

# Prove di saldabilità per l'alluminio

peso specifico della matrice, la presenza di elementi ceramici in qualità di rinforzo conferisce al materiale non solo buona resistenza alla corrosione e all'usura, ma anche valori resistenziali e proprietà strutturali prossime a quelli degli acciai da costruzione. Tra le varie tipologie di Al MMC attuali-

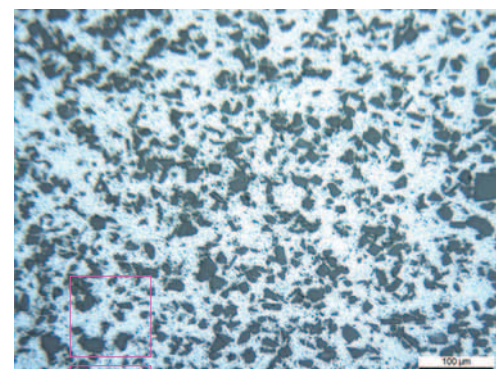


Figura 1. Immagine al microscopio ottico del composito Al MMC-SiCp.

mente disponibili, sono oggi maggiormente diffusi gli Al MMC rinforzati con particelle di carburo di silicio (Al MMC-SiCp). Infatti, oltre alle già enunciate proprietà, l'utilizzo di SiC, elemento già largamente diffuso per la realizzazione di utensili abrasivi, permette una notevole riduzione dei costi di produzione. Tra i principali campi d'impiego di tali compositi si può citare il settore aeronautico (componenti del nuovo Airbus A380 sono realizzati con Al MMC-SiCp) nonché il settore automotive (dischi freno in campo racing). A fronte dei vantaggi riconosciuti, i compositi Al MMC-SiCp tuttavia non hanno avuto la diffusione che potenzialmente sembravano promettere agli inizi degli anni '80, a causa di notevoli difficoltà nei processi di lavorazione e finitura.

Tra questi, si ricordano le difficoltà nei processi di giunzione mediante fusione, causate sia da problemi di interfaccia matrice-SiC che da problemi di scarsa omogeneità del particolato nel giunto.

Infatti, è noto come al di sopra dei 700 °C, e quindi al di sopra di temperature che possono essere facilmente raggiunte nei processi di saldatura per fusione ad elevata densità di energia, la reattività delle particelle di SiC nei confronti della matrice aumenti considerevolmente. In particolare, si assi-

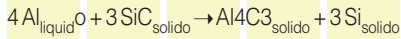
Presso il Sitec, Laboratorio per le Applicazioni Laser del Politecnico di Milano, si sono svolte delle prove per verificare la saldabilità di compositi a matrice d'alluminio. Si è mostrato come sia molto limitata nel caso in cui il fascio laser lavori in profonda penetrazione. Grazie all'utilizzo di sorgenti laser a diodi, invece, è possibile saldare in conduzione

Tra i materiali di ultima generazione un interesse sempre più crescente è indirizzato verso i compositi a matrice di alluminio (Aluminium Metal Matrix Composite - Al MMC). Con tale termine viene indicata quella particolare famiglia di compositi metallici ottenuti inserendo all'interno di una matrice di alluminio delle particelle di un elemen-

to rinforzante, quali ad esempio Allumina ( $Al_2O_3$ ), carburi di Silicio (SiC), carburi di Titanio (TiC) con tenori di rinforzo variabile dal 10% al 30% in volume.

Dal punto di vista meccanico i vantaggi di tali compositi sono innegabili: a fronte infatti di un'elevata leggerezza dei componenti, garantita dal limitato

ste alla dissociazione del carburo di silicio in carbonio e silicio e alla formazione di carburi di alluminio ( $Al_4C_3$ ) ed arricchimento della matrice in silicio, secondo la reazione chimica:



anche legati ai brevetti.

Una seconda modalità consiste nell'utilizzare processi di saldatura tradizionali e di più larga diffusione e nel controllarne attentamente l'apporto termico.

