

# COMBINAZIONE DEI PROCESSI FASCIO LASER-ARCO ELETTRICO NELLA SALDATURA DI LAMIERE PLACCATE

S. Missori, A. Sili

*Nel presente lavoro vengono riportati i risultati di prove di saldatura con utilizzo di un processo combinato arco-elettrico+laser con tecnica a singola passata con l'utilizzo di un solo materiale di apporto. Tra le varie possibilità di accoppiamento arco elettrico-fascio laser, il procedimento qui descritto prevede la combinazione in serie dei due processi. Il materiale di prova è acciaio al carbonio placcato con acciaio inossidabile austenitico. Le prove sono state condotte con tecnica a passata unica e impiego di un solo materiale di apporto in forma di filo continuo. Sulla base dei risultati dei vari esami e prove (metallografia, microanalisi al SEM, prove di microdurezza e di trazione) è stata effettuata una valutazione della qualità dei giunti, con l'obiettivo di ricercare i parametri di saldatura adatti a realizzare una zona fusa esente da difetti e di composizione chimica accettabile.*

**PAROLE CHIAVE:** acciai placcati, acciai inossidabili austenitici, processi di saldatura combinati, fascio laser, arco elettrico

## INTRODUZIONE

### Processo di saldatura

I vantaggi del processo di saldatura a fascio laser sono legati all'alta densità di energia, che consente di ottenere elevate profondità di penetrazione con zone fuse molto strette (elevato rapporto profondità/larghezza della zona fusa) e con velocità di saldatura relativamente alte. Il processo di saldatura ad arco elettrico presenta invece una densità di energia molto più bassa e velocità di saldatura inferiori, con limitata profondità di penetrazione. In compenso la zona fusa più larga aumenta la tolleranza delle imperfezioni geometriche o dei difetti di allineamento del fascio laser. Il processo ad arco elettrico offre inoltre rendimenti energetici molto più elevati (70-90%) con bassi costi di investimento. L'utilizzo simultaneo di entrambi le sorgenti termiche può migliorare le prestazioni e abbinare i vantaggi dell'uno e dell'altro processo di saldatura.

In linea di principio l'accoppiamento del fascio laser con l'arco elettrico può essere di tipo combinato in *serie* oppure *ibrido* [1-2-3].

La combinazione avviene facendo agire i due processi separatamente in termini di tempo e di zona senza interazione diretta fra loro (Fig. 1a). Tale combinazione offre comunque la possibilità di fruire di alcuni vantaggi. La quantità di materiale di apporto, l'apporto termico totale nel giunto e i tempi di saldatura possono essere ridotti grazie alla minore sezione trasversale della zona saldata.

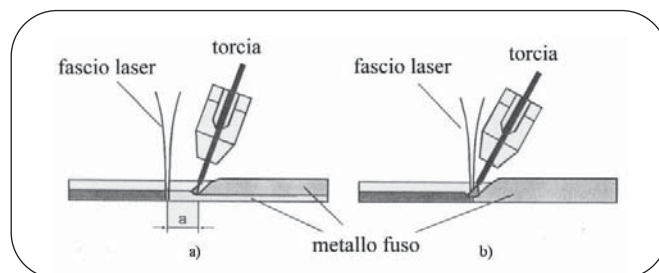


Fig. 1

**Schema di processi di saldatura con impiego simultaneo di laser ed arco elettrico: a) processo combinato; b) procedimento ibrido.**

*Scheme of welding process with simultaneous utilization of laser beam and electric arc: a) combined process; b) hybrid process.*

Inoltre la buona qualità della saldatura al rovescio ottenibile con il fascio laser consente di saldare solo da un lato anche con elevati spessori, senza sostegno al rovescio. Il passaggio dell'arco elettrico successivo al fascio laser ha l'effetto di ridurre le velocità di raffreddamento e di applicare un post-riscaldamento con possibile rinvenimento delle strutture generalmente più dure generate nella zona termicamente alterata (ZTA) dal fascio laser stesso.

