

# Saldatura di leghe d'alluminio mediante laser di potenza a CO<sub>2</sub> e a Nd:YAG

M. Fersini, V. Cascioli, S. Sorrentino

*Le leghe d'alluminio sono oggi utilizzate vantaggiosamente in una vasta gamma di applicazioni nell'industria dei trasporti. Nella saldatura per fusione, i processi convenzionali ad arco (MIG, TIG, ecc.) hanno raggiunto un'ottima maturità e sono attualmente di uso generale, ad esempio, nel settore navale. La saldatura laser, invece, anche se può ormai ritenersi matura nelle applicazioni con l'acciaio, solo negli ultimi anni sta fornendo risultati al livello degli alti standard caratteristici della tecnologia quando applicata alle leghe d'alluminio. Il presente lavoro espone i principali risultati ottenuti in attività condotte per valutare la saldabilità laser di leghe d'alluminio delle serie 2xxx, 5xxx e 6xxx, utilizzando due differenti tipologie di sorgenti laser: a CO<sub>2</sub> e a Nd:YAG. Le leghe esaminate sono quelle di maggior utilizzo nei settori navale ed aeronautico: AA5083, AA6082, AA6056 e AA2024. Sono state analizzate le principali problematiche inerenti al processo di saldatura: criccabilità, formazione di porosità e degradamento delle proprietà meccaniche nella zona saldata. In particolare, al fine di migliorare la qualità del giunto, sono stati presi in esame: l'utilizzo di un adatto materiale d'apporto, l'ottimizzazione del gas protettivo e l'impiego, per incrementare la stabilità del bagno, di un dispositivo ottico di suddivisione del fascio laser (twin spot). Il lavoro ha mostrato che giunti di buona qualità possono essere prodotti ottenendo un'alta produttività (saldatura autogena), indicando la saldatura laser come una tecnologia adatta per la saldatura di leghe d'alluminio per impieghi strutturali.*

**Parole chiave:** saldatura laser, leghe d'alluminio, settore navale, settore aeronautico

## INTRODUZIONE

Le leghe d'alluminio sono oggi utilizzate vantaggiosamente in una vasta gamma di applicazioni nell'industria dei trasporti. In particolare l'alta resistenza alla corrosione, combinata con bassa densità ed elevata resistenza meccanica, fanno delle leghe d'alluminio materiali interessanti per i costruttori [1].

Nel settore navale la saldatura per fusione delle leghe d'alluminio mediante i processi convenzionali ad arco (MIG, TIG ecc.) è attualmente di uso generale nei cantieri. D'altra parte il decadimento delle proprietà meccaniche in queste saldature è spesso un fattore limitante nella progettazione. Considerevoli sforzi sono stati fatti dai cantieri europei per introdurre la tecnologia laser. Fincantieri [2] ha già installato, nel cantiere di Monfalcone, un impianto per la saldatura laser dedicato alla saldatura di pannelli d'acciaio e recentemente ha sviluppato, nell'ambito di un progetto finanziato dalla Comunità Europea [3], un sistema integrato per la garanzia e il controllo della qualità della saldatura laser. Tali esperienze, insieme ad alcune attività condotte di recente [4], mettono in evidenza che la saldatura laser, introdotta nelle applicazioni per l'acciaio, può fornire risultati al livello degli alti standard caratteristici della tecnologia, anche quando applicata alle leghe d'alluminio.

Riguardo il settore aeronautico, se l'utilizzo delle leghe d'alluminio risale agli anni '40, la possibilità di ridurre i costi di fabbricazione impiegando la saldatura per fusione, al posto della rivettatura e dell'incollaggio, è questione attualmente in studio e presa in considerazione solamente grazie alla ca-

pacità della tecnologia laser di limitare le deformazioni del pezzo saldato. A tal proposito, è senz'altro degno di nota lo sforzo che i maggiori costruttori europei d'aeromobili stanno attualmente sostenendo, all'interno del progetto volto alla realizzazione del nuovo aeromobile AIRBUS A3XX, per introdurre la saldatura laser nel processo di fabbricazione di parti della fusoliera (vedi anche <http://www.tangoec-project.com>).

Il progressivo aumento dell'utilizzo della tecnologia laser nelle applicazioni strutturali è, fra l'altro, sicuramente da porre in relazione al miglioramento, in termini di qualità, affidabilità ed efficienza, delle sorgenti laser commercialmente disponibili. Tra queste ricordiamo la recente immissione sul mercato, relativamente alle due tipologie di sorgenti laser attualmente più impiegate nell'industria meccanica, laser a CO<sub>2</sub> e laser a Nd:YAG, dei laser a CO<sub>2</sub> sigillati (slab) e dei laser a Nd:YAG pompati a diodi. Il presente lavoro espone alcuni risultati ottenuti in attività svolte dal Centro Sviluppo Materiali S.p.A. (CSM) per committenti industriali nei settori aeronautico e navale, per valutare la possibilità di introdurre la saldatura laser delle leghe d'alluminio in applicazioni strutturali.

## SORGENTI LASER UTILIZZATE

Per la messa a punto del processo di saldatura sono state impiegate due sorgenti, entrambe in dotazione al Laboratorio di Saldatura del CSM, di cui si riportano di seguito le principali caratteristiche.

- Una sorgente laser a CO<sub>2</sub> (laser slab) con potenza massima di 2500 W interfacciata con un sistema di movimentazione a cinque assi (con corse pari a: asse x=3000 mm, asse y= 2000 mm, asse z=500 mm) capace di raggiungere una velocità massima di 10 m/min. Tale sorgente è caratterizzata da un'alta qualità del fascio (K>0,9) e, quindi, una focalizzazione più spinta che consente di ottenere

M. Fersini, V. Cascioli, S. Sorrentino  
Centro Sviluppo Materiali S.p.A., Roma

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

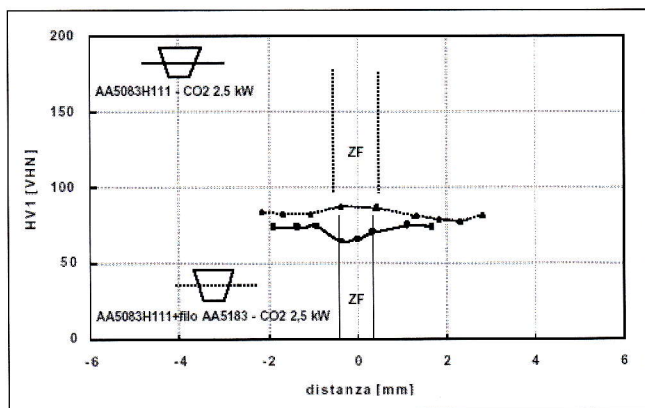


Fig. 4: Profili di durezza su giunti di AA5083.

