

# Saldatura al fascio laser di laminati in acciaio placcati con leghe a base di Ni

L. Bonaccorsi, G. Costanza, F. Giacobbe, S. Missori, A. Sili, M.E. Tata

*Il presente lavoro è finalizzato alla sperimentazione di un processo di saldatura al fascio laser, mediante passata unica, di lamiere di acciai placcati con leghe a base di Ni (Alloy 59 e lega Monel 400).*

*La particolarità del procedimento di saldatura al fascio laser in una sola passata consiste nell'assenza di lembi di cianfrinatura e nell'impiego, come materiale d'apporto, di inserti consumabili in lega di Nichel posti tra le lamiere da saldare. La possibilità di ottenere giunti saldati di buona qualità ed esenti da difetti viene verificata attraverso osservazioni macrografiche ed esami metallografici. Le sezioni saldate sono studiate mediante osservazioni di microscopia ottica ed elettronica in scansione (SEM), misure microanalitiche con spettroscopia in dispersione di energia (EDS) e prove di microdurezza Vickers.*

**Parole chiave:** acciaio, nichel e leghe, saldatura, metallografia, microscopia elettronica, prove meccaniche, prove non distruttive

## INTRODUZIONE

I recipienti in pressione devono essere progettati e realizzati in modo da resistere alle massime sollecitazioni di esercizio senza che si generino rotture catastrofiche, perdite di prodotto o ulteriori situazioni di pericolo per persone e cose. Per il loro esercizio in sicurezza, oltre agli effetti di pressione e temperatura, occorre considerare la presenza di fluidi che possano determinare, in particolari condizioni ambientali, attacchi chimico-fisici ai materiali e causare fenomeni corrosivi.

Le lamiere in acciaio al carbonio o basso-legato, destinate alla costruzione di recipienti e apparecchiature in pressione, possono essere rivestite con una placcatura di opportuna lega al fine di realizzare in modo economico un materiale che unisca un'elevata resistenza meccanica ad una buona resistenza alla corrosione dal lato di esercizio. Le lamiere placcate presentano quindi un ottimo compromesso tra caratteristiche meccaniche e bassi costi dell'acciaio di base e proprietà di resistenza a corrosione delle leghe di placcatura. Esse sono utilizzate per attrezzature che presentino un'esposizione ad ambienti altamente corrosivi sul lato del processo.

Fra i materiali di placcatura di più frequente impiego figurano gli acciai inossidabili e le leghe a base di nichel. Uno dei metodi più utilizzati per la fabbricazione di lamiere placcate è la laminazione a caldo, che consente di realizzare il legame all'interfaccia dei due materiali mediante saldatura allo stato solido a temperatura elevata e di ottenere spessori di placcatura compresi tra il 10 e il 30% dello spessore totale. La vantaggiosa combinazione dei due materiali dà luogo a considerevoli riduzioni di peso e notevoli risparmi nei costi di produzione delle apparecchiature, in confronto all'utilizzo di la-

miere integralmente costruite in materiale alto-legato.

Secondo la legislazione vigente le apparecchiature a pressione sono soggette in fase di fabbricazione alla marcatura CE secondo la Direttiva Europea 97/23/CE nota come "PED" (Pressure Equipment Directive) [1] ed in fase di esercizio ai requisiti previsti dal DM 329/04 [2]. Il progettista deve realizzare il recipiente in modo tale che questo possa resistere alle massime sollecitazioni di esercizio senza causare perdite di prodotto, rotture o ulteriori situazioni di pericolo. Poiché è la corrosione a provocare un graduale ed irreversibile deterioramento delle lamiere, il legislatore, nelle su citate disposizioni, ha imposto al progettista di scegliere materiali, spessori idonei e sistemi di protezione ed all'utilizzatore di predisporre e garantire appositi sistemi di monitoraggio, ispezione e controllo. Pertanto, nel caso di impiego di lamiere placcate, particolare cura deve essere posta nella realizzazione dei collegamenti saldati per conservare nel giunto la composizione e quindi le proprietà di resistenza alla corrosione specifiche della lega di placcatura.

In linea di principio, la saldatura al fascio laser sarebbe possibile anche senza l'impiego di materiale d'apporto [3,4], sebbene alcune difficoltà possano sopraggiungere in caso di non perfetto allineamento della traiettoria del fascio. Tuttavia l'impiego di materiale d'apporto è auspicabile in quanto consente di influire positivamente sulla composizione della zona fusa.

In precedenti lavori [5,6] sono stati messi a punto processi di saldatura al fascio laser, su lamiere d'acciaio, in un'unica passata e con impiego di materiale d'apporto sotto forma di polveri, trasportate da una corrente gassosa, o di inserti consumabili interposti tra i lembi delle lamiere, allo scopo di interessare volumi di materiale fuso minori rispetto a quelli realizzati con le saldature tradizionali. In particolare, nel caso di lamiere di acciaio dolce placcate con acciaio inossidabile austenitico AISI 304L, sono stati sperimentati processi a singolo o a doppio fascio laser o combinati arco elettrico - fascio laser (tutti aventi in comune la tecnica della singola passata e l'utilizzo di un solo materiale d'apporto di opportuna composizione), ottenendo giunti privi di difetti e di composizione soddisfacente [7,8].

Questo lavoro è finalizzato alla realizzazione di un processo di saldatura al fascio laser in una sola passata in lamiere di testa di ac-

L. Bonaccorsi, A. Sili  
Dipartimento di Chimica Industriale e Ingegneria dei Materiali  
Università di Messina

G. Costanza, S. Missori, M.E. Tata  
Dipartimento di Ingegneria Meccanica  
Università di Roma-Tor Vergata

F. Giacobbe  
ISPESL - Dipartimento di Messina

	Spess (mm)	C	Mn	Si	P	S	Al	Cr	Ni	Mo
<b>Acciaio di base: S235JRG2</b>	10	0.040	0.52	0.24	0.009	0.0016	0.057	0.028	0.006	0.006
<b>Placcatura: Alloy 59</b>	2.5	0.005	0.15	0.040	0.004	0.002	-	22.85	59.47	15.55

**TAB. 1** Composizioni della lamiera A, placcata con Alloy 59.

*Compositions of A plate, clad with Alloy 59.*

ciai placcati con leghe a base di Ni, lega Alloy 59 e lega Monel 400, utilizzate per la costruzione di recipienti in pressione.