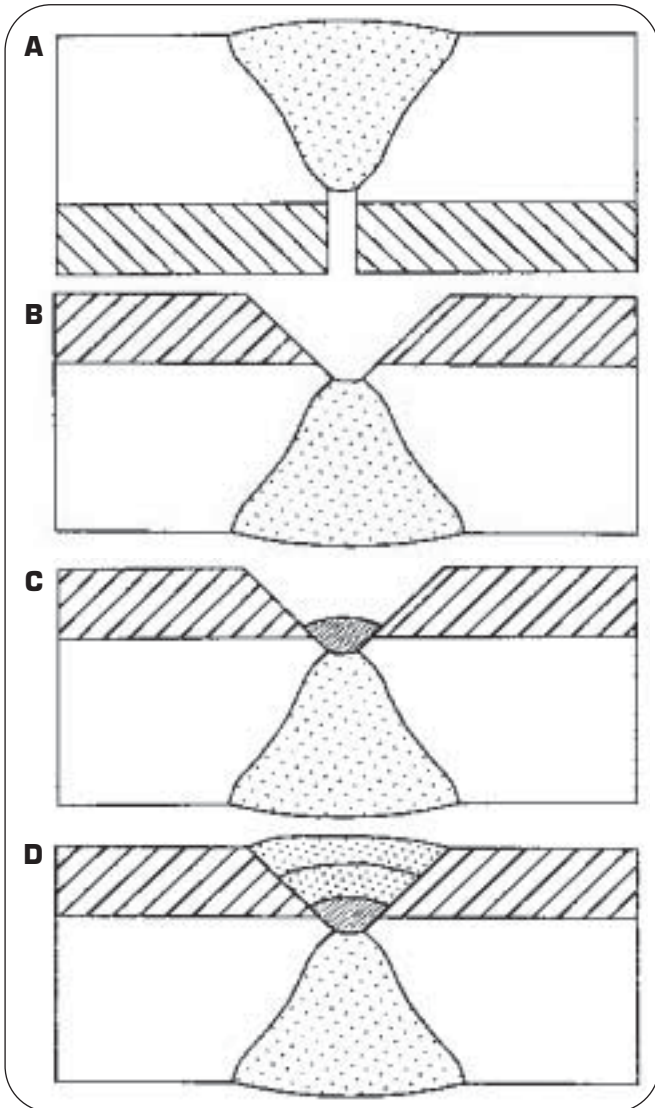
L'accoppiamento ibrido del fascio laser con l'arco avviene come indicato nello schema di Fig.1b. In tal caso il fascio laser e l'arco elettrico interagiscono simultaneamente nella stessa zona di materiale e contribuiscono entrambi alla formazione di un'unica zona fusa. Il processo si definisce ibrido e consente la profonda penetrazione, mentre la presenza del foro di penetrazione laser esercita un'azione positiva sull'arco elettrico, favorendone l'innesco e la stabilità. Ne deriva una maggiore produttività e una diminuzione dell'ap-

Severino Missori

Dipartimento di Ingegneria Meccanica  
Università di Roma Tor Vergata

Andrea Sili

Dipartimento di Chimica Industriale e Ingegneria dei Materiali  
Università di Messina



▲  
Fig. 2

**Sequenza di saldatura con procedimento tradizionale delle lamiere di acciaio placcate:** a) Saldatura del solo acciaio (materiale base) con materiale di apporto simile; b) Molatura per la preparazione della ripresa al rovescio; c) Esecuzione di una prima passata con materiale alto-legato; d) Completamento della saldatura della placcatura con materiale di apporto simile.  
Welding sequence of clad steel plates with conventional procedure: a) Welding of the structural steel (base material) with similar filler metal; b) Back-gouging to the sound metal for back welding; c) Welding of clad material with deposition of a buffer layer by using a high alloy-filler metal; d) Welding is completed with cladding-like filler metal.

porto termico specifico necessario per eseguire la saldatura, con conseguente riduzione dell'ampiezza della ZTA e delle possibili distorsioni e tensioni residue di saldatura. Come il processo combinato, anche il processo ibrido risulta meno sensibile alle imperfezioni geometriche dei lembi da saldare rispetto al processo utilizzante solo il fascio laser.

### Materiali placcati

Le lamiere in acciaio al carbonio e basso-legato, destinate alla costruzione di recipienti e apparecchiature, possono essere rivestite con placcatura in materiale legato al fine di realizzare in modo

economico un materiale che combina un'elevata resistenza meccanica ad una buona resistenza alla corrosione. La fabbricazione di lamiere placcate mediante laminazione a caldo consente di realizzare un solido legame all'interfaccia dei due materiali mediante saldatura allo stato solido a temperatura elevata. Si ottengono considerevoli riduzioni di peso e notevoli risparmi nei costi di produzione delle apparecchiature, in confronto all'utilizzo di lamiere costruite integralmente con materiale alto-legato.