Fig. 4: Hardness profiles for laser welded joints of AA5083 alloy.

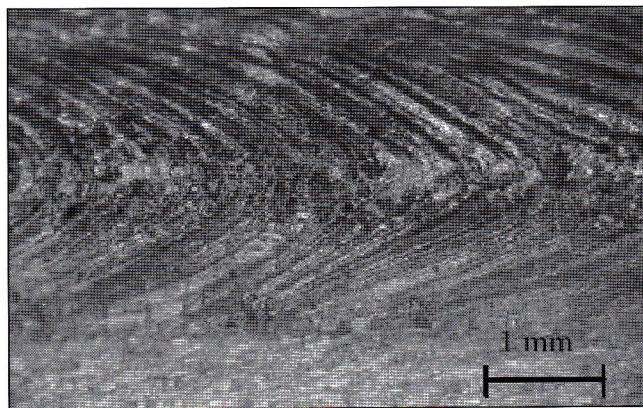


Fig. 5: Aspetto del cordone con filo d'apporto.

Fig. 5: Appearance of the seam welded with filler metal.

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
AA 2024	0,10	0,22	4,8	0,49	1,57	<0,01	0,11	0,03	Resto
AA 6056	0,81	0,082	0,65	0,60	0,76	<0,01	0,13	<0,01	Resto

Tabella 3: Composizione chimica di leghe d'alluminio (% in massa) nel settore aeronautico esaminate.

Table 3: Chemical composition (mass %) of aluminium alloys for aeronautical industry.

Mat.	Tipo giunto	Laser	Pot. (kW)	Vel.sald. (m/min)	I. focale (mm)	Angolo Testa	Pos. Fuoco	Gas/port. (l/min)	Angolo add. gas	Filo	Vel. Filo (m/min)
AA2024	(c)	CO <sub>2</sub> slab	2,5	1,2	100	15°	Sup.	He/30	45°	-	-
	(c)	Nd:YAG	4,4	1,2	120	15°	Sup.	Ar/15	coassiale	-	-
	(c)	Nd:YAG (*)	4,4	1,5	120	15°	Sup.	Ar/15	coassiale	-	-
AA6056	(c)	CO <sub>2</sub> slab	2,5	4,2	100	0°	Sup.	He/30	45°	-	-
	(c)	Nd:YAG (**)	4,4	7,2	120	15°	Sup.	Ar/30	coassiale	-	-
	(c)	Nd:YAG (*)	4,4	3,6	120	15°	Sup.	Ar/15	coassiale	-	-
	(b)	CO <sub>2</sub> slab	2,5	1,8	100	15°	Sup.	He/30	45°	-	-
	(b)	CO <sub>2</sub> slab	2,5	1,2	100	15°	Sup.	N <sub>2</sub> /35	45°	-	-
	(a)	CO <sub>2</sub> slab	2,5	4,0	200	30°	Sup.	He/30	-	AA4047	3,2

a) a T, b) a sovrapposizione, c) a lembi retti;      \*) twin spot (0,6 mm), \*\*) twin spot (0,24 mm)

Tabella 4: Parametri di saldatura utilizzati per i materiali AA 2024 e AA 6056.

Table 4: Welding parameters for AA 2024 and AA 6056 alloys.

zione trasversale dei giunti realizzati con e senza filo d'apporto. In questo caso è evidente che l'utilizzo del materiale d'apporto è riuscito a far recuperare la perdita di durezza associabile principalmente alla perdita di leganti (Mg) per evaporazione in ZF. L'impiego del materiale d'apporto ha anche comportato un miglioramento, nella parte superiore, dell'aspetto del cordone di saldatura (vedi Fig. 5).

SETTORE AERONAUTICO

Come materiali di particolare interesse nel settore aeronautico, sono state esaminate due leghe da bonifica: AA2024 stato fisico T3, spessore 4 mm e AA6056 stato fisico T4, spessore 2,5 mm, le cui composizioni chimiche sono riportate nella Tabella 3.

La lega AA2024 è una lega del tipo alluminio-rame-magnesio ampiamente utilizzata nel settore aeronautico per la realizzazione della fusoliera e di parti dell'ala. Il suo impiego prevede attualmente l'utilizzo delle tecnologie di rivettatura e/o incollaggio.

Generalmente è considerata una lega di difficile saldabilità

poiché caratterizzata da problemi di criccabilità a caldo (dovuta alle percentuali nominali di Cu (4%) e Mg (1,5%)).

E' utilizzata nello stato fisico T3 (solubilizzato, temprato, incrudito ed invecchiato naturalmente). Per questa lega è stata considerata un'unica tipologia di giunto, cioè quella a lembi retti.

La lega d'alluminio AA6056 è una lega del tipo alluminio-magnesio-silicio rivolta al settore aeronautico.

La lega è stata sviluppata per fornire un'alternativa alla lega AA2024 assicurando resistenza meccanica ed alla corrosione comparabili a quelle della lega AA2024, ma migliorandone la saldabilità.

E' saldata nello stato fisico T4 (solubilizzato, temprato ed invecchiato naturalmente).

In questo caso sono state considerate tre differenti tipologie di giunto: giunti a T (Fig. 6-a), rappresentativi dell'accoppiamento fusoliera/rinforzo longitudinale (corrente); giunti a sovrapposizione (Fig. 6-b), rappresentativi dell'accoppiamento fusoliera/rinforzo trasversale; giunti testa a testa (Fig. 6-c).

Nella Tabella 4 sono riportati i parametri di saldatura utilizzati per la fabbricazione dei giunti.

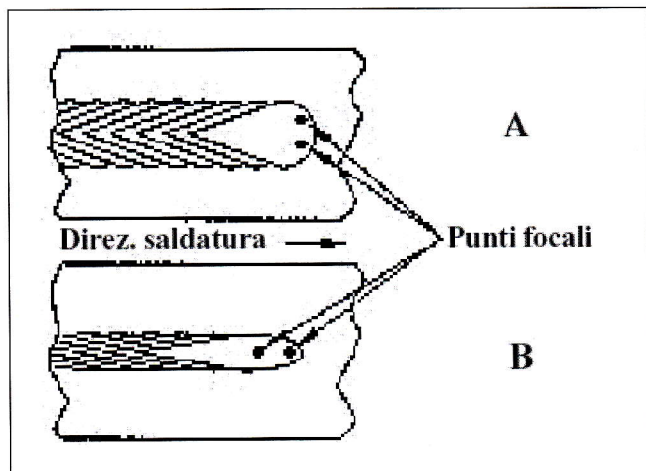


Fig. 1: Schema funzionamento twin spot.

