissata su un supporto in grado di muoversi perpendicolarmente rispetto al piano di saldatura, quindi, anche qui come nel caso del laser non è la testa saldante ad effettuare il movimento di avanzamento ma bensì la tavola sottostante, che ha la possibilità di muoversi solo lungo un asse (come si vede nella foto sottostante) in entrambe le direzioni, con una velocità massima di 160 mm/s.

La macchina ha una capacità di spinta in direzione verticale di 60kN ed in direzione longitudinale di 20 kN con una velocità di rotazione dell'utensile fino a 6000 giri/min[7].

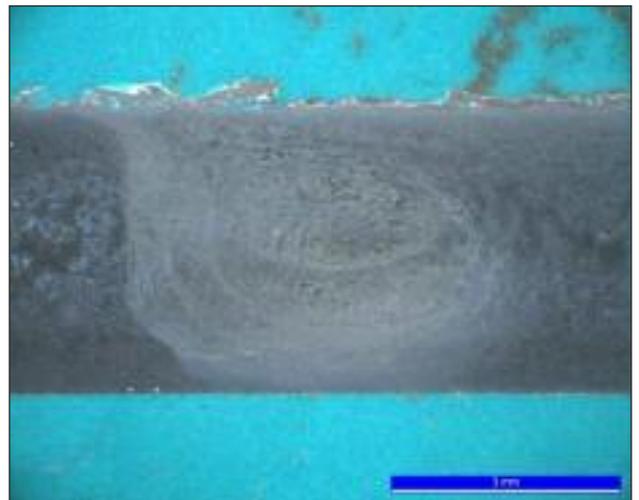
Il macchinario può essere utilizzato secondo due differenti modalità di lavoro ossia secondo il controllo di forza o tramite controllo di posizione, nell'ambito della ricerca qui trattata si è scelto di lavorare secondo la modalità di controllo della posizione, andando quindi ad impostare sulla macchina i seguenti parametri:

- Velocità di rotazione iniziale (durante la fase di penetrazione);
- Velocità di rotazione dell'utensile durante saldatura (rpm);
- Lunghezza del pin;
- Quota di "touch point";
- Velocità di avanzamento;
- Inclinazione della testa saldante.

La velocità di rotazione iniziale è sempre stata di 200 giri/min superiore rispetto alla velocità di rotazione durante la saldatura, in questa prima fase è utile avere una velocità superiore perché la superficie di contatto fra utensile e pezzo è molto piccola (si consideri che nel "touch point" la superficie di contatto equivale all'area dell'estremità del pin). Successivamente, quando il pin è completamente stato spinto all'interno del materiale, ovvero nel momento in cui la spalla tocca il materiale da saldare, si diminuisce la velocità di rotazione dell'utensile.

Nell'ambito delle diverse prove tra i due spessori delle due leghe si sono utilizzati parametri variabili tra gli 800 ed i 2000 rpm per la velocità di rotazione dell'utensile e fino a 40 mm/s di velocità di avanzamento (velocità raggiunta sulle lastre di spessore 2 mm).

Come si può osservare dalla Fig. 4 la sezione del nocciolo è asimmetrica ed il lato sinistro nella foto è quello dell'advancing side ovvero del lato del cordone dove la velocità di avanzamento e la velocità di rotazione dell'utensile hanno la stessa direzione. Qui il contrasto risulta netto tra la zona del nocciolo e la zona inalterata del materiale pressofuso, questo almeno a livello macroscopico, infatti se si osserva la zona limitrofa all'advancing side al microscopio ottico, si scopre che di fatto la morfologia della microstruttura del materiale varia gradualmente da una morfologia come quella di figura 1 ad una struttura decisamente più fina ed in cui la fase primaria ricca di alluminio fa da matrice rispetto alla fase eutettica che risulta essere dispersa in domini molto piccoli (inferiori ai 5  $\mu\text{m}$ ).



**FIG. 4** Sezione di saldatura Friction Stir della lega AISi9Mn su spessore di 4mm con i seguenti parametri; Velocità di rotazione utensile: 1500 rpm Avanzamento: 16 mm/s.

*Friction Stir welding section of the 4mm thickness AISi9Mn alloy, applying the following parameters: Tool rotation speed: 1500 rpm Feed rate: 16 mm/s.*

Come è noto[8] il processo Friction Stir non porta a fusione il materiale ma lo scalda a temperature prossime a quella di fusione facendo sì che questo plasticizzi e possa essere deformato e rimescolato.