Nella tecnica tradizionale all'arco elettrico comunemente adottata [4-5], la saldatura procede secondo le seguenti fasi (Fig.2):

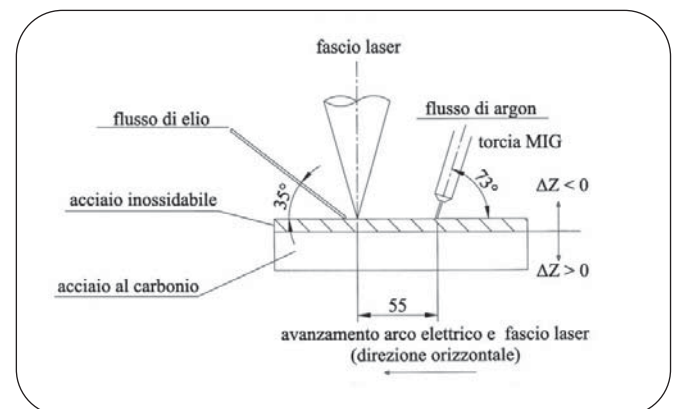
- il materiale base viene saldato con l'impiego di materiale affine al materiale base stesso;
- il materiale depositato viene molato al rovescio;
- il materiale placcato viene saldato con la deposizione di uno strato intermedio (*buffer layer*), utilizzando un materiale di apporto più alto-legato del materiale di placcatura, in modo da tollerare una certa diluizione con il materiale base;
- la saldatura viene completata impiegando un materiale di apporto simile al materiale di placcatura.

Il procedimento descritto risulta piuttosto complesso e richiede in generale l'impiego di tre diversi metalli di apporto e di numerose passate di saldatura.

Nel presente lavoro sono esaminati i risultati delle prove di saldatura eseguite con la combinazione in serie arco elettrico+fascio laser con tecnica a passata singola.

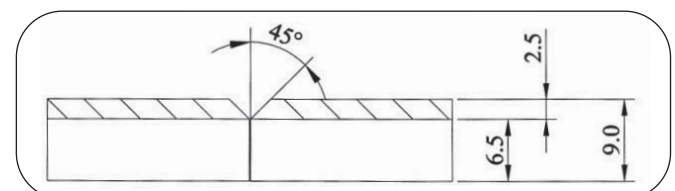
### METALLO DI APPORTO E ZONA FUSA.

La difficoltà di saldare un materiale placcato in una singola passata con impiego di un unico materiale di apporto è data dal fatto che la



▲  
Fig. 3a

**Procedimento di saldatura con combinazione arco elettrico+ fascio laser - lamiera nel piano orizzontale.**  
Combination of laser beam and electric arc process - plate on horizontal plane.



▲  
Fig. 3b

**Preparazione dei lembi.**  
Edges preparation.

zona fusa deriva dalla fusione del metallo di apporto e di una porzione sia dell'acciaio al carbonio che dell'acciaio inossidabile di placcatura. Il materiale fuso deve avere una composizione tale da non originare strutture fragili o cricche, malgrado l'inevitabile diluizione con l'acciaio al carbonio. Inoltre la composizione dovrebbe essere prossima a quella del materiale di placcatura, in modo da assicurare una buona resistenza alla corrosione del giunto saldato.

I materiali di apporto impiegabili sono:

- acciai inossidabili austenitici con contenuto di Cr e Ni un pò più elevato rispetto al materiale di placcatura, in modo da realizzare una zona fusa di composizione simile al materiale di placcatura, esente da martensite (per ridurre i rischi di cricche a freddo) e contenente una piccola quantità di ferrite delta, efficace nel prevenire le cricche a caldo nella zona fusa stessa [6-7-8-9-10].

- leghe di Ni, in grado di realizzare una zona fusa costituita da una soluzione solida Ni-Cr-Fe, in grado di assicurare una buona resistenza alla corrosione e di tollerare un'elevata diluizione con l'acciaio al carbonio senza formazione di strutture fragili [11-12].

In precedenti lavori sono state sperimentate varie tecniche innovative con impiego di fascio laser [13,14,15,16], aventi in comune l'obiettivo di realizzare tali saldature in una singola passata e utilizzando un unico materiale di apporto. Vengono qui di seguito esaminati i risultati di prove di saldatura con combinazione in serie di arco elettrico e fascio laser.

La combinazione in serie si ottiene facendo agire i due processi separatamente in sequenza, con le due sorgenti termiche senza interazione diretta fra loro (Fig. 3). Nella configurazione sperimentata il fascio laser precede l'arco elettrico di 55 mm. Il processo all'arco elettrico è automatico a filo continuo sotto protezione gassosa di argon. A differenza dei procedimenti ibridi, i bagni di fusione sono distinti, con una diversa protezione gassosa (elio per il laser, argon per l'arco elettrico).