Fig. 1: Principle of laser beam twin spot.

un'alta densità di energia sul pezzo<sup>(1)</sup>. Tale circostanza rende questa sorgente particolarmente adatta alla saldatura di materiali molto riflettenti, alla lunghezza d'onda di emissione del fascio laser CO<sub>2</sub> ( $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ ), quali appunto l'alluminio e le sue leghe [5]. La focalizzazione del fascio è ottenuta mediante specchio parabolico avente lunghezza focale di 100 mm o 200 mm.

Una sorgente laser a Nd:YAG pompata a diodi con potenza massima di 4400 W ed accoppiata, tramite fibra ottica con diametro di 400  $\mu\text{m}$ , con un robot antropomorfo (6 assi). La possibilità, grazie all'incrementata focalizzazione (BP = 12 mm x mrad) del fascio dovuta al pompaggio mediante laser a diodi, di trasmettere il fascio laser in fibre con diametro di 400  $\mu\text{m}$ , permette di ottenere le alte densità d'energia necessarie per la saldatura di materiali riflettenti come l'alluminio. La focalizzazione del fascio è ottenuta, dopo ricollimazione mediante lente con focale di 200 mm, con una lente avente lunghezza focale di 120 mm.

È stato anche investigato, con la sorgente a Nd:YAG, l'utilizzo di un dispositivo ottico (prisma) che permette di focalizzare il fascio laser in due punti distinti (twin spot) lungo la direzione di saldatura o trasversalmente ad essa (vedi Fig. 1). Tale tecnica, di recente sviluppo [11], dovrebbe migliorare la stabilità del bagno e ridurre il livello di porosità nel fuso. Le prove sono state effettuate scegliendo la geometria B di Fig. 1, suddividendo la potenza del fascio al 50% sui due punti di focalizzazione distanti 0,24 o, alternativamente, 0,6 mm.

Di seguito sono riportati, suddivisi per i due settori industriali considerati, navale ed aeronautico, i risultati ottenuti per le diverse leghe d'alluminio esaminate.

#### SETTORE NAVALE

Sono state esaminate due leghe d'alluminio tra quelle di maggior utilizzo nei cantieri navali: AA6082 stato fisico T6 e AA5083 stato fisico H111, entrambe con spessore di 3 mm, le cui composizioni chimiche sono riportate in Tabella 1.

La lega AA6082 è una lega da bonifica del tipo alluminio-magnesio-silicio utilizzata principalmente sotto forma di estrusi per rinforzi interni della nave. Il suo impiego per la costruzione di traghetti veloci prevede attualmente l'utilizzo della tecnologia di saldatura ad arco MIG. Generalmente è utilizzata nei cantieri navali nello stato fisico T6 (solubiliz-

zato, temprato ed invecchiato artificialmente). La lega d'alluminio AA5083 è una lega da incrudimento del tipo alluminio-magnesio generalmente utilizzata sotto forma di prodotti piani e saldata attualmente in cantiere mediante tecnologia MIG. Nei cantieri navali è utilizzata negli stati fisici di incrudimento H321 o H111.

La tipologia di giunto considerata è stata quella a lembi retti in quanto tale accoppiamento dei lembi è stato considerato rappresentativo, per la definizione dei parametri di saldatura, anche dell'accoppiamento tra estrusi di uguale spessore. Alcuni giunti sono stati realizzati con materiale d'apporto utilizzando per la lega AA6082 il filo AA4047 (Al12Si) con  $\phi=1\text{mm}$  e per la lega AA5083 il filo AA5183 (Al5Mg) con  $\phi=1,2\text{mm}$ .

Nella Tabella 2 sono riportati i parametri di saldatura che hanno permesso di ottenere la piena penetrazione dello spessore in esame e buone geometrie dei cordoni di saldatura.

#### RISULTATI

##### AA 6082

Il controllo radiografico dei giunti prodotti ha evidenziato l'assenza di cricche e una distribuzione delle porosità accettabile con pori isolati e di piccole dimensioni, circa  $0,2 \div 0,3 \text{ mm}$  con la sorgente a CO<sub>2</sub> e circa  $0,1 \div 0,2 \text{ mm}$  con la sorgente a Nd:YAG.

I cordoni di saldatura autogeni risultano caratterizzati da una zona fusa (ZF) estremamente ridotta (vedi Fig. 2), larga circa  $1,5 \div 2,5 \text{ mm}$ , in funzione dell'apporto termico e della sorgente utilizzata, e da una ancor più limitata zona termicamente alterata (ZTA), larga circa  $0,3 \div 0,5 \text{ mm}$ .

Nella Fig. 3 sono riportati i profili di durezza (HV1) rilevati sui giunti saldati nelle diverse condizioni. Risulta evidente la diminuzione di durezza (circa 30%) in ZF rispetto al materiale base (condizione di undermatching). Tale circostanza è dovuta al fatto che nella parte di materiale fuso durante il processo di saldatura, viene perso l'effetto dei trattamenti termici a cui era stato precedentemente sottoposto il materiale (solubilizzazione, tempra e invecchiamento artificiale) per aumentare le proprietà di resistenza e durezza. I profili evidenziano inoltre che il materiale d'apporto utilizzato non è risultato sufficiente a ridurre il problema dell'undermatching.

Successivamente, relativamente alla sorgente a CO<sub>2</sub>, si è cercato di stabilire la possibilità di impiegare altre miscele gassose a protezione del bagno. Mantenendo inalterata la portata totale del gas di protezione, è stato aggiunto al gas He dell'Ar con proporzioni dal 20% al 40%. Ciò ha prodotto una lieve diminuzione (circa 10%) della massima velocità con cui si ottiene la piena penetrazione, mentre il livello di difettosità (porosità) in ZF è rimasto sostanzialmente uguale, cioè accettabile.

La leggera diminuzione della velocità massima ottenibile è spiegabile con il fatto che l'Ar, avendo un potenziale di ionizzazione più basso dell'He (15,68 eV contro 24,46 eV), forma un plasma che, assorbendo parte dell'energia del fascio laser, diminuisce la penetrazione in funzione anche della velocità di saldatura utilizzata e della potenza impiegata [4].