In tale ottica, le tecniche di saldatura laser potrebbero consentire di ottenere

modalità di saldatura non è più in profonda penetrazione, come avviene nei laser  $CO_2$  ma in conduzione, determinando così un apporto termico più omogeneo e controllato su tutta la zona soggetta a fusione (a questo proposito si veda il riquadro dedicato) [2]. In questo contesto, presso il Sitec, Laboratorio per le Applicazioni Laser del Politecnico di Milano, sono state effettuate alcune prove di saldatura. In profonda penetrazione sono state svolte con sorgente laser  $CO_2$ , eseguite con l'intento di individuare l'eventuale effetto limitativo dei parametri di processo sullo sviluppo dei carburi di alluminio. Inoltre, sono state fatte delle prove di saldatura in conduzione mediante impiego di un laser a diodi.

## MATERIALE E SISTEMI

Il composito indagato è costituito da una lega di alluminio A359, rinforzato con particelle di carburo di Silicio nella percentuale del 20% in volume, distri-

Designazione commerciale composito:								F3S.20S
%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Ti	%Zn	Altri	%SiC
9,03	0,03	0,06	0,02	0,52	0,02	0,01	<0,10 totale	20,1% vol.
Caratteristiche della polvere di SiC								
Diametro Medio delle Particelle [ $\mu m$ ]								11,8–13,8
Densità [g/cm <sup>3</sup> ]								1,7
Caratteristiche Meccaniche F3S.20S								
Densità [g/cm <sup>3</sup> ]								2,77
Rm [MPa]								359
E [GPa]								98,6
Deformazione [%]								0,4
Durezza Rockwell [HRB]								77

Tabella 1. Composizione chimica e caratteristiche fisico-meccaniche dell'Al MMC.

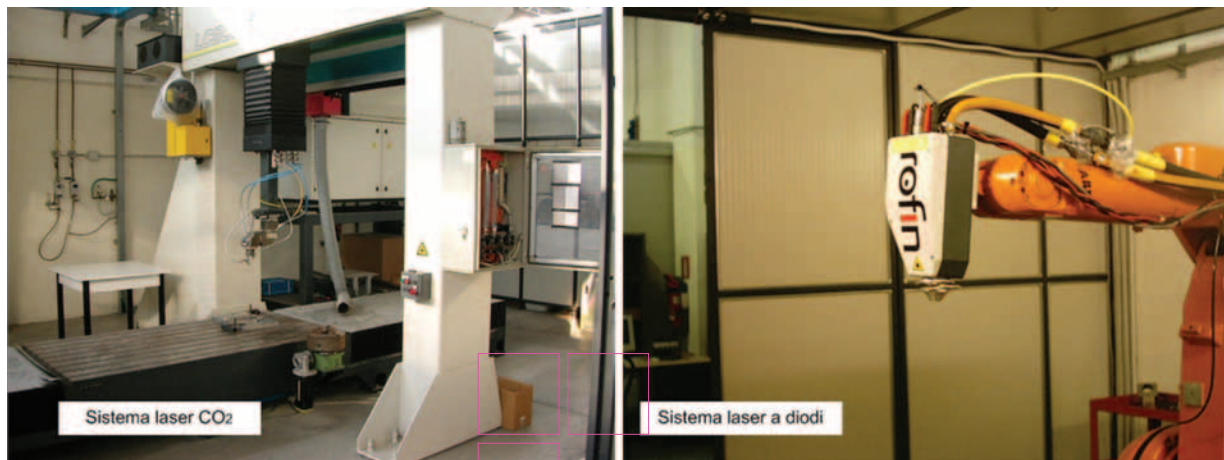


Figura 2. Sistemi laser utilizzati nelle sperimentazioni (a sinistra il sistema laser a  $CO_2$  e a destra il sistema a diodi).

I carburi di alluminio sono elementi nocivi, sia perché sono caratterizzati da un'elevata durezza e fragilità sia perché hanno la forma di lamelle sottili ed allungate, facile punto di innesco di cricche e rotture [1].