La preparazione dei lembi e la disposizione delle sorgenti termiche sul giunto è riportata in Fig. 3. Il materiale placcato utilizzato è acciaio al carbonio rivestito con acciaio inossidabile austenitico tipo AISI 304L (Tab 1). Il materiale di apporto è in forma di filo di diametro Ø 1.2 mm, alimentato automaticamente sulla torcia MIG (Tab. 2).

In due serie di prove distinte sono stati utilizzati i seguenti due materiali di apporto:

1) lega Fe-Cr-Ni al 29%Ni e 28%Cr.

2) acciaio inox austenitico al 19% Cr e 13%Ni.

I due relativi procedimenti sono contrassegnati 1 e 2. In Tab. 3 sono riportati i parametri di saldatura e la composizione completa dei fili di apporto utilizzati.

La posizione di saldatura è piana. La disposizione dei campioni da saldare e la preparazione dei lembi è riportata in Fig.3. L'apparecchiatura laser è un'unità TLF 6000 Turbo con potenza nominale di 6 kW. Il dispositivo di focalizzazione è uno specchio parabolico con una lunghezza focale di 200 mm. Prima della saldatura è stato eseguito un controllo preliminare dei parametri caratteristici del fascio laser e della sua qualità mediante un sistema di diagnosi.

### 3. LAVORO SPERIMENTALE

Le indagini effettuate per valutare la qualità dei giunti saldati sono state le seguenti:

- Controllo visivo ed esami macrografici
- Esami metallografici
- Microanalisi della zona fusa al SEM
- Prove di microdurezza.
- Prove di trazione

#### CARATTERISTICHE DEL MATERIALE PLACCATO (\*)

Materiale placcato (spessore: 6.5+2.5 mm)	Specifica ASTM equivalente	Composizione (% in peso)								Carico di rottura MPa
		C	Mn	Si	P	S	Al	Cr	Ni	
Materiale di supporto: DIN H II DIN 17155	A 515 Gr. 60	0.145	0.85	0.20	0.008	0.001	0.04	-	-	484
Materiale placcatura: A240 tipo 304 L 18-10 Cr-Ni LC 1.4306- DIN 17440		0.017	1.32	0.39	0.029	0.003	-	18.39	10.07	-

(\*) Dal certificato di origine

▲  
Tab. 1

▼  
Tab. 2

#### CARATTERISTICHE DEI MATERIALI DI APPORTO (\*)

N	Specifica	Tipo	Composizione (% in peso)								
			C	Mn	Cr	Si	Ni	Mo	Cu	Nb	Fe
1	X1 NiCrMoCu32 28 7	filo Ø 1.2 mm	0.014	1.67	27.24	0.03	29.29	6.05	1.02	-	resto
2	AWS ER 308	filo Ø 1.2 mm	0.025	1.70	19.00	0.8	13.00	-	-	-	resto

(\*) Dal certificato di origine



### PROCEDIMENTO COMBINATO CON ARCO ELETTRICO+FASCIO LASER (\*)

Parametri di saldatura		Procedimento	
		1	2
<b>Arco elettrico (MIG)</b>			
Tensione	V	38.3	
Corrente	I	437	472
Velocità di alimentazione del filo	m/min	15	
Velocità di saldatura	m/min	1.2	
Composizione filo di apporto Ø 1.2 mm	(vedere Tab. 2)	1	2
Gas di protezione:	tipo	argon	
	portata	litri/min	15
<b>Fascio laser</b>			
Potenza del fascio	kW	5.0	
Gas di processo:	tipo	elio	
	portata	litri/min	30
Distanza arco elettrico- fascio laser	mm	55	

(\*) Torcia MIG e fascio laser agenti sul lato placcato, mobili su un asse orizzontale, lamiera fissa nel piano orizzontale (Fig.3a)

### Microanalisi a dispersione al SEM

Tab. 3 La composizione della zona fusa lungo lo spessore è stata analizzata mediante il microscopio a scansione, tipo JSM-35 CF, equipaggiato con uno spettrometro, modello EDAX 711, con una tensione di accelerazione di 15 kV. Il contenuto degli elementi che maggiormente influenzano la formazione delle fasi (Cr, Ni e Mn) è stato valutato in 10 punti situati lungo una linea in mezziera della zona fusa, attraverso tutto lo spessore del campione (Fig. 5).