Le particolarità di tale procedimento di saldatura al fascio laser consistono nella singola passata, nell'assenza di lembi di cianfrinatura e nell'impiego, come materiale d'apporto, di inserti consumabili in lega di Nichel posti tra le lamiere da saldare.

La possibilità di ottenere giunti saldati di buona qualità ed esenti da difetti è stata verificata attraverso osservazioni macrografiche, prove non distruttive (liquidi penetranti, radiografie) ed esami metallografici. Allo scopo di determinare la composizione della zona fusa e l'ampiezza delle zone interessate da cambiamenti microstrutturali nelle lamiere base, sono state effettuate osservazioni di microscopia ottica ed elettronica in scansione, misure microanalitiche con spettroscopia in dispersione di energia e prove di microdurezza Vickers.

#### MATERIALI E METODI

Sono state considerate due diverse lamiere in acciaio, placcate per laminazione a caldo rispettivamente con Alloy 59 e con Monel 400, fornite come da laminazione [9].

Sia sui campioni nelle condizioni tal quali da fornitura che sulle sezioni saldate, dopo opportuna preparazione metallografica, sono state effettuate osservazioni di microscopia ottica ed elettronica in scansione (SEM) mediante un microscopio JSM - 5600LV, equipaggiato con spettrometro a dispersione di energia del tipo EDX Oxford (mod. 6587).

Le proprietà meccaniche nei pressi delle interfacce di placcatura sono state valutate mediante misure di microdurezza Vickers (carico 200g, tempo 10s).

#### Lamiera A

La lamiera A è costituita dall'acciaio ferritico S235JRG2-EN 10025/94 (spessore 10 mm), placcata con la lega di Ni Alloy 59 (spessore 2,5 mm), con le composizioni riportate in tab. 1.

L'acciaio ferritico presenta una struttura metallografica molto fine, priva di perlite, con dimensione dei grani di circa 20 µm, come mostrato in fig. 1.

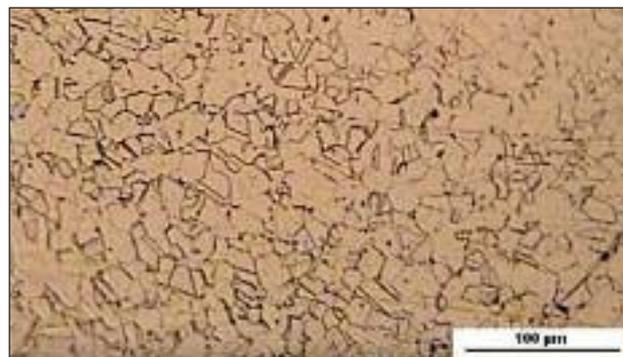
Anche la lega di placcatura Alloy 59 è caratterizzata da grani austenitici di piccole dimensioni (fig. 2).

L'interfaccia di placcatura tra l'acciaio ferritico S235JRG2 placcato con la lega di Ni Alloy 59, già studiata in un precedente la-



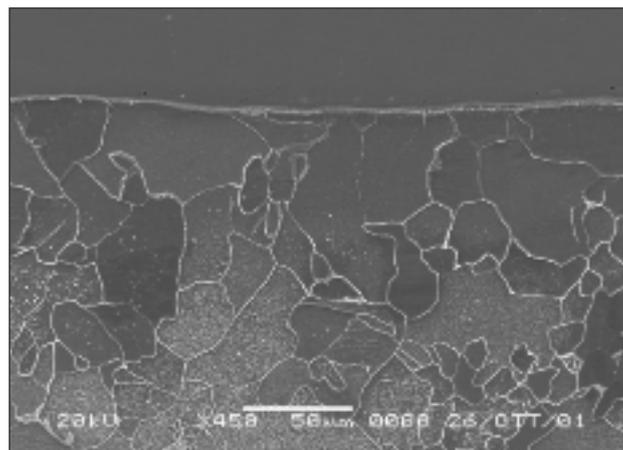
**FIG. 1** Lamiera A: metallo base in acciaio ferritico S235JRG2-EN 10025/94, attaccato con soluzione Nital (2% HNO<sub>3</sub>, 98% alcol etilico).

*A plate: S235JRG2-EN 10025/94 ferritic steel base metal, etched by Nital (2% HNO<sub>3</sub>, 98% ethylic alcohol).*



**FIG. 2** Lamiera A: placcatura in lega a base di Ni Alloy 59, attaccata con reagente tipo gliceregia (20 ml HNO<sub>3</sub>, 60 ml HCl, 40 ml glicerina).

*A plate: cladding alloy (Alloy 59), etched by a glyceric acid type solution (20 ml HNO<sub>3</sub>, 60 ml HCl, 40 ml glycerine).*



**Fig. 3** Lamiera A: micrografia SEM nei pressi dell'interfaccia di placcatura, lato acciaio ferritico S235JRG2.

*A plate: SEM micrograph of the cladding interface, S235JRG2 ferritic steel side.*

	Spess (mm)	C	Mn	Si	P	S	Al	Cr	Ni	Cu	Fe
<b>Acciaio di base:</b> <b>AISI 1010</b>	13	0.109	1.19	0.27	.011	.001	.038	.014	0.23	0.14	Bal
<b>Placcatura:</b> <b>Monel 400</b>	2	0.1	1.0	0.2	-	.002	-	-	64.9	32.0	1.7

**TAB. 2** Composizioni della lamiera B, placcata con lega Monel 400.

Compositions of B plate, clad with Monel 400.

voro [10], è rappresentata da una linea continua e sottile che segue il profilo dei grani ferritici (fig. 3).

Per effetto delle diverse concentrazioni nei due metalli, è riscontrabile il fenomeno della interdizione di elementi sostituzionali dalla lega di placcatura verso l'acciaio di base e del Fe nel verso opposto.

I valori medi di microdurezza dei due materiali (200 HV per l'Alloy 59 e 150 HV per l'acciaio ferritico S235JRG2) non presentano sensibili variazioni nei pressi dell'interfaccia di placcatura. Infatti, dato il ridottissimo tenore di carbonio nell'acciaio di base, è da escludere la precipitazione di carburi nella lega di placcatura ed il conseguente indurimento locale.