Una modalità per superare questi inconvenienti consiste nell'utilizzare i metodi di giunzione che non richiedono il raggiungimento della temperatura di fusione, quali il diffusion bonding e il friction stir welding. Entrambi i metodi tuttavia sono molto 'di nicchia' ed oggi utilizzati solo per alcune applicazioni perché soffrono di alcune limitazioni nei dispositivi e di elevati costi,

re buoni risultati. Sebbene infatti i numerosi studi effettuati sul processo di saldatura laser dei compositi mediante le tradizionali sorgenti laser a  $CO_2$  non abbiano portato a risultati accettabili, l'avvento dei nuovi laser a diodi sembra essere la risposta adeguata a tale problema.

A differenza infatti di quanto avviene nelle sorgenti laser  $CO_2$ , la particolare architettura a semiconduttori dei laser a diodi determina in uscita dalla sorgente un fascio laser a spot rettangolare a densità di energia pressoché costante lungo tutta l'area dello spot stesso. In tale configurazione perciò la

buite in modo omogeneo all'interno della matrice (Figura 1). I campioni per la sperimentazione sono stati ricavati da barre estruse di sezione quadrata 4 x 40 mm. La composizione chimica del composito insieme con le proprietà fisico-meccaniche è esposta in Tabella 1.

Per quanto riguarda i sistemi utilizzati, le prove iniziali sono state eseguite con sorgente laser  $CO_2$  multimodo, avente potenza massima pari a 6 kW, lunghezza d'onda pari a 10.6  $\mu m$  e coefficiente M2 maggiore di 7.14. La sorgente  $CO_2$  è integrata sul sistema cartesiano a tre assi esposto in Figura 2.

Di contro, le prove finali sono state effettuate con sorgente laser a diodi da 2.2 kW CW con lunghezze d'onda nel vicino infrarosso (Figura 2).

## SALDATURA LASER CO<sub>2</sub> IN PROFONDA PENETRAZIONE

Con tali prove si è voluto indagare l'effetto dei principali parametri di processo sia sulla morfologia del cordone di saldatura che sulla dissociazione del rinforzo ceramico all'interno della zona fusa stessa.

Dalle saldature ottenute sono state in seguito ricavate delle sezioni trasversali, necessarie per l'analisi del pro-

cesso mediante valutazione della larghezza L e della profondità H del singolo cordone, nonché mediante valu-

Parametri fissi sistema laser a CO <sub>2</sub>		Parametri sistema laser a diodi	
Tipo di gas	N <sub>2</sub>	Potenza	2,00 KW
Portata del gas	10 nl/min	Velocità	15-25-35 mm/s
Inclinazione ugello gas	30°	Distanza focale	0 mm
Distanza focale	0 mm	Gas d'assistenza	N <sub>2</sub>

Tabella 2. Parametri di processo utilizzati durante le sperimentazioni.