### Valutazione delle strutture sul diagramma di Schaeffler

L'utilizzo del diagramma di Schaeffler [17] per la previsione delle strutture presenti nella zona fusa richiede la stima preliminare del contenuto degli elementi di lega in essa presenti.

Con il criterio di Schaeffler, a partire dalla composizione lungo lo spessore della zona fusa è possibile valutare in ogni punto i valori del Cr equivalente e del Ni equivalente. Il contenuto degli elementi di lega non determinati mediante la microanalisi, quali C, Mo e Si, è stato stimato a partire dalla composizione dei materiali base e d'apporto, tenendo conto della diluizione e dell'effettivo contributo di ogni materiale alla formazione della zona fusa. Le aree delle zone fuse dei campioni esaminati sono state misurate con l'ausilio del microscopio ottico.

### Controllo visivo e macrografico

Dopo la saldatura i giunti hanno subito un controllo visivo e un esame macrografico (Fig. 4). I controlli non hanno rivelato la presenza di difetti rilevanti. Per entrambi i procedimenti si osservano due zone distinte: una superiore, più larga e voluminosa, con contenuto più elevato di elementi di lega; una inferiore, stretta e a bordi retti, caratteristica della saldatura a fascio laser, saldata praticamente senza il contributo del metallo di apporto e quindi priva di elementi di lega.

### Esami metallografici

I campioni ricavati dalle sezioni trasversali di saldatura sono stati lucidati con allumina fine e attaccati con glicerregia.

### Prove di microdurezza

Sono stati ricavati campioni metallografici, sezionando il giunto normalmente all'asse di saldatura. Sono state eseguite prove di microdurezza Vickers nella zona fusa in 12 punti equidistanti lungo l'intero spessore della zona stessa. La prova è stata effettuata con un carico di 100 g e un tempo di carico di 10 s.

### Prove di trazione

Le prove di trazione su due campioni estratti dai saggi saldati con i due procedimenti mostrano un carico di rottura in genere di poco inferiore al valore minimo dell'acciaio al carbonio (Tabella 4). Le rotture, ad eccezione di un caso, si sono verificate nella ZTA.

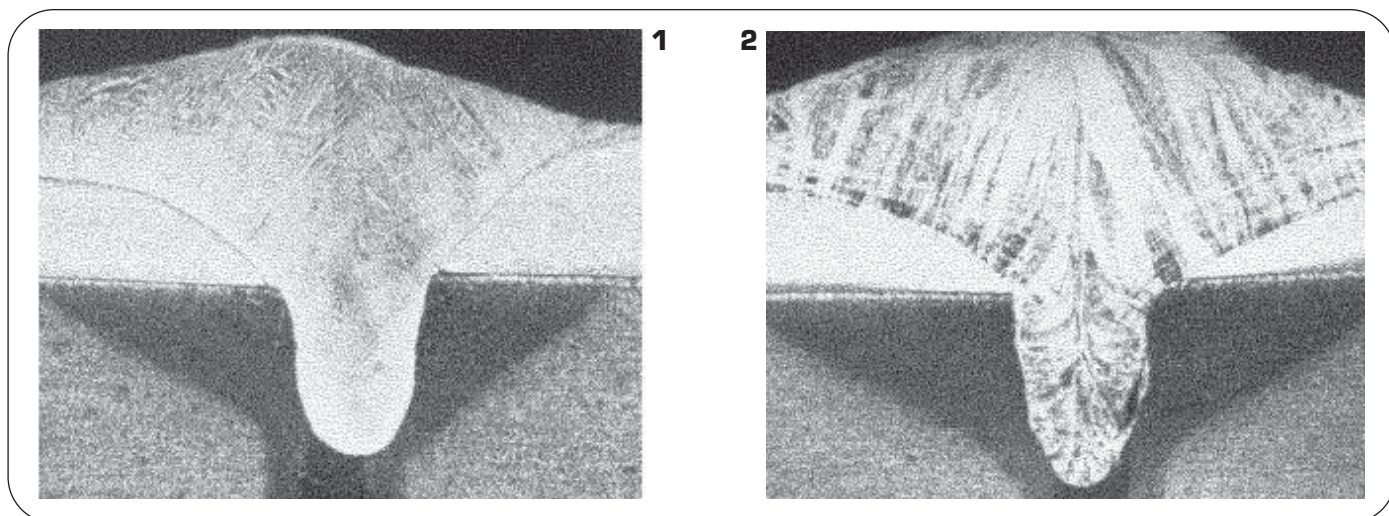


Fig. 4

Aspetto macrografico dei giunti saldati con i procedimenti 1 e 2.