#### Lamiera B

La lamiera B è costituita dall'acciaio al carbonio AISI 1010 (spessore 13 mm), placcato con lega di Ni-Cu Monel 400 (spessore 2 mm), con le composizioni riportate in tabella 2.

L'acciaio di base AISI 1010 presenta la tipica struttura di laminazione, con grani ferritici - perlitici di piccole dimensioni (~ 20 µm) senza mostrare fenomeni di decarburazione (fig. 4), mentre la lega Monel è caratterizzata da grani di maggiori dimensioni (fig. 5). Anche per la lamiera B, si osserva un'interfaccia continua costituita da una linea sottile che segue il profilo dei grani ferritici-perlitici dell'acciaio di base (fig. 6).

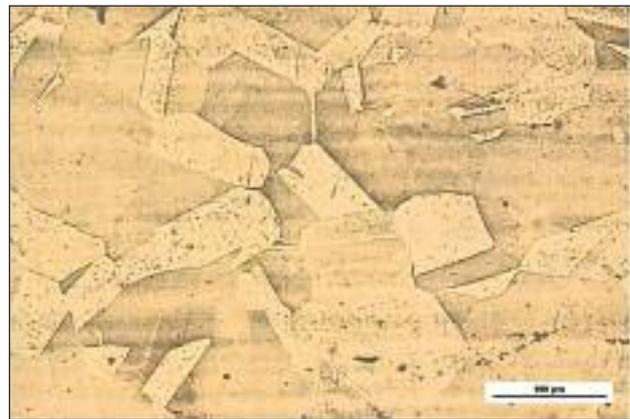
In particolare, la lega di placcatura Monel 400 presenta, a ridosso della linea di placcatura, una zona a grana più fine (ampia circa 200 µm) rispetto al resto della placcatura.

Come analizzato in un precedente lavoro [10], l'interdiffusione degli elementi sostituzionali interessa una fascia di spessore pari a ~ 20 µm, dal momento che la presenza del Ni rende il Cu so-

lubile in una ristretta zona dell'acciaio di base.

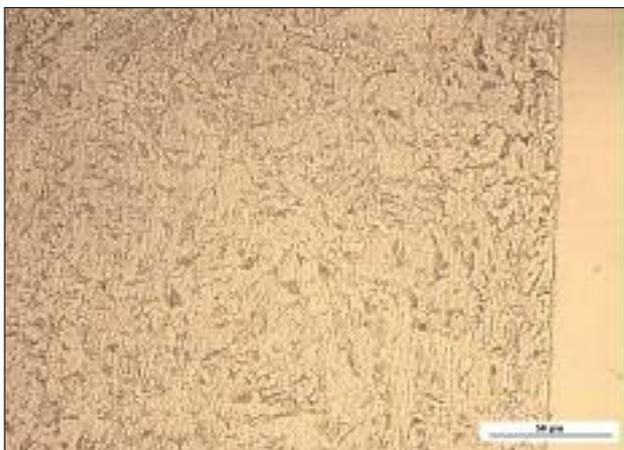
Le misure di microdurezza Vickers danno valori di circa 160 HV dal lato della lega Monel e valori intorno a 150 HV dal lato dell'acciaio di base.

Per entrambe le tipologie di lamiere, le ampiezze delle zone in cui si sono riscontrate modifiche microstrutturali sono risultate almeno di un ordine di grandezza inferiore rispetto allo spessore dei rispettivi strati di placcatura.



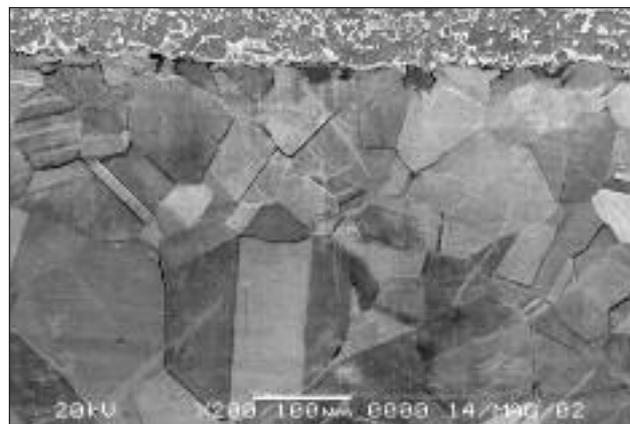
**FIG. 5** Lamiera B: placcatura in lega Monel 400, attaccata con soluzione gliceregia (20 ml HNO<sub>3</sub>, 60 ml HCl, 40 ml glicerina).

B plate: cladding alloy (Monel 400), etched by glyceric acid type solution (20 ml HNO<sub>3</sub>, 60 ml HCl, 40 ml glycerine).



**FIG. 4** Lamiera B: metallo base in acciaio AISI 1010, attaccato con soluzione Nital (2% HNO<sub>3</sub>, 98% alcool etilico).

B plate: AISI 1010 steel base metal, etched by Nital (2% HNO<sub>3</sub>, 98% ethylic alcohol).



**FIG. 6** Lamiera B: micrografia SEM nei pressi dell'interfaccia di placcatura, lato lega di placcatura Monel 400.

B plate: SEM micrograph of cladding interface, Monel 400 cladding alloy side.

	Spess (mm)	C	Mn	Si	P	S	Cu	Fe	Cr	Ni
AWS ER Ni Cr3	0.4	0.02	3.0	0.1	-	-	-	8.5	15.2	bal.

TAB. 3 Composizioni degli inserti in lega AWS ER Ni Cr3.

Compositions of AWS ER Ni Cr3 alloy strips.

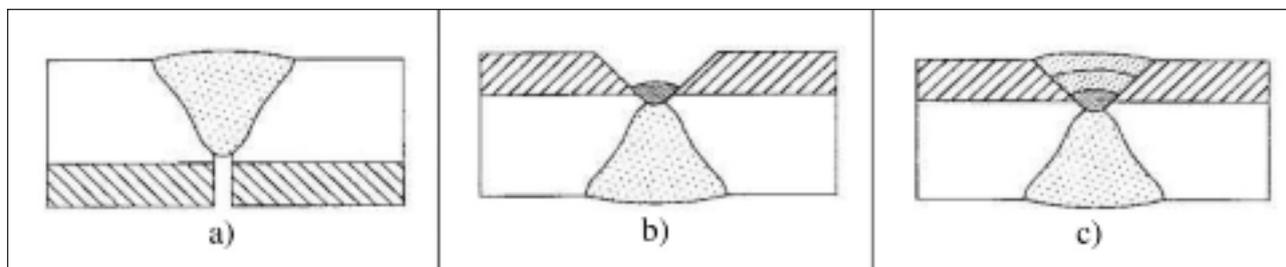


FIG. 7 Saldatura di testa tra lamiere placcate: a) saldatura iniziale lato acciaio di base; b) prima passata lato placcatura; c) completamento della saldatura.