A causa della differente lunghezza d'onda caratteristica della sorgente a Nd:YAG ( $1,06 \mu\text{m}$  contro  $10,6 \mu\text{m}$  del CO<sub>2</sub>), il fascio laser non risente, a differenza del caso del laser a CO<sub>2</sub>, dell'assorbimento da parte del plasma. Ciò permette, nel caso si utilizzi il laser a Nd:YAG, l'impiego, in prima istanza, del più economico gas Ar al posto dell'He.

Con ambedue le sorgenti laser, CO<sub>2</sub> e Nd:YAG, sono state effettuate prove con l'azoto al cui utilizzo è attribuita la possibilità di migliorare la stabilità del bagno fuso durante il processo di saldatura e ridurre il livello di porosità [9]. Nelle

(1) In letteratura [5] sono riportati, relativamente alla densità di potenza atta ad innescare il processo di saldatura per keyhole, i seguenti valori di soglia:  $1,2 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$  per i laser a CO<sub>2</sub> e  $7,5 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$  per i laser Nd:YAG

Materiale	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
AA 6082	0,78	0,34	0,084	0,57	0,72	0,021	0,040	0,066	Resto
AA 5083	0,14	0,25	0,016	0,49	4,40	0,060	<0,010	0,020	Resto

Tabella 1: Composizione chimica di leghe d'alluminio (% in massa) nel settore navale esaminate.

Table 1: Chemical composition (mass %) of aluminium alloys for shipbuilding.

Mat.	Laser	Pot. (kW)	Vel.sald. (m/min)	l. focale (mm)	Angolo Testa	Pos. Fuoco	Gas/port. (l/min)	Angolo add. gas	Filo	Vel. Filo (m/min)
AA6082	CO <sub>2</sub> slab	2,5	3,0	100	15°	Sup.	He/20	45°	-	-
	CO <sub>2</sub> slab	2,5	2,4	200	15°	Sup.	He/20	45°	AA4047	1,2
	Nd:YAG	4,4	1,8	120	15°	Sup.	Ar/13	coassiale	-	-
	Nd:YAG	4,4	4,8	120	15°	Sup.	Ar/13	coassiale	-	-
	Nd:YAG(*)	4,4	2,4	120	15°	Sup.	Ar/15	coassiale	-	-
AA5083	CO <sub>2</sub> slab	2,5	4,2	100	15°	Sup.	He/30	45°	-	-
	CO <sub>2</sub> slab	2,5	4,2	200	15°	+ 1mm	He/30	45°	AA5183	1,5

\*) twin spot (0.6 mm)

Tabella 2: Parametri di saldatura utilizzati per i materiali AA 6082 e AA 5083.

Table 2: Welding parameters for AA6082 and AA5083 alloys.

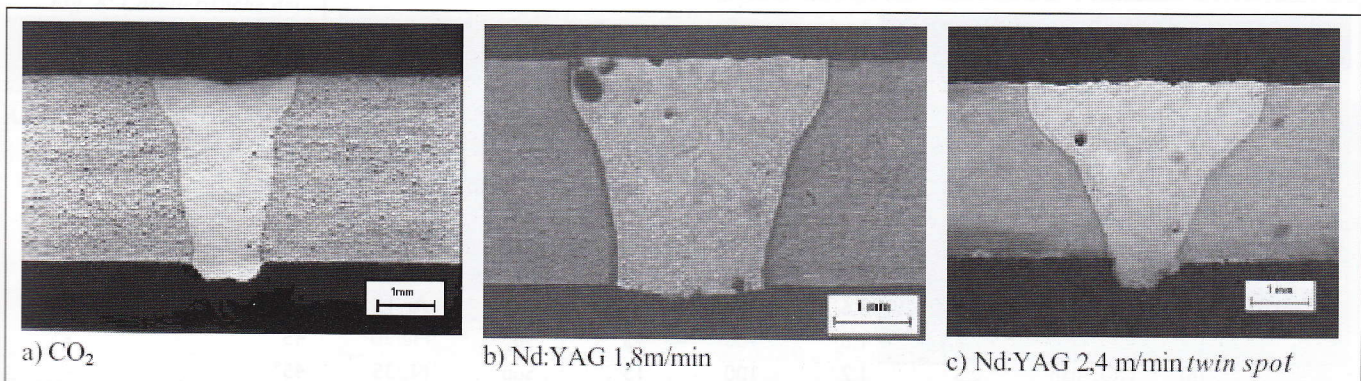


Fig. 2: Sezione trasversale dei giunti autogeni di AA6082

Fig. 2: Transverse section of autogenous joints in AA6082 alloy.

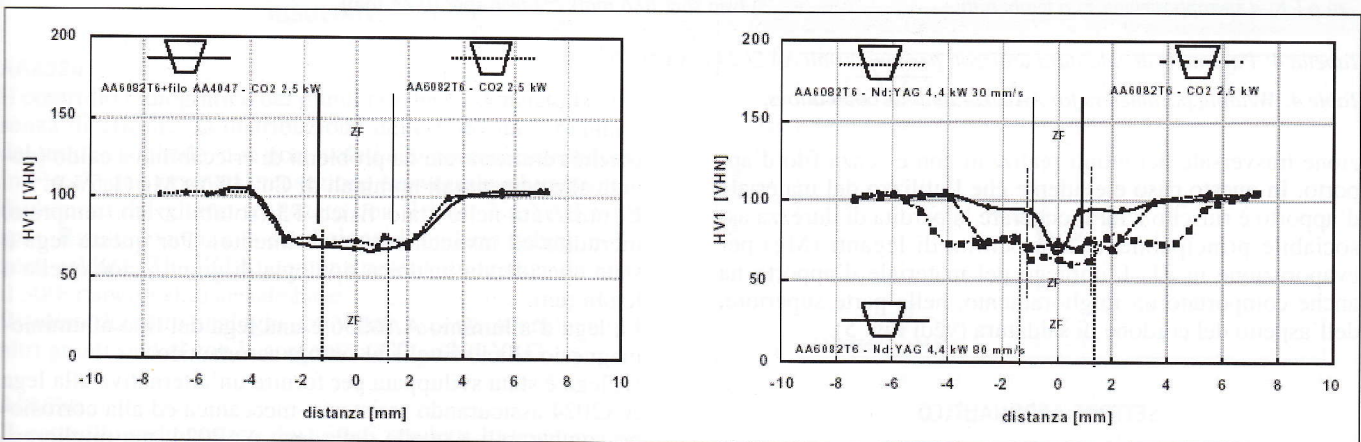


Fig. 3: Profili di durezza relativi ai giunti di AA6082 saldati laser.