Ed è proprio questa la caratteristica peculiare del processo che ne ha garantito la sua applicabilità entro un ampio intervallo di parametri di saldatura.

## CONCLUSIONI

Grazie a questo studio si è potuto stabilire che tutti i processi di saldatura che implicano la fusione del materiale base causano lo svolgimento dei gas in esso disciolti con conseguente formazione di porosità nella zona fusa.

I processi ad energia concentrata però si prestano ad essere adottati con una tecnica in passata multipla sullo stesso cordone, questo metodo risulta vincente con la tecnologia a fascio elettronico che operando nel vuoto è esente da qualsiasi fonte di inquinamento. La tecnologia laser si è invece dimostrata inefficiente anche con la tecnica della doppia passata, questo anche per un potenziale continuo apporto di umidità da svariate fonti che assieme alla presenza dei gas disciolti non permette la riduzione delle porosità sotto livelli accettabili. Sono anche state realizzate delle prove di microdurezza su buona parte delle sezioni analizzate che, nel caso appunto delle tecnologie ad energia concentrata, hanno evidenziato un incremento della microdurezza in zona fusa pari a circa 20 punti Vickers mentre non si sono riscontrate diminuzioni della stessa in ZTA.

La tecnologia Friction Stir si è rivelata efficace entro un ampio intervallo di parametri di saldatura e non portando il materiale a fusione è esente dalle problematiche di sviluppo dei gas disciolti nei materiali. L'analisi dei profili di microdurezza sulle sezioni ha invece messo in evidenza una caduta della stessa che comunque risulta essere contenuta entro i 25 punti Vickers. Infine, non si sono evidenziate particolari differenze tra le due leghe nell'attitudine ad essere saldate con le tre tecniche in questione anche per ciò che concerne i profili di microdurezza realizzati sulle sezioni.

## BIBLIOGRAFIA

- [1.] Aluminium Rheinfelden - "Leghe d'alluminio da pressocolata" - Rheinfelden brochure edizione 2006
- [2.] Aluminium Rheinfelden - "Primary aluminium alloy for pressure die casting" - Rheinfelden brochure edizione 2007
- [3.] W. Nicodemi - "Acciai e leghe non ferrose" - Zanichelli, 2000 - pag 248-251 ISBN: 88-08-03237-X
- [4.] William M. Steen - "Laser material processing, third edition" - Springer 2005 - pag 22-34 ISBN: 1852336986
- [5.] American Welding Society - "Welding Handbook ninth edition volume 3: Welding Processes, Part 2" - AWS 2007
- [6.] Istituto Italiano della Saldatura - "Processi di saldatura ad energia concentrata" - IIS Genova, 2008, Codice IIS: 101103
- [7.] A. Lauro - "La saldatura Friction Stir Welding delle leghe di titanio" - Rivista Italiana della Saldatura Pag 291-303 n° 3, 2009
- [8.] R. Nandan, G.G. Roy, T. DebRoy - "Numerical simulation of three dimensional heat transfer and plastic flow during friction stir welding" - Metallurgical and material transaction n°2 - 2006

## Abstract

### Study of weldability (LBW, FSW, EBW) of Al base diecasting alloys

**Keywords:** Al alloys, diecasting, welding

Diecasting alloys are generally difficult to weld by traditional arc processes due to the mild welding thermal cycles, which may cause fragile phases precipitation inside the ZTA; in addition, the complex geometry of the parts can actually make certain technologies inapplicable (e.i. welding in interstices which can not be reached with traditional welding torches). Hence the need for a weldability study with alternative processes such as those using concentrated energy (laser beam and electron beam) or the typical Friction Stir process that allows to easily weld low melting materials such as aluminum alloys without getting to fusion (factor that in this case can be very usefull). The present study involved the use of the three above-mentioned welding processes by means of the a technique known as "beads on plate" which consists in the formation of weld beads directly on the base material without having to physically put the two pieces together and which allows at the same time to determine the applicability or less of a certain process. The material involved for the experiments were diecast thin plates made of two different Al / Si alloys (Sr modified AlSi9Mn and AlSi9MgMn) and with thicknesses of 2 and 4 mm. The first alloy was characterized by the absence of magnesium; the second one had 0.1 and 0.5% magnesium contents (and therefore to be considered as a precipitation hardening alloy).