Butt welding of clad plates: a) first welding on base steel side; b) first pass on clad alloy side; c) welding completion.

La saldatura delle lamiere placcate, con la tecnica tradizionale all'arco elettrico, avviene in più fasi (fig. 7), eseguendo la saldatura del solo acciaio (materiale base) con materiale di apporto simile e la successiva ripresa al rovescio (lato placcatura) con una prima passata con materiale alto-legato, in modo da tollerare una possibile diluizione con il materiale base, e quindi il completamento della saldatura con materiale di apporto simile a quello della placcatura.

Il procedimento descritto risulta piuttosto complesso e richiede in generale l'impiego di diversi metalli di apporto e di numerose passate di saldatura con notevole apporto termico nel caso di impiego di arco elettrico. L'utilizzo di processi ad alta densità di energia, quali il fascio laser, consente di limitare l'ampiezza della zona termicamente alterata e di ridurre distorsioni e tensioni termiche.

In questa sperimentazione, le lamiere placcate sono state saldate di testa, con un processo al fascio laser mediante singola passata, lembi retti e materiale d'apporto sotto forma di inserti consumabili. Le lamiere sono state posizionate con il lato acciaio di base rivolto verso il fascio laser (fig. 8).

Come apparato per la saldatura è stato impiegato un laser CO<sub>2</sub> EL.EN - RTM, con potenza nominale di 6 kW, dotato di cella con tavola cartesiana e corse X=1200mm, Y=700mm e Z=340mm.

La difficoltà di saldare un materiale placcato in una singola passata con impiego di un unico materiale di apporto è data dal fatto che alla formazione della zona fusa concorrono il metallo di apporto e porzioni sia dell'acciaio al carbonio che della lega 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, dal lato della placcatura, dovrebbe essere prossima a quella del materiale di placcatura, in modo da assicurare una buona resistenza alla corrosione.

Le saldature delle lamiere placcate sono state effettuate utilizzando come materiale d'apporto inserti in lega di nickel Inconel 600 (AWS ER Ni Cr3) (tab. 3), in grado di realizzare una zona fusa costituita da una soluzione solida Ni-Cr-Fe e di assicurare una buona resistenza alla corrosione. Inoltre il Nichel può dare soluzioni solide in tutte le proporzioni ad alta temperatura e, di fatto, anche a temperatura ambiente, sia con il ferro che con il rame.

Le lamiere sono state fresate per ridurre lo spessore iniziale

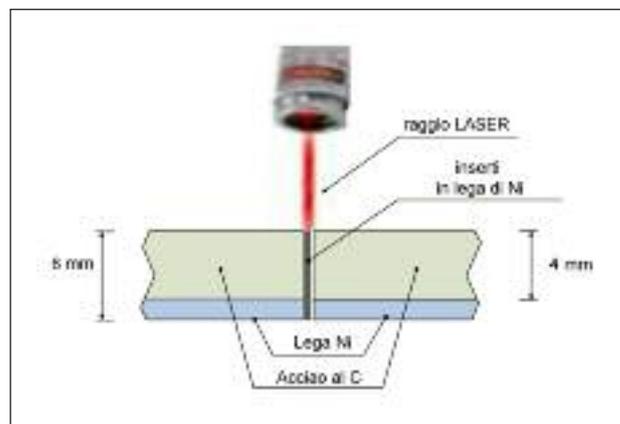


FIG. 8 Rappresentazione schematica del processo di saldatura su lamiere placcate, posizionate di testa, con utilizzo di inserti consumabili.

Scheme of butt-welding process between clad plates with consumable strips.



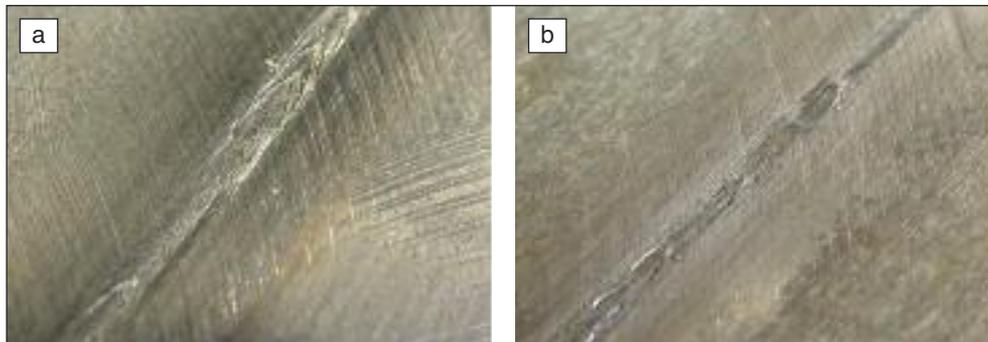
FIG. 9 Giunto saldato con evidenza dei punti di saldatura effettuati per il bloccaggio iniziale delle lamiere posizionate di testa.

Welded joint with the welding points utilized to block plates before the welding trials.

Potenza sul pezzo (kW)	Velocità di avanzamento (mm/s)	Dimensioni delle lamiere (mm <sup>3</sup> )	Spessore totale degli inserti (mm)	Portata gas di protezione (He) ml/s
5.8	15-27	100 x 80 x 6	0.4-0.8	500