Fig. 3: Hardness profiles for laser welded joints of AA6082 alloy.

prove condotte, l'utilizzo di questo gas, con portate uguali a quelle usate in precedenza per l'He e He/Ar, non ha comportato miglioramenti sensibili in termini di porosità.

**AA 5083**

Gli esami radiografici effettuati sui giunti non hanno evidenziato, anche in questo caso, la presenza di gravi difettosità. Nelle condizioni esaminate, relativamente all'uso della

sorgente a CO<sub>2</sub>, è risultato possibile utilizzare una velocità di saldatura sensibilmente superiore (circa 30%) rispetto a quella possibile per la lega AA6082. Tale circostanza, vale a dire l'impiego di maggiori velocità di saldatura per le leghe 5xxx rispetto a quelle ottenibili per le leghe 6xxx, peraltro riscontrata in altri lavori, è probabilmente associabile al diverso contenuto in Mg delle due leghe.

In Fig. 4 sono riportati i profili di durezza rilevati sulla se-

Fig. 6: Tipologie di giunti realizzati.

Fig. 6: Types of welded joints.

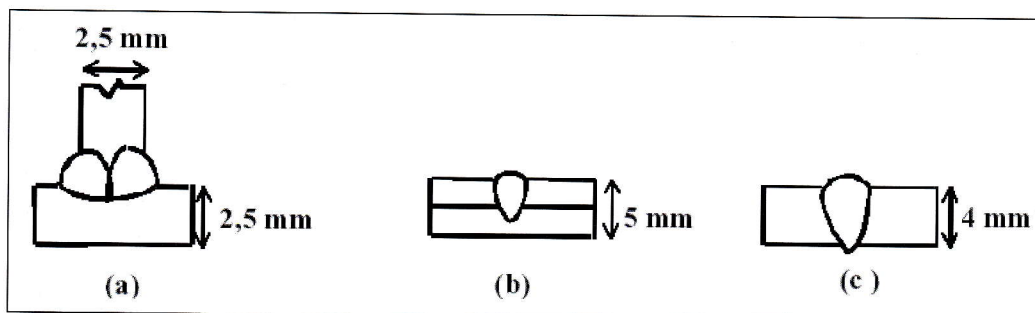


Fig. 7: Caratteristiche del giunto AA2024 saldato con laser Nd:YAG twin spot.

Fig. 7: Characteristics of the AA2024 joint welded with twin spot Nd:YAG laser.

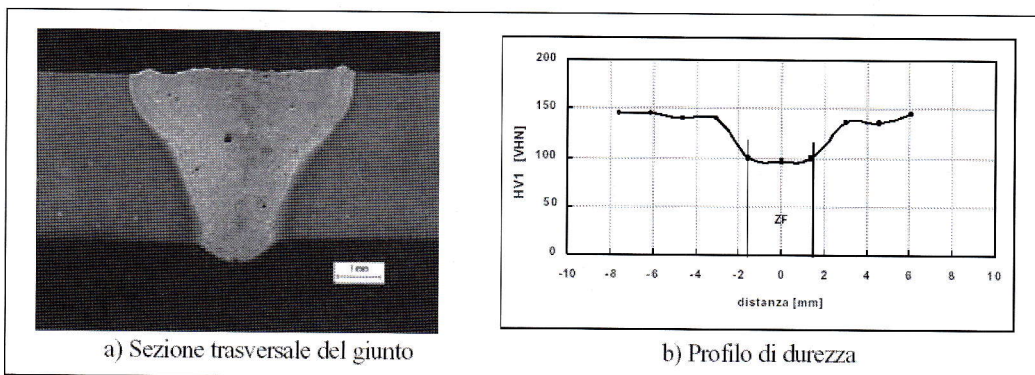
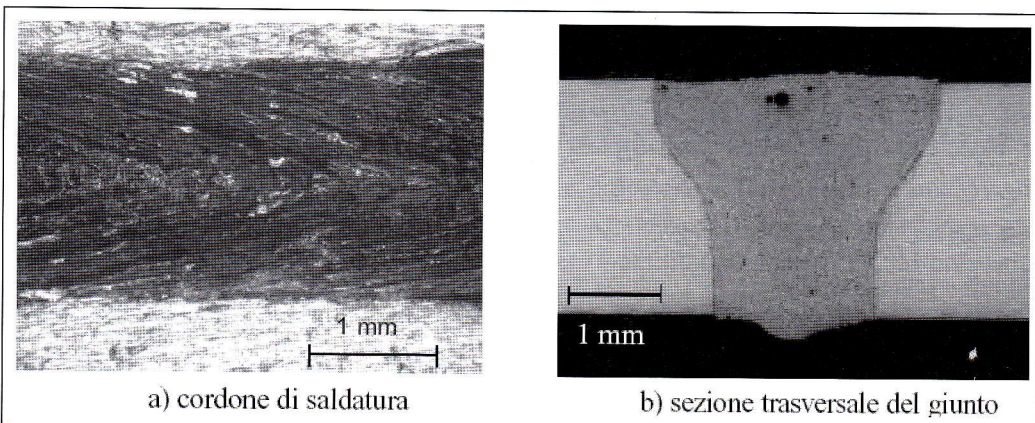


Fig. 8: Caratteristiche dei giunti AA6056 saldati con laser Nd:YAG Twin Spot.

Fig. 8: Characteristics of the AA6056 joint welded with twin spot Nd:YAG laser.



RISULTATI

AA2024

Il controllo radiografico dei giunti non ha evidenziato la presenza di cricche, la distribuzione delle porosità è risultata del tutto accettabile, con pori isolati e di piccole dimensioni. In Fig. 7 sono riportati una sezione trasversale ed un profilo di durezza del giunto realizzato con il laser Nd:YAG twin spot. Risulta evidente la condizione di undermatching nella zona saldata (ZF e ZTA) con una perdita di durezza di circa il 30% rispetto al materiale base.

Risultati del tutto analoghi sono stati riscontrati anche sugli altri giunti saldati con la sorgente a CO<sub>2</sub> e Nd:YAG.

AA6056

Il controllo radiografico dei giunti prodotti ha evidenziato l'assenza di cricche ed un livello ridotto di porosità con pori isolati e di piccole dimensioni in tutte le tipologie di lembi realizzate.