Macrographic appearance of welded joints with procedures 1 and 2.

## PROVE DI TRAZIONE SUI CAMPIONI SALDATI

Provetta N.	Procedimento di saldatura	Carico di rottura (MPa)	Posizione della rottura
1	1	476.0	ZTA
2		454.0	Zona fusa
3	2	467.0	ZTA
4		459.0	"

Tab. 4

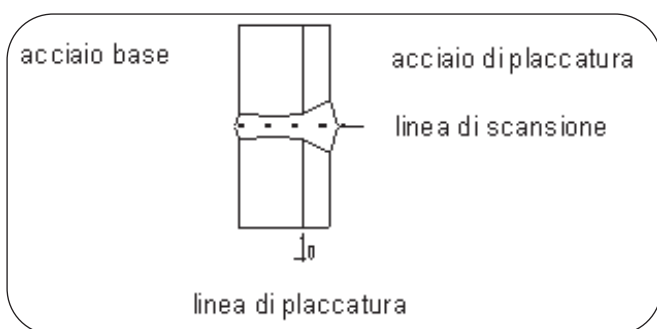


Fig. 5

Linea di scansione lungo la zona fusa per la microanalisi al SEM.  
Scanning line along weld metal for SEM microanalysis.

## RISULTATI E DISCUSSIONE

### Microstruttura nelle zone fuse

Le osservazioni metallografiche insieme con le indicazioni della microanalisi al SEM e le prove di microdurezza hanno consentito di identificare le composizioni e le strutture ottenute con i vari procedimenti. Sulla base del diagramma di Schaeffler sono state stimate per ognuno dei procedimenti le fasi presenti in zona fusa (Fig. 6).

I campioni esaminati mostrano due distinte zone fuse. Nel caso del procedimento 1, con il metallo di apporto contenente 27% Cr e 29% Ni le due zone hanno le seguenti caratteristiche:

- la prima, a maggior contenuto di elementi di lega, per una profondità poco superiore alla metà della spessore a partire dal lato placcato, presenta una composizione media del 18.20% Cr e 19.22% Ni. La struttura è completamente austenitica con una durezza variabile fra 170 e 200 HV.

- la seconda, dal lato acciaio al C, per i rimanenti 4 mm di spessore, si è formata senza un apprezzabile contributo del filo di apporto. La struttura, ottenuta in condizioni di rapida solidificazione, contiene presumibilmente ferrite, perlite e bainite. La durezza è compresa fra 260 e 310 HV.

Nel caso del procedimento 2, con il metallo di apporto meno legato contenente 19%Cr e 13%Ni, si ottengono pure due distinte zone fuse (vedere macrografia del giunto Fig. 4):

- la prima, a maggior contenuto di elementi di lega, con una profondità poco superiore alla metà della spessore a partire dal lato placcato, presenta una composizione media del 15.17% Cr e 7.9% Ni. La struttura è mista austenitico-martensitica con una durezza variabile fra 180 e 210 HV.

- la seconda, dal lato acciaio al C, per circa 4 mm di spessore ha caratteristiche simili a quelle rilevate per il procedimento 1, in

quanto si è formata senza un apprezzabile contributo del filo di apporto. La durezza è compresa fra 240 e 350 HV.

## CONCLUSIONI

I procedimenti sopra descritti, sperimentati nella saldatura degli acciai con placcatura in acciaio inossidabile austenitico, hanno l'obiettivo di effettuare la saldatura in passata unica, con impiego di un unico materiale d'apporto, realizzando una composizione chimica accettabile nella zona fusa e soddisfacenti caratteristiche meccaniche del giunto.

I risultati mostrano che:

- come desiderato, la differenza di composizione ottenuta nella zona fusa fra la porzione di spessore interessata dalla placcatura e quella corrispondente all'acciaio al carbonio è assai netta. In pratica il filo di apporto al Cr-Ni contribuisce direttamente alla formazione della zona fusa della placcatura. La composizione ottenuta non è quella ideale nel caso di filo di apporto in acciaio inossidabile austenitico; tuttavia si può ritenere che una scelta più appropriata del filo di apporto potrebbe riportare agevolmente la composizione entro i limiti desiderati;
- il passaggio dell'arco elettrico dopo il fascio laser ha l'effetto di