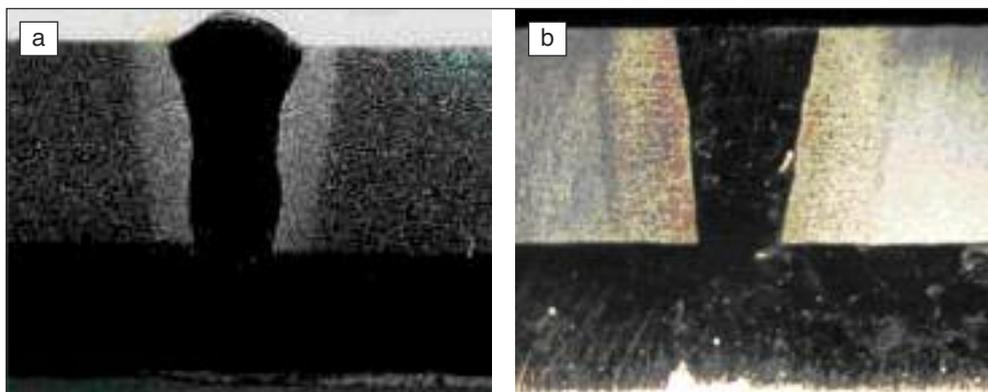
**TAB. 4**  
*Parametri operativi di saldatura.*

*Operative welding parameters.*



**FIG. 10**  
*Cordone di saldatura realizzato su lamiere placcate con lega Monel 400: a) lato acciaio di base; b) lato lega di placcatura.*

*Welded joint on plates clad by Monel 400 alloy: a) base steel side; b) clad alloy side.*



**FIG. 11**  
*Immagine macrografica di sezioni saldate: a) lamiera A, placcata con Alloy 59; b) Lamiera B, placcata con lega Monel 400.*

*Macrograph of welded sections: a) A plates, clad by Alloy 59; b) B plates, clad by Monel 400 alloy.*

della fornitura al valore di 6 mm.

La lavorazione è stata effettuata dal lato acciaio in modo da mantenere inalterato lo spessore dello strato di placcatura.

Sono state realizzate saldature su lamiere di 100 x 80 mm<sup>2</sup>. Gli inserti consumabili sono stati usati in forma di lamine dello spessore di 0.4 mm, poste in numero di 1 o 2 tra i lembi da saldare costituiti dai lati più lunghi delle lamiere. Tali lembi di saldatura sono stati opportunamente puliti e sgrassati prima di effettuare le saldature.

Le lamiere sono state accostate di testa lungo il lato maggiore e fermate con punti di saldatura alle estremità, in modo da mantenere gli inserti bloccati tra i lembi durante il processo di saldatura. In figura 9, viene mostrata un'immagine di un giunto saldato con evidenza dei punti di bloccaggio.

Per la definizione dei corretti parametri operativi, riportati in tabella 4, sono state effettuate prove preliminari di saldatura su provini aventi caratteristiche geometriche e metallurgiche similari a quelli delle lamiere in esame.

Le velocità di saldatura più basse sono state adottate nel caso di due inserti, al fine di fornire una maggiore apporto termico e di garantire la completa fusione del materiale d'apporto.

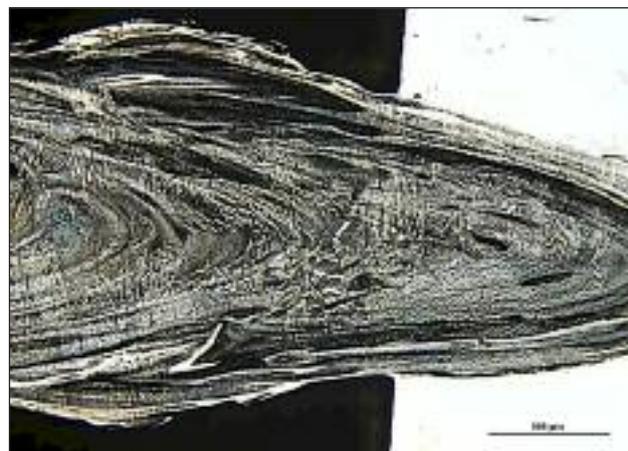
La qualità dei giunti è stata verificata attraverso osservazioni macrografiche e controlli non distruttivi, quali esame radiografici (RT) ed applicazione di liquidi penetranti (PT).

Sulle sezioni saldate, opportunamente preparate metallograficamente, sono state effettuate osservazioni di microscopia ottica ed elettronica in scansione, misure di microanalisi EDS e prove di microdurezza Vickers.

## RISULTATI

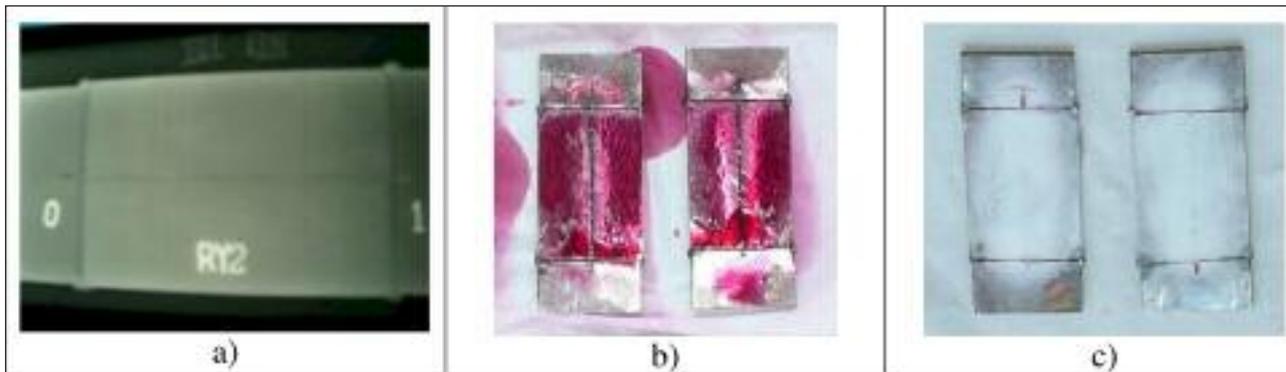
### Controlli visivi ed esami macrografici

I controlli visivi hanno mostrato giunti di buona qualità, con profilo regolare caratteristico delle saldature ad alta densità di energia ed esenti da difetti macroscopici, come mostrato in fig. 10 per la lamiera B. La penetrazione è stata completa ed uniforme per entrambe le tipologie di lamiera, sia dal lato espo-