Giunti a lembi retti

In Fig. 8 sono visibili l'aspetto superficiale del cordone e la sezione trasversale dei giunti saldati con laser Nd:YAG twin spot, utilizzando un prisma con la distanza focale pari a 0,24 mm, caso (a), ed un prisma con distanza pari a 0,6 mm, caso (b). I cordoni ottenuti, di dimensioni diverse in funzione delle diverse velocità di saldatura utilizzate, pur senza l'utilizzo

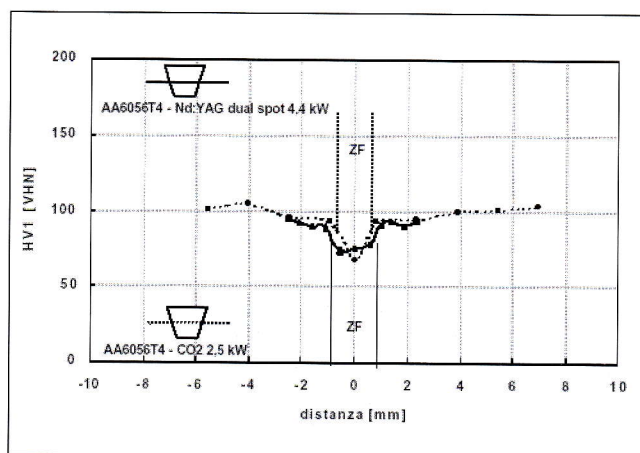


Fig. 9: Profili di durezza dei giunti a lembi retti.

Fig. 9: Hardness profiles of butt joints.

di materiale d'apporto appaiono caratterizzati da una maglia regolare ed una buona geometria.

In Fig. 9 sono riportati i profili di durezza rilevati nei giunti prodotti con laser CO<sub>2</sub> e Nd:YAG twin spot (0,24 mm). Appare evidente la condizione di undermatching nella zona saldata del tutto equivalente a quanto precedentemente riscontrato per la lega AA6082, anch'essa da bonifica.

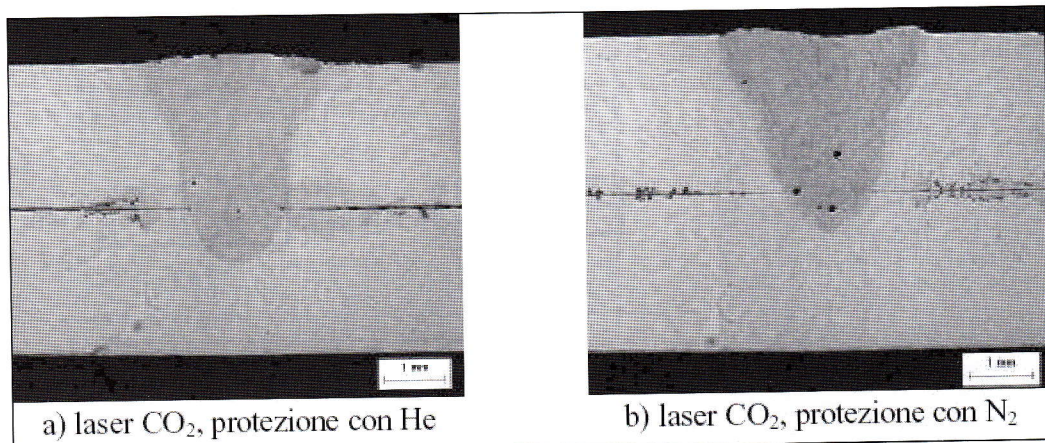


Fig. 10: Sezione trasversale dei giunti a sovrapposizione lega AA6056.  
Fig. 10: Transverse section of lap joints in AA6056 alloy.

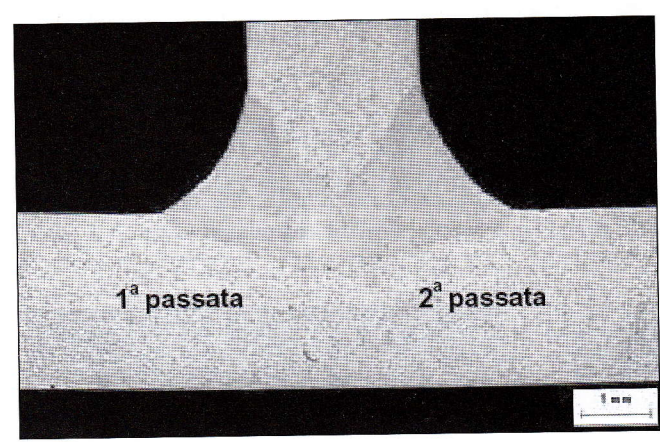


Fig. 11: Sezione del giunto a T lega AA6056.  
Fig. 11: T-joint section in AA6056 alloy.

**Giunti a sovrapposizione**

Questa tipologia di giunto può ritenersi rappresentativa nel settore aeronautico di un possibile modo di collegare la fusoliera con i rinforzi trasversali. In questo caso è interessante la possibilità di realizzare un giunto saldato, tra rinforzo e guscio della fusoliera, che non deformi all'esterno quest'ultima.

Alcuni esempi dei giunti ottenuti sono riportati in Fig. 10. Come è evidente dalle micrografie riportate, nella saldatura a trasparenza (giunto a sovrapposizione), è più facile ottenere giunti saldati che non presentino insellamento del cordone, questo anche senza l'utilizzo del materiale d'apporto. Inoltre in questo caso la tecnica laser permette un ottimo controllo della profondità di penetrazione, il che rappresenta una circostanza estremamente importante quando si voglia

saldare evitando la deformazione della parte inferiore del giunto.

Anche per queste leghe sono state effettuate prove di saldatura utilizzando differenti gas protettivi, in particolare N<sub>2</sub>, per valutare la possibilità di ridurre le porosità nel giunto. Nelle condizioni esaminate comunque non sono state osservate evidenti variazioni sul livello di porosità. Con l'uso dell'azoto è emersa tuttavia, la presenza in zona fusa di precipitati filiformi che, ulteriori indagini effettuate al microscopio elettronico a scansione (SEM), mediante analisi EDS, hanno permesso di identificare come nitruri di alluminio. La loro presenza può pertanto influenzare negativamente le proprietà meccaniche del giunto saldato.

Per quanto riguarda la durezza dei giunti, è stata riscontrata, analogamente a quanto osservato per i giunti a lembi retti, una condizione di undermatching con valori del tutto simili a quelli di Fig. 9.

**Giunti a T**

Considerando la tipologia di giunto a T, al fine di ridurre le possibili difettosità nel giunto, cricche e porosità, ed ottenere un profilo del cordone meglio raccordato, che migliorasse quindi anche il comportamento a fatica del giunto, è stato utilizzato del materiale d'apporto. Il filo scelto è stata la lega AA4047 con diametro pari a 1,0 mm, che grazie all'alto contenuto di Si, dovrebbe limitare la tendenza alla criccabilità nella ZF.