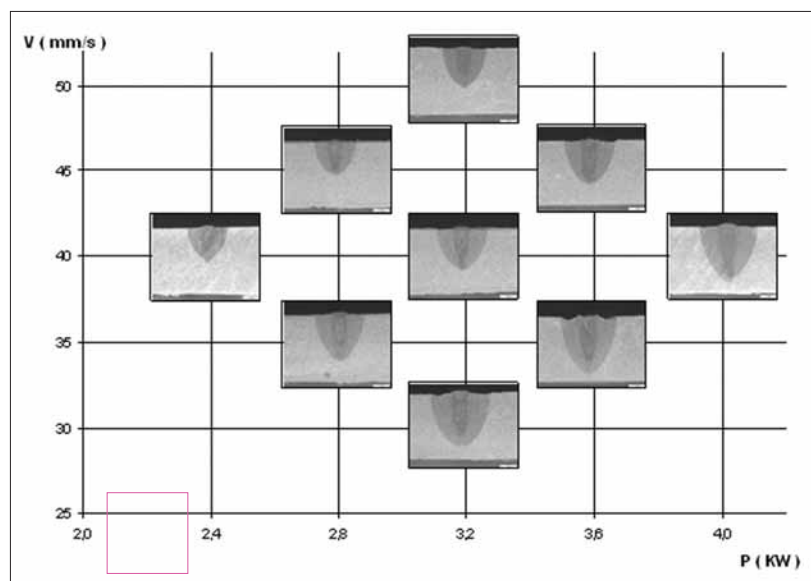


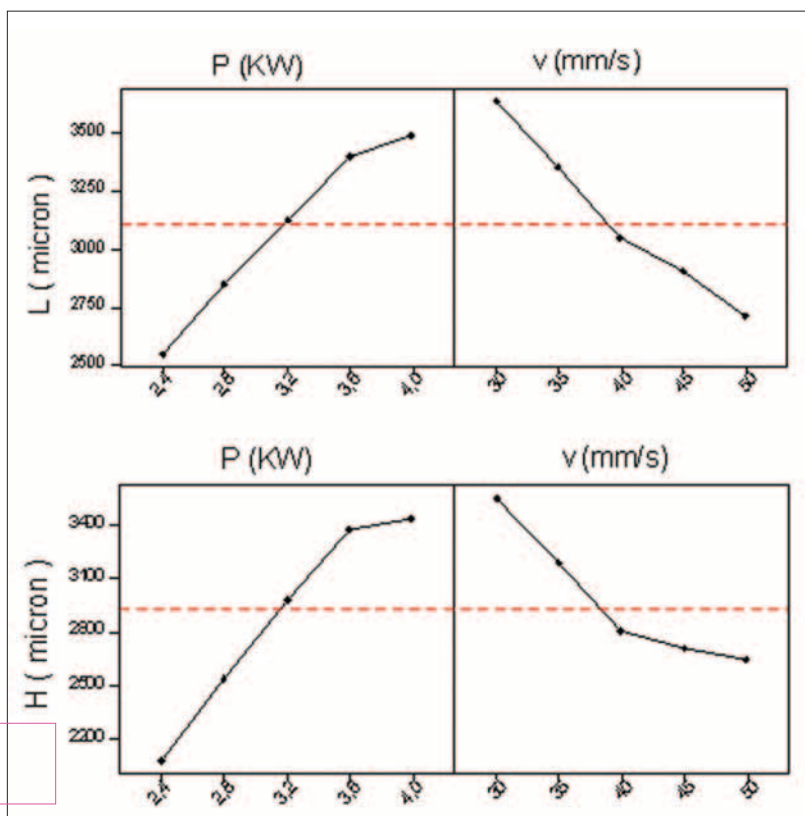
Figura 3. Sezioni trasversali delle condizioni di saldatura CO<sub>2</sub>.

I parametri di processo indagati sono stati la potenza laser P e la velocità di avanzamento del fascio di saldatura v. Di contro, i restanti parametri di processo sono stati mantenuti fissi secondo quanto riassunto in Tabella 2.

I livelli dei due parametri indagati sono stati organizzati con metodiche statistiche di analisi della varianza e le singole condizioni sperimentali sono state fatte variare secondo un piano fattoriale di tipo central composite design [CCD] [3].

Per ogni condizione sperimentale è stato eseguito un cordone di saldatura di circa 100 mm di lunghezza, successivamente replicato con numerosità dettata dal piano fattoriale utilizzato.

Tabella 3. Effetto dei parametri di processo sulla morfologia del cordone in saldatura CO<sub>2</sub>.