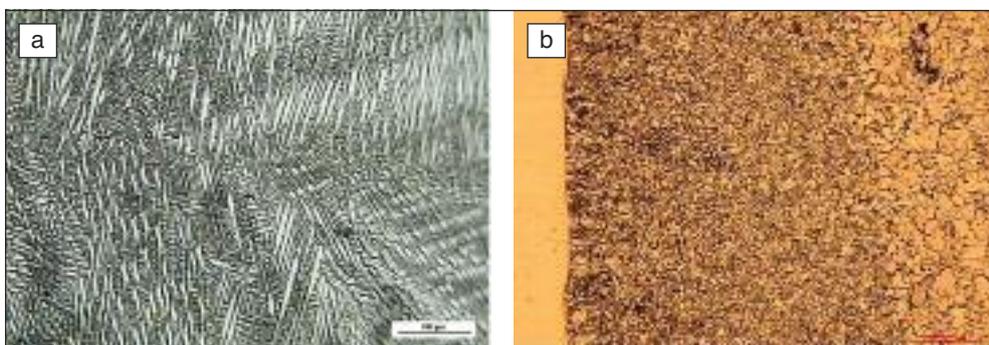
**FIG. 12** *Macografia della sezione saldata in un giunto tra lamiere di tipo A (attacco: 80 ml HNO<sub>3</sub>, 3 ml HCl; immerso in H<sub>2</sub>O bollente prima dell'attacco).*

*Macrograph of the welded section of a joint between plates (etching: 80 ml HNO<sub>3</sub>, 3 ml HCl; submerged in boiling water before etching).*



**FIG. 13** Controlli non distruttivi effettuati su un giunto ottenuto tra lamiere di tipo B: a) immagine radiografica; b) applicazione del penetrante rosso; c) applicazione del rilevatore bianco.

*Non destructive tests on a joint between B plates: a) radiographic image; b) red penetrating liquid application; c) white revealing liquid application.*



**FIG. 14** Sezione saldata (tipo A): a) ZF (attacco: 80ml  $HNO_3$ , 3ml HCl; immerso in  $H_2O$  bollente prima dell'attacco); b) ZTA, lato acciaio ferritico (attacco 2%  $HNO_3$ , 98% alcol etilico).

*Welded section (A plates): a) ZF (etching: 80ml  $HNO_3$ , 3ml HCl; submerged in  $H_2O$  boiling before etching); b) ZTA, ferritic steel side (etching: 2%  $HNO_3$ , 98% ethylic alcohol).*

sto al fascio laser (acciaio di base) che dal rovescio (lato lega di placcatura).

Le macrografie delle sezioni saldate, preparate metallograficamente con attacco Nital 2%, rivelano le diverse zone termiche del giunto (fig. 11). La zona termicamente alterata (ZTA) è di forma regolare leggermente conica e si estende per circa 1 mm a partire dal confine della zona fusa.

È evidente la completa fusione degli inserti e la loro diluizione con il metallo base, sia acciaio che lega di placcatura, che porta alla formazione della zona fusa. La ZF presenta all'osservazione macrografica una morfologia a bande che indicano il procedere della solidificazione (fig. 12).

### Controlli non distruttivi

I controlli non distruttivi effettuati, RT e PT, non hanno evidenziato difetti degni di nota. I giunti si presentano privi di inclusioni e di porosità, sia interne che affioranti in superficie; inoltre la fusione degli inserti può considerarsi completa. A conferma di ciò, nel caso di un giunto saldato tra lamiere di tipo B, si riporta in fig. 13 un'immagine radiografica e le immagini fotografiche relative all'applicazione del metodo dei liquidi penetranti, dopo applicazione del liquido penetrante rosso e del rilevatore bianco.

### Indagini micrografiche e prove di microdurezza

Le indagini micrografiche e le prove di microdurezza Vickers sono state effettuate sulle sezioni saldate dopo preparazione metallografica. In entrambe le due tipologie di lamiere, la ZF presenta all'osservazione ottica una microstruttura marcatamente dendritica, esente da porosità e fessurazioni,

come mostrato in fig. 14 a) per un giunto saldato tra lamiere di tipo A.

La ZTA ha un'ampiezza intorno a 1 mm. Le regioni del metallo base (acciaio e lega di placcatura) nei pressi dei giunti sono sottoposte al ciclo termico di saldatura. Nell'acciaio le strutture che si formano sono strettamente dipendenti dal raggiungimento di temperature in grado di consentire una completa o parziale austenitizzazione. Come esempio, in fig. 14 si riportano le micrografie della ZF e della ZTA (lato acciaio ferritico) in un giunto di tipo A.

Le misure di microdurezza Vickers sono state effettuate sulle sezioni saldate lungo l'asse della ZF e lungo direzioni ad esso trasversali in modo da attraversare sia la ZF che la ZTA.

Gli andamenti della microdurezza Vickers lungo l'asse della ZF sono riportati in fig. 15 per le due diverse tipologie di lamiere. In entrambi i casi la microdurezza Vickers lungo l'asse della ZF presenta valori intorno ai 200 HV ed è caratterizzata da ampie fluttuazioni dovute alle disomogeneità strutturali conseguenti alle modalità di solidificazione.

I profili di microdurezza Vickers in direzione trasversale all'asse di saldatura, presentano valori ed andamenti diversi a seconda del materiale interessato. Nel caso dell'Alloy 59, la durezza subisce una certa diminuzione in corrispondenza della ZF; mentre nel caso del Monel 400 si mantiene abbastanza costante (fig. 16 a). Per quanto riguarda gli acciai di base, l'acciaio AISI 1010 presenta una ZTA con elevati picchi di durezza (circa 400HV) a ridosso del confine con la ZF (fig. 16 b), picchi che non si riscontrano nel caso dell'acciaio ferritico S235JRG2 essendo il carbonio pressoché assente.

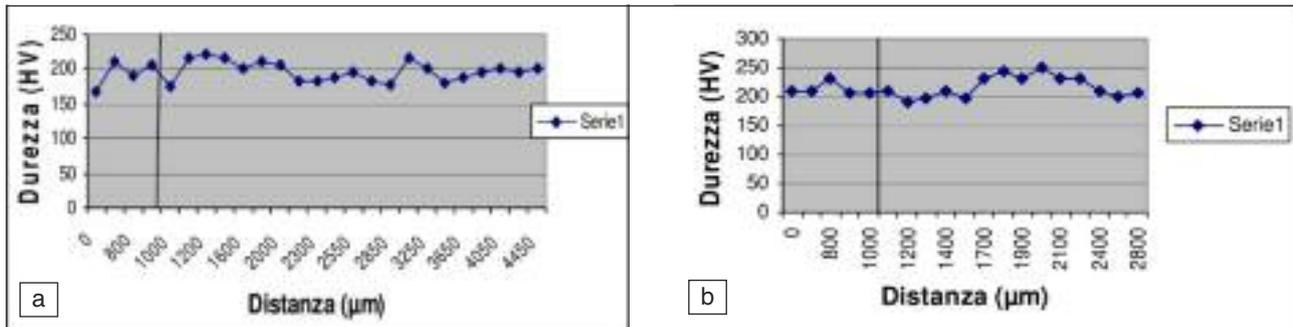


FIG. 15 **Andamento delle microdurezza Vickers lungo il cordone di saldatura: a) giunto tra lamiere tipo A, placcate con Alloy 59; b) giunto tra lamiere tipo B placcate con lega Monel 400.**