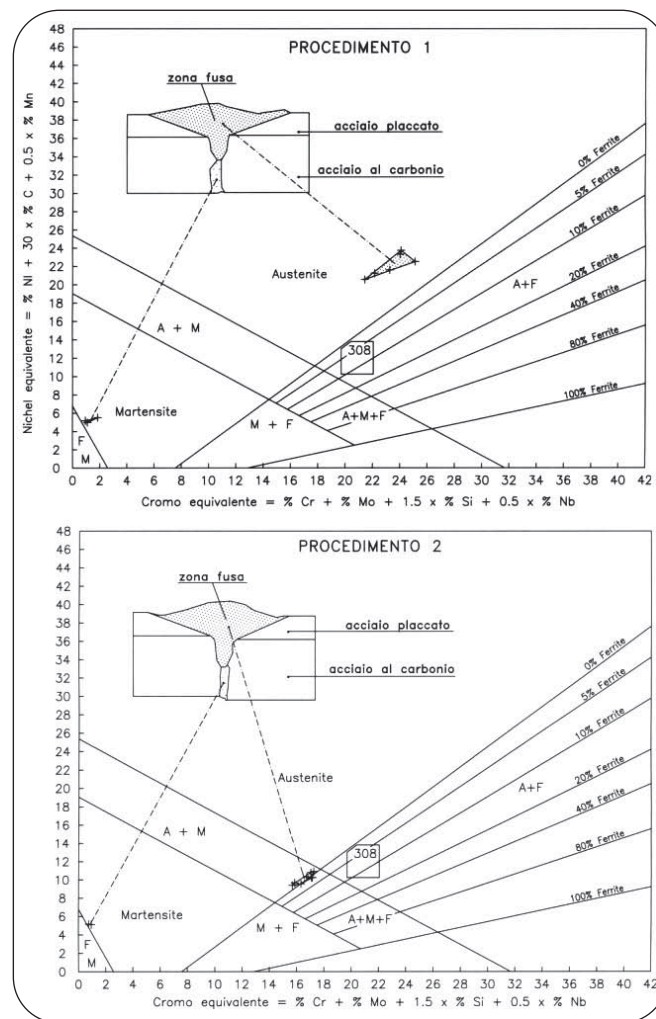


Fig. 6

Rappresentazione sul diagramma di Schaeffler delle composizioni della zona fusa.  
Representation of weld metal composition on Schaeffler diagram.



ridurre le velocità di raffreddamento nella zona termicamente alterata nell'acciaio al carbonio e comunque di realizzare un rinvenimento delle strutture di tempra eventualmente originate dall'azione del fascio laser;

- la formazione di un'ampia zona fusa nella zona di placatura offre una maggiore capacità di collegare i lembi placcati in presenza di imperfezioni geometriche rispetto all'impiego del solo fascio laser.

## RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Fraunhofer Institut für Lasertechnik - ILT di Aachen (Germania) per l'assistenza avuta nella realizzazione delle saldature a fascio laser presso i propri laboratori.