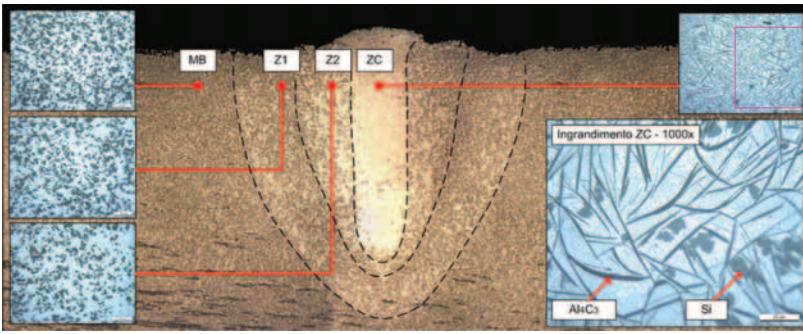
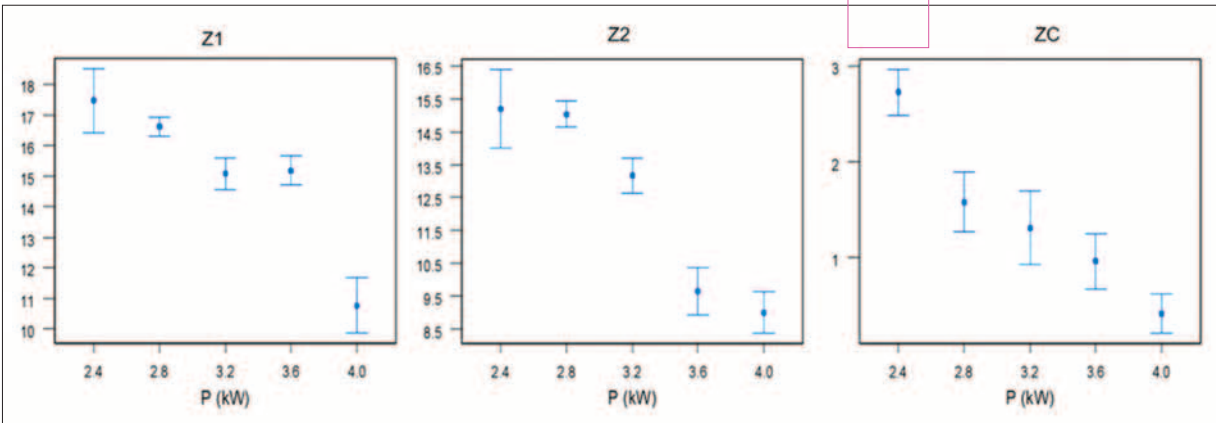


Figura 4. Sezione trasversale e micrografie del cordone di saldatura associato al punto centrale del piano sperimentale per le prove di saldatura con laser CO<sub>2</sub>; MB = Materiale Base, Z1 = prima zona di fusione, Z2 = seconda zona di fusione, ZC = Zona Centrale.

quotaparte di SiC disciolto, grazie a Figura 5. Effetto della potenza sulla dissoluzione del rinforzo nelle diverse zone del cordone di saldatura.



materiale base (MB) alla zona centrale del cordone (ZC), il carburo di silicio tenda a diradarsi, fino a scomparire del tutto nella zona centrale.

Osservando l'ingrandimento della zona centrale, si nota come in tale zona la totale dissoluzione di SiC avvenga esclusivamente a favore del carburo di alluminio.

Da tale mappatura si può inoltre dedurre come, a causa delle elevate temperature raggiunte nella zona cen-

trale del cordone dove si genera il canale di vapore metallico proprio della saldatura in profonda penetrazione, tale zona presenti la totale dissoluzione della fase rinforzante a favore della completa formazione di carburo di alluminio.

Allontanandosi invece dall'asse di simmetria centrale del cordone, è lecito ipotizzare una diminuzione delle temperature durante la saldatura, con conseguente riduzione della

temperature di reazione dell'equazione 1 sempre più basse.

Infine è stato possibile valutare l'effetto della potenza e della velocità sulla dissoluzione del rinforzo. In relazione alla Figura 5 è stato osservato che, mentre la velocità di saldatura non influisce sulla dissoluzione del SiC, l'utilizzo di valori di potenza inferiori permette la limitazione di tale dissoluzione a valori accettabili in tutte le zone precedentemente discusse, eccezion fatta comunque della zona centrale dove la totale dissoluzione risulta sistematica.

## SALDATURA LASER

a diodi in conduzione

A differenza del piano fattoriale a due fattori precedentemente utilizzato, nelle prove di saldatura con laser a diodi si è optato per un unico fattore variabile quale la velocità di saldatura, considerata ora su tre distinti livelli. Ta-