*Vickers microhardness behaviour along the welding axis: a) joint between A plates, clad by Alloy 59; b) joint between B plates, clad by Monel 400.*

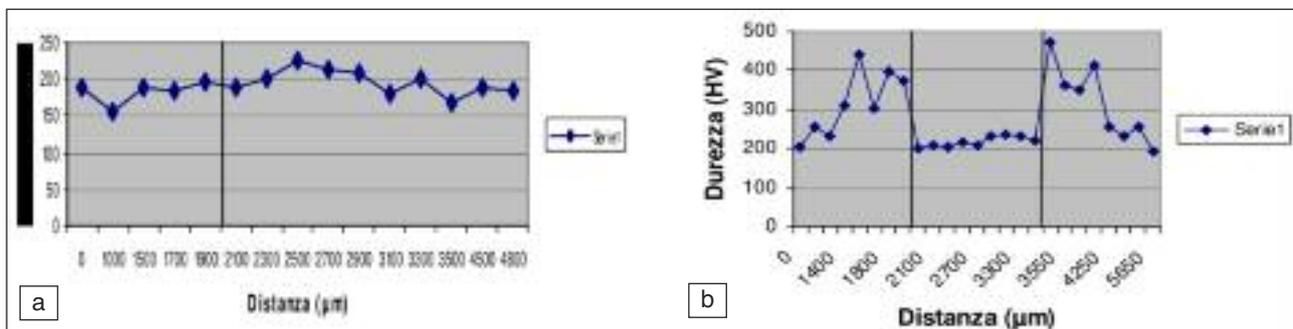


FIG. 16 **Andamento delle microdurezza Vickers, in una sezione saldata di tipo B, lungo direzioni trasversali rispetto al cordone di saldatura: a) microdurezza Vickers attraverso la ZF e la lega Monel 400; b) microdurezza Vickers attraverso la ZF e l'acciaio AISI 1010.**

*Vickers microhardness behaviour across welded section of a joint between B plates: a) Vickers microhardness on a traverse across FZ and Monel 400 clad alloy b) Vickers microhardness on a traverse across FZ and AISI 1010 steel.*

## Misure microanalitiche

Il bagno di fusione è costituito in parte dal metallo base e in parte dal metallo d'apporto in modo da realizzare solidificando la continuità metallica. La percentuale di Ni presente nella zona fusa del giunto dipende quindi dal grado di diluizione del materiale d'apporto (costituito da una lega ad alto tenore di Ni) con la lega della placcatura e con l'acciaio di base.

La valutazione della composizione chimica delle sezioni saldate è stata effettuata mediante misure EDS. L'analisi quantitativa è stata effettuata su aree significative di circa 500x500 µm<sup>2</sup>, in modo da compensare eventuali effetti dovuti a segregazione locale.

Malgrado l'inevitabile diluizione con l'acciaio al carbonio, i giunti esaminati hanno elevati tenori di elementi di lega: la presenza di Ni nella zona fusa è elevata, prossima a quella del materiale di placcatura. In particolare, con l'impiego di 2 inserti, il tenore di Ni misurato nel cordone, lato placcatura, è intorno al 55% per lamiere di tipo A e al 48% per lamiere di tipo B.

Un modo efficace per visualizzare qualitativamente la composizione di una determinata zona è quello di riportare la mappatura di ciascun elemento indagato mediante toni di grigio. Le figure 17 e 18 mostrano le mappature microanalitiche delle sezioni saldate: le immagini sono indicative di distribuzioni uniformi degli elementi considerati. La zona fusa è risultata omogenea e con valori di composizione soddisfacenti, prossimi a quelli della lega di placcatura, soprattutto nel caso di lamiere di tipo A. Nel caso di lamiere tipo B, l'insolubilità del rame nel ferro ne limita fortemente la partecipazione alla formazione del giunto.

## CONCLUSIONI

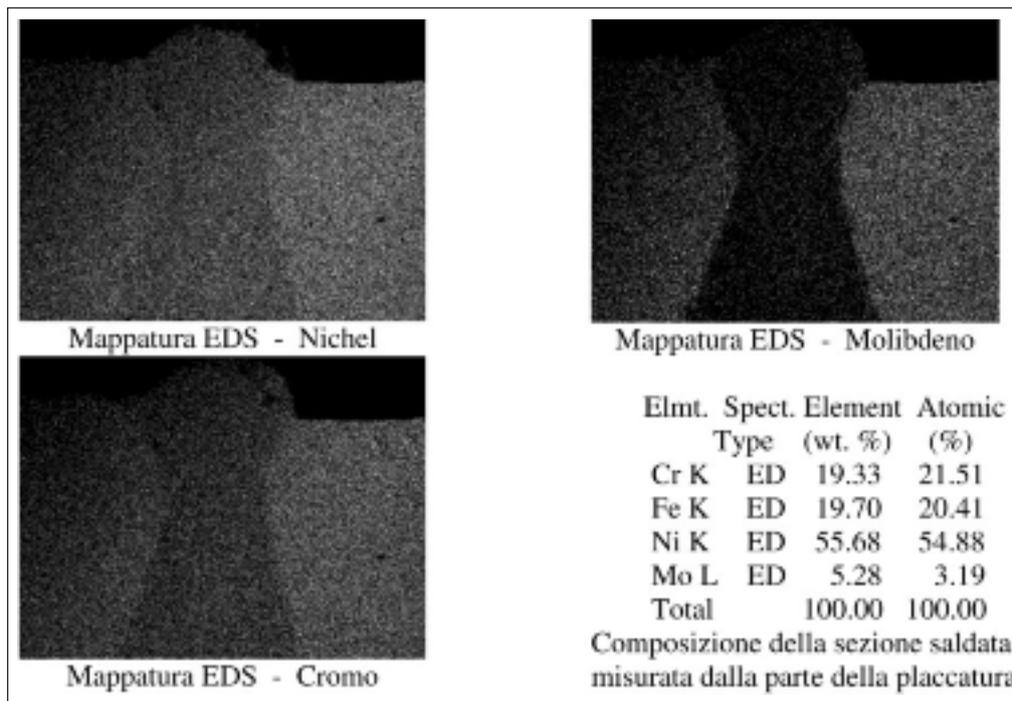
Il lavoro sperimentale ha mostrato la possibilità di realizzare la saldatura di lamiere in acciaio placcate con leghe a base di Ni (Alloy 59 e Monel 400) mediante procedimenti a fascio laser in un'unica passata, con impiego di inserti consumabili in lega ad alto tenore di Ni, senza la necessità di eseguire la cianfrinatura dei lembi.