## BIBLIOGRAFIA

- 1] D. PETRING et al., Extended range of applications for laser beam welding by laser-MIG hybrid technique, *LaserOpto-33* (1) 2001, p.50-56
- 2] D.PETRING, Hybrid Laser Welding, *Industrial Laser Solutions*, Dicembre 2001, p.12-16
- 3] U. DILTHEY, A. WIESCHEMANN, Prospects by combining and coupling laser beam and arc welding processes, IIS/IIW-1472-99 (ex. DOC XII-1565-99) Class A
- 4] VOEST-ALPINE STAHL LINZ- Rolled Clad Plates - Linz, 1997
- 5] AMERICAN WELDING SOCIETY- Welding Handbook-8° Edizione- Vol.4 Part 2- Miami, 1998-p.370-380
- 6] J.A. BROOKS, A.W. THOMPSON AND J.C. WILLIAMS. A Fundamental Study of the Beneficial Effects of Delta Ferrite in Reducing Weld Cracking.- *Welding Journal* 63 (3), 71s to 83s.
- 7] J. SINGH, G.R. PURDY AND G.C. WEATHERLY, 1985. Microstructural and Microchemical Aspects of the Solid-State Decomposition of Delta Ferrite in Austenitic Stainless Steels.- *Metallurgical Transactions A*, 16A (8), pp. 1363-1369.
- 8] V.P. KUJANPAA, S.A. DAVID AND C.L. WHITE, 1986. Solidification Cracking, Formation of Hot Cracks in Austenitic Stainless Steel Welds - *Welding Journal* 65 (8): 203-s to 212-s.
- 9] S.A. DAVID, J.M.VITEK AND T.L. HEBBLE, 1987. Effect of rapid Solidification on Stainless Steel Weld Metal Microstructures and its Implications on the Schaeffler Diagram - *Welding Journal* 66 (10): 289-s to 302s.
- 10] J.M. VITEK AND S.A. DAVID, 1988. The Effect of Cooling Rate on Ferrite in Type 308 Stainless Steel-*Welding Journal* 67 (5): 95-s to 102-s.
- 11] R.VISWANATHAN, Dissimilar metal welds in service and boiler creep damage evaluation for plant life extension, *J. of Press. Vess. Techn.* -August 1985, Vol. 107/247÷225.
- 12] D.I. ROBERTS, R.H. RYDER, R.VISWANATHAN, Performance of dissimilar welds in service, *J. of Press. Vess. Techn.* -August 1985, Vol. 107/247÷225.
- 13] S. MISSORI, C.KOERBER, Procedure Development for Improved Quality Single and Dual LBW of Dissimilar Metals, *Welding Journal* -Giugno 1998: 232s-238s.
- 14] S. MISSORI ET AL.- Schweißen plattierter Bleche mit CO<sub>2</sub> Laserstrahlung- Schweißen & Schneiden- Disseldorf, Novembre 1996, pp.878-888.
- 15] S. MISSORI, F. MURDOLO, A. SILI, Single-Pass Laser Beam Welding of Clad Steel Plate, *Welding Journal* -AWS-Miami, Febbraio 2004:65s-71s.
- 16] S. MISSORI et al. - Simultanschweißen plattierter Bleche mit CO<sub>2</sub> Laserstrahlung- Schweißen & Schneiden- Disseldorf, Febbraio 1997, pp.87-93.
- 17] A.L. SCHAEFFLER, 1949. Constitution diagram for stainless steel weld metal. *Metal Progress* 56(11): 680-680B.

## ABSTRACT

### COMBINATION OF LASER BEAM AND ELECTRIC ARC PROCESSES IN CLAD PLATES WELDING

*Keywords: clad steel, austenitic stainless steel, combined welding processes, laser welding, arc welding*

The simultaneous utilization of arc-welding and laser beam processes may improve performance of welding process and couple the advantages of both processes. The peculiar advantages of laser beam are related to the high energy density, which gives rise to a deeper penetration with narrow weld zones and elevated welding speed. On the other hand, the electric arc offers lower welding speed and lower energy density with limited penetration depth, but, due to a wider weld zone, the tolerance for geometrical imperfections and heat source alignment is greater. Moreover, the electric arc gives higher energetic efficiency and lower costs. The serial combination is carried out making the two thermal sources to operate in sequence without any mutual direct interaction between them.

In the present paper are reported the results of butt welding trials of clad plates, by utilizing a combined electric arc-laser beam process, with single pass technique and single wire filler metal of a convenient chemical composition. On the contrary, the conventional arc welding procedure, as it commonly utilized for clad plates, normally requires three different filler metals and numerous welding passes. Testing plates, of a total

thickness equal to 9 mm, are made of structural carbon steel clad with austenitic stainless steel (clad thickness: 2.5 mm). Two different trials have been performed by utilizing respectively two filler metal, namely: 1) Fe-Ni-Cr alloy with 29%Ni and 28%Cr; 2) austenitic stainless steel with 19% Cr and 13%Ni. In both cases the weld zone is made of two distinct sub-zones, whose composition and microstructures were investigated. Welded samples were submitted to metallographic observations, X-Ray EDS microanalysis, Vickers micro-hardness and tensile tests.

In the case of Fe-Ni-Cr filler metal (procedure 1), the results show that satisfactory compositions are achieved in weld zone both in the portion of clad thickness and in the portion of carbon steel thickness. The alloy filler metal introduced with electric arc process contributes mainly to the formation of the weld metal along clad material thickness, while the below carbon steel is laser beam welded, without an appreciable contribution of the filler metal.

In the case of 19Cr-13Ni filler metal (procedure 2), the welded metal in the clad zone is quite leaner in Cr and Ni if compared with the desired composition. However, a more convenient composition could have easily led the alloy element contents within the desired limits. The combined process showed a good tolerance for geometrical imperfections. The heat introduced by the electric arc reduces cooling speed of heat affected zone in the carbon steel and operates a kind of tempering treatment over its structure, possibly hardened just after the operation of laser beam source.