Sono state ottenute geometrie del cordone ben raccordate ed esenti da cricche come mostrato ad esempio in Fig. 11. Al fine di verificare l'uniformità della distribuzione degli elementi di lega aggiunti con il materiale d'apporto, sono state effettuate, su alcuni campioni, delle analisi mediante sonda elettronica (EPMA - Electron Probe MicroAnalyser). In Fig. 12 sono riportate le mappature qualitative ottenute per il Si e il Mg.

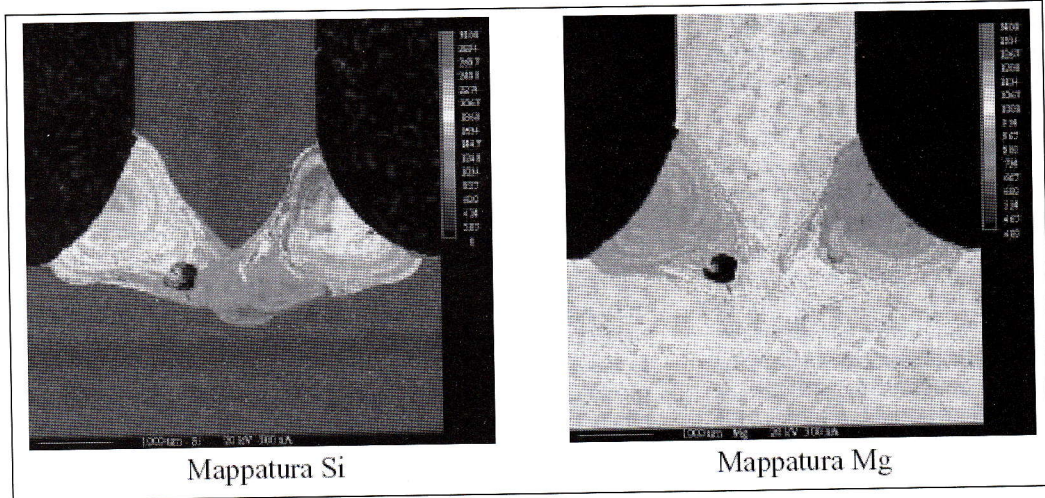


Fig. 12: Mappature del Si e Mg mediante EPMA (nella sezione analizzata è presente un poro isolato).  
Fig. 12: Si and Mg maps by EPMA (an isolated pore is visible in the analysed section).

Le mappature evidenziano una distribuzione degli elementi in ZF molto disomogenea in modo particolare nella 2<sup>a</sup> passata. Per il Si si ha infatti una zona molto ricca sul corrente (valutata con l'analisi quantitativa intorno al 5%) ed una zona molto povera alla radice del giunto (intorno all'1.5 %). Per quanto riguarda il Mg invece si assiste ad un impoverimento generalizzato nei due giunti, impoverimento che è una delle cause del degrado delle proprietà meccaniche del giunto stesso [12].

### CONCLUSIONI

La tecnologia di saldatura laser è stata applicata alla fabbricazione di giunti saldati con le leghe d'alluminio di maggior utilizzo nell'industria navale (AA5083 e AA6082) ed aeronautica (AA6056 e AA2024). In particolare sono state analizzate le principali problematiche inerenti al processo di saldatura: criccabilità, formazione di porosità e degradamento delle proprietà meccaniche nella zona fusa. Al fine di limitare la formazione di difettosità nella zona fusa, sono stati analizzati: l'utilizzo di un adatto materiale d'apporto, l'ottimizzazione del gas protettivo e l'impiego, al fine di migliorare la stabilità del bagno, di un dispositivo ottico di suddivisione del fascio laser (twin spot).

Le attività svolte hanno evidenziato quanto segue.

- Sebbene sia necessario, al fine di ottenere giunti con livelli di difettosità accettabili, porre particolare attenzione nella preparazione dei lembi prima del processo di saldatura, giunti sani possono essere prodotti con buoni livelli di produttività anche senza l'utilizzo di materiale d'apporto e con alte velocità (2 ÷ 5 m/min).
- L'utilizzo del materiale d'apporto, pur lasciando sostanzialmente invariato il livello di porosità del fuso, ha prodotto geometrie del cordone meglio raccordate e maglie più regolari. Ciò comporta una riduzione della velocità di saldatura, la necessità di porre estrema cura nell'allineamento sorgente laser/filo durante l'intero processo di giunzione e nella costanza d'adduzione del materiale d'apporto. Analisi metallurgiche più approfondite hanno permesso infatti di evidenziare che, anche in presenza di una geometria del cordone ben raccordata, sono possibili disomogeneità, all'interno del volume del fuso, nella distribuzione di alcuni elementi di lega adottati mediante l'utilizzo del materiale d'apporto.
- Il decadimento delle proprietà meccaniche nella ZF (condizione di undermatching) riscontrato per le leghe da bonifica (AA2024, AA6082, AA6056), si presenta più limitato in termini di estensione della zona interessata (1÷3 mm) rispetto al caso di utilizzo delle tecniche ad arco. In alcuni casi, leghe da incrudimento (AA5083), la perdita di durezza associabile all'evaporazione di leganti nella ZF, può essere recuperata con l'impiego di un materiale d'apporto che ripristini i livelli precedenti. Per le leghe da bonifica la perdita di resistenza può comunque essere recuperata mediante opportuni trattamenti termici dopo saldatura.

- L'impiego di un dispositivo ottico di suddivisione del fascio laser (twin spot) ha prodotto, a parità di tutti gli altri parametri di processo, sensibili miglioramenti nella qualità dei giunti in termini di livello di porosità. Tale miglioramento è stato più marcato utilizzando il dispositivo con distanza dei punti di focalizzazione maggiore (0,6 mm). Alla luce dei risultati ottenuti con la presente attività sembra ragionevole concludere che a tutt'oggi la tecnologia laser si pone come una alternativa molto promettente alla tecnologia ad arco.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] D. Sampath et al. - Alustar Alloy: A Better Alternative to AA 5083 Alloy in Lightweight Structures - International Conference LIGHTWEIGHT CONSTRUCTION LATEST DEVELOPMENS 24-25 February 2000 London -The Royal Institution of Naval Architects
- [2] L. Manzon -Laser Welding in Shipbuilding Industry: Application Prospects at Fincantieri Euro-pean symposium on assessment of power Beam Welds 4-5 February 1999, GKSS Research Centre Geesthacht Germany
- [3] Shipbuilding laser welding: an integrated system for assurance and control of quality (SHIL-WACQ) BRPR CT97-0478 Brite Euram Project
- [4] M. Fersini, L.M. Volpone "Saldatura laser di leghe d'alluminio serie 5000 e 6000 per costruzioni navali" Rivista Italiana della Saldatura n°1 anno 2001
- [5] D.Schuoocker "Handbook of the Eurolaser Academy" Chapman & Hall 1998
- [6] C.E. Cross et al. "Aluminum Weldability and Hot Tearing Theory" Weldability of Materials ASM International 1990 pp275-282
- [7] ASM Specialty Handbook "Aluminium and Aluminium Alloys"
- [8] M.Kutsuna et al. "Behaviours of Hydrogen and Magnesium in Porosity Formation in CO<sub>2</sub> Laser Welds" CI-SFFEL 6 15-19 June 1998 Tolone FR
- [9] A. Matsunawa et al. "Effect of shielding gas on porosity formation in high power CO<sub>2</sub> laser welding" IIW Commission IV July 1999 Lisbon
- [10] Laser Institute of America "Handbook of Laser Materials Processing" Magnolia Publishing Inc. 2001
- [11] A. Matsunawa et al. "Real Time X-ray Observation of Dual Focus Beam Welding of aluminium Alloys" Section C - ICALEO 2000
- [12] M. Pastor et al. "Pore Formation and Composition Change During Continuous Wave Nd:YAG Laser Welding of Aluminium Alloys 5182 e 5754 - Trends in welding Research ASM 1999

**WELDING OF ALUMINIUM ALLOYS BY CO<sub>2</sub>  
AND Nd:YAG HIGH POWER LASERS**

**KEYWORDS:**

**laser welding, aluminium alloys,  
shipbuilding, aeronautical industry**

Aluminium alloys are currently used successfully in a wide range of mass transportation applications. In particular the high corrosion resistance combined with low density, good weldability and high strength make aluminium alloys interesting materials for structural applications. Moreover, using aluminium alloys designers have the choice among many different engineering solutions in the form of: extruded profile, forging, sheet, plate, casting and recently also lightweight panel.

Fusion welding of aluminium alloys by conventional arc welding processes such as GMAW or GTAW methods is well established and presently generally in use, for instance, in shipyards. On the other side problems concerning lower mechanical properties of conventional welds are sometime a limiting factor in the design.

Considerable efforts have been made by European shipbuilders to introduce laser beam technology in the yards. Fincantieri has already installed a laser welding equipment in Monfalcone yard dedicated to the welding of steel panels and it is now working in developing an integrated system for assurance and control of laser welded quality which will improve the confidence in laser welding process in shipbuilding. The above mentioned works, together with recently performed activities, pointed out that laser welding technology, introduced in shipyards for steel welding, could provide results of the same levels of the high standard characteristic of the technology also when applied to aluminium alloys.

Regarding the aeronautical industry, if the use of aluminium alloys started since the 40's, the opportunity for fabrication cost and weight reduction with the use of fusion welding, instead of riveting and bonding techniques, is presently on examination for the capability of laser technology to produce very low distortions in the welded joints. On this topic it is remarkable the effort that the main European aerospace manufactures are currently supporting, in the project for the fabrication of the new aircraft AIRBUS A3XX, to introduce laser welding technology in the fabrication of aircraft structures (skin/stringer connection) (see also <http://www.tan-goeproject.com>).

The increase of the use of laser technology in structural applications is, on the other side, certainly due to the development of new models of laser sources showing increased beam quality and emission stability, such as CO<sub>2</sub> slab lasers and diode pumped Nd:YAG lasers, new welding procedures and increasing know-how.

Therefore it seems reasonable to expect that, due to these last developments the specific shortcomings related to aluminium alloys welding such as porosity, inconsistent penetration, hot cracking and loss of strengthening could be overcome.

The present work reports the activities carried out by Centro Sviluppo Materiali S.p.A. for industrial customers in the naval and aeronautical sectors, in order to assess the possibility of introducing laser welding technology of aluminium alloys in structural applications.

In particular the present work summarises the activities carried out in order to evaluate the laser weldability of aluminium alloys of series 2xxx, 5xxx and 6xxx using two different types of laser sources: CO<sub>2</sub> and Nd:YAG. Selected alloys are the dominating structural alloys in shipbuilding and aeronautical industry: AA5083, AA6082, AA6056 and AA2024.

The main problems occurring when welding aluminium alloys such as: porosity, inconsistent penetration, solidification cracking and loss of strengthening in the welded zone have been analysed.

In order to increase the quality of the welded joint it has been considered the use of a suitable filler metal shielding gas optimisation were particularly investigated to overcome the porosity formation. Moreover, also the use of an optical equipment for the transverse separation of the beam spot (twin spot), able to increase weld pool stability, has been considered.

Sound joints can be produced with proper precautions, i.e. accurate bevel preparation, also with high productivity (autogenous welding with welding speed in the range of 2 ÷ 5 m/min have been achieved).

The use of filler metal, although it does not change the porosity level of the welded joints, produces a better geometry and appearance of the weld bead. However use of filler wire requires a reduction of the welding speed, an accurate alignment of laser beam and wire during the whole welding process, a steady filler addition during the process. Moreover, deeper metallurgical analyses have been pointed out that, also obtaining good weld bead geometry, nonhomogeneity in the distribution of alloying elements, adducted by filler wire, occurred in the fused zone.

The degradation of the mechanical properties of the fused zone (undermatching condition) of heat-treatable alloys (AA2024, AA6082, AA6056) has been found lower, in terms of the width of the interested zone (1 ÷ 3 mm), in comparison with the case of the use of arc welding technologies. However, the degradation of the mechanical properties of the fused zone of heat-treatable alloys can be reduced by suitable postweld heat treatments (such as postweld solution quenching and ageing or postweld ageing only). Regarding non-heat-treatable alloys (AA5083), in some cases, the hardness decreasing related to the evaporation of alloying elements from the fused zone, can be recovered through the use of a suitable filler wire.

The use of an optical equipment for the transverse separation of the beam spot (twin spot) produced an increase of the quality of the joints in terms of reduced porosity level in the welded zone. This increased quality level has been found using a distance between the beam spots of 0.6 mm.

The obtained results have been pointed out laser welding as a suitable technology for joining aluminium alloys and as an alternative to the industrial use of arc welding technologies in the naval and aeronautical industry.