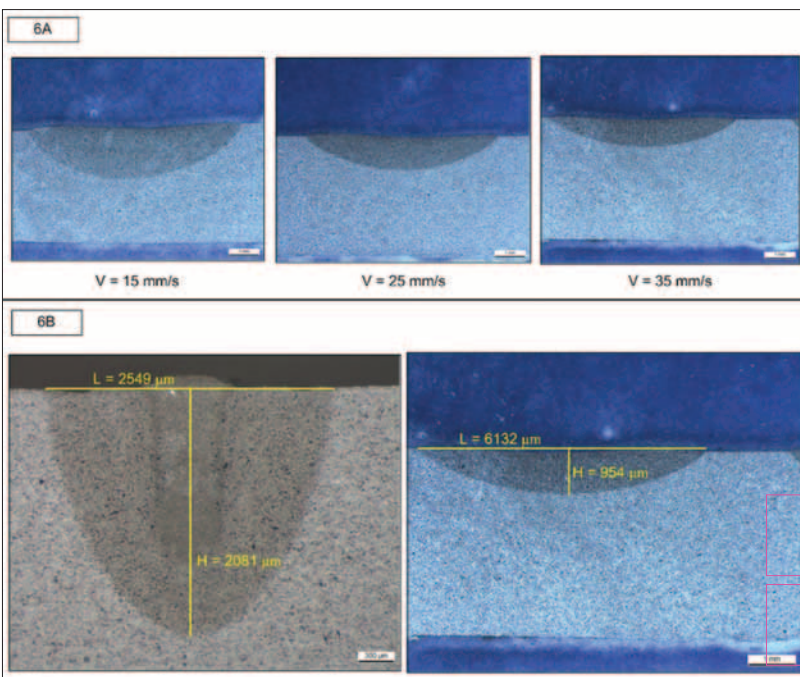


Figura 6. a) Sezioni trasversali delle tre condizioni di saldatura con laser a diodi. b) confronto tra due condizioni di saldatura effettuate con P e v simili ma con differenti modalità di saldatura: a sinistra: saldatura con laser CO<sub>2</sub> P=2.4 KW e v=40 mm/s; a destra: saldatura con laser a diodi P=2.0 KW e v=35 mm/s.

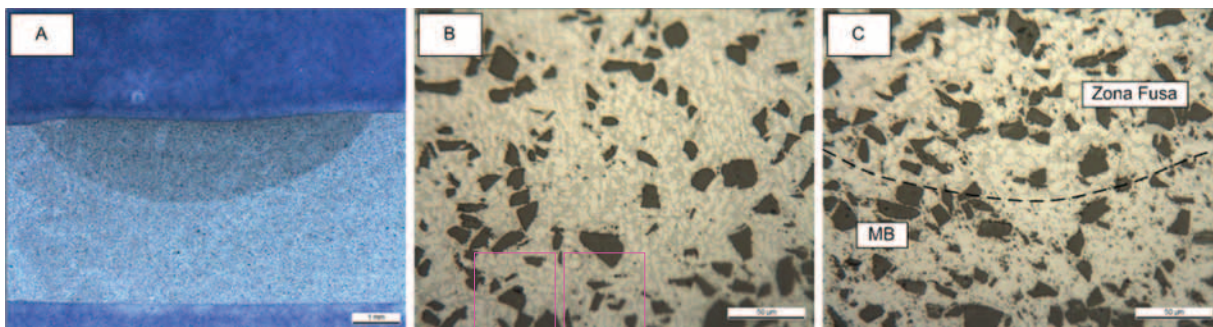


Figura 7. a) sezione trasversale della saldatura con laser a diodi a  $v=15\text{mm/s}$  b) ingrandimento della parte alta del cordone c) ingrandimento del confine tra la parte bassa del cordone e il materiale base.

le scelta è stata motivata dalla minor potenza laser disponibile per la sorgente in questione, prevedendo dunque la realizzazione delle prove con la potenza fissata al massimo livello disponibile. I parametri di processo utilizzati sono riassunti in Tabella 2.

Le prove sono state realizzate secondo le modalità già descritte nella campagna precedente.