Particolare cura è stata rivolta nella scelta della quantità e della tipologia del materiale d'apporto al fine di garantire, attraverso la diluizione con il metallo base, una composizione del giunto compatibile con quella dello strato di placcatura al fine di mantenere un buon comportamento alla corrosione. Sulla base delle osservazioni macrografiche e dei controlli non distruttivi, la messa a punto dei parametri operativi per entrambe le procedure ha fatto sì di ottenere giunti di buona qualità esenti da difetti superficiali e sub-superficiali.

Le sezioni saldate sono state studiate attraverso il rilievo delle microdurezze e della morfologia microstrutturale. I giunti sono risultati con buone caratteristiche metallurgiche e meccaniche. Le misure di microanalisi hanno confermato un'alta percentuale di Ni all'interno dei cordoni di saldatura, in grado di garantire una buona resistenza alla corrosione.

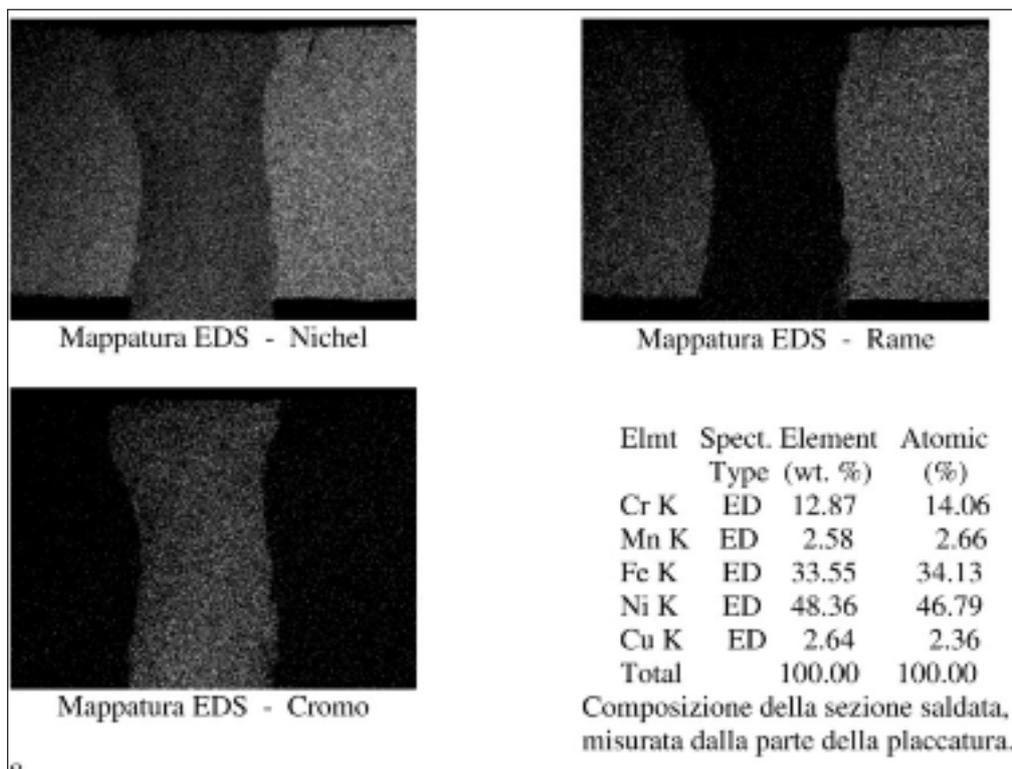
## BIBLIOGRAFIA

- 1) Decreto Legislativo n° 93 del 25 febbraio 2000 - "Attuazione della direttiva 97/23/CE in materia di attrezzature a pressione"
- 2) Decreto Ministeriale n° 329 del 01 dicembre 2004 - "Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'art.19 del decreto"



**FIG. 17**  
**Mappature EDS e composizione della ZF nei pressi della lega di placcatura, nel caso di lamiere di tipo A, placcate con Alloy 59.**

EDS Maps and FZ composition near clad alloy, for A plates (clad by Alloy 59).  
 EDS Map - Nickel  
 EDS Map - Molybdenum  
 EDS Map - Chromium  
 Welded section composition, measured on clad side.



**FIG. 18**  
**Mappature EDS e composizione della ZF nei pressi della lega di placcatura, nel caso di lamiere di tipo A, placcate con Monel 400.**

EDS Maps and FZ composition near clad alloy, for B plates (clad by Monel 400 alloy).  
 EDS Map - Nickel  
 EDS Map - Copper  
 EDS Map - Chromium  
 Welded section composition, measured on clad side.

legislativo 25/02/2000, n° 93"

- 3) Cam G. et al. "Determination of mechanical and fracture properties of laser beam welded steel joints", *Welding Journal*, V. 78, N. 6, 1999, pp. 193s-201s
- 4) Kalla G et al. "Heavy section laser beam welding of fine-grained structural steels", *Laser Technology and Applications*, p. 319, Ed. H. Kohler Vulkan-Verlag, Essen-Germany
- 5) S. Missori, A. Sili, "Structural characterization of C-Mn steel laser beam welded joints with powder filler metal", *Welding Journal*, V. 79, N. 11, 2000, pp. 317s - 323s
- 6) S. Missori, A.Sili, "Laser beam welding of steel plates using consumable inserts", *Welding International*, V. 19, N. 6, 2005, pp. 463-469
- 7) S. Missori, F. Murdolo, A