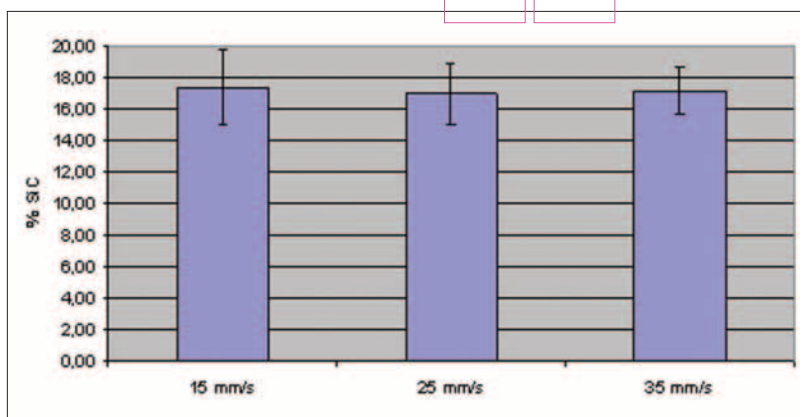
Le sezioni trasversali delle tre condizioni analizzate sono presentate in Figura 6a.

Dalle prove effettuate risulta che la profondità dei cordoni aumenta al diminuire della velocità di saldatura, mentre non si osserva una variazione statisticamente significativa della larghezza. Il rapporto di forma, ovvero il rapporto L/H, è comunque molto maggiore di quello osservato nelle diverse condizioni di saldatura con laser  $\text{CO}_2$  (circa pari a 3 per le saldature mediante laser a diodi e pari a 0.35 per le saldature mediante laser  $\text{CO}_2$ ). Come è lecito aspettarsi le saldature eseguite con laser a diodi hanno una forma emisferica, tipica delle saldature in conduzione, molto lontana dalla forma a testa di chiodo delle saldature in profonda penetrazione.

Tuttavia le saldature eseguite mediante laser a diodi sono caratterizzate dall'assenza di prodotti di reazione tra la matrice e il SiC. Osservando la Figura 7 appare evidente l'assenza delle zone a differente tenore di rinforzo osservate nella modalità di saldatura in profonda penetrazione. In sezione la struttura del cordone si presenta omogenea non solo in direzione orizzontale ma anche in direzione verticale.

A seguito della rifusione si osserva infatti solo una leggera dissoluzione del

Figura 8. Andamento del SiC nelle tre condizioni di saldatura laser a diodi.



rinforzo. Tale dissoluzione risulta comunque limitata a circa due punti percentuali in tutte le tre condizioni indagate, essendo il fenomeno indipendente dalla particolare velocità di saldatura indagata (Figura 8).

Non si osserva inoltre la minima presenza di carburi di alluminio all'interno dei tre cordoni, mentre la matrice base presenta esclusivamente un affinamento del grano a seguito della rifusione (Figura 7b e 7c).

### CONCLUSIONI

Le prove esposte suggeriscono alcune riflessioni circa la saldabilità laser di compositi a matrice d'alluminio.

Si è mostrato come la saldabilità sia molto limitata nel caso in cui il fascio laser lavori con elevate densità di energia e in profonda penetrazione. In questa configurazione infatti è praticamente impossibile evitare la formazione di carburi di alluminio, che rendono fragile e poco resistente alla corrosione il giunto. Al contrario, grazie all'utilizzo di sorgenti laser a diodi, è possibile saldare in conduzione questi materiali, ottenendo una lieve dissoluzione del SiC in un cordone privo

di composti infragilenti.

La saldatura in conduzione purtroppo è caratterizzata da basse penetrazioni e quindi da bassi spessori saldabili. Tuttavia questo aspetto è molto dipendente dalle potenze massime disponibili dei sistemi laser a diodi, che vanno aumentando con la loro diffusione e sviluppo.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] BASSANI P., CAPELLO E., COLOMBO D., PREVITALI B., VEDANI M., Effect of process parameters on bead properties of A356/SiC MMCs welded by laser, *Design & Performance of Composite Materials Conference, Sheffield, U.K., 2005.*
- [2] Capello E., Lavorazioni Industriali Mediante Laser di Potenza, Ed. Clup, 2003.
- [3] Montgomery D.C., Myers R.H., Response surface methodology, John Wiley & Sons, 2002.

Edoardo Capello, Daniele Colombo, Barbara Previtali, Morris Rota, Andrea Salvi svolgono la loro attività presso il Sitec Lecco - Laboratorio per le applicazioni laser - Politecnico di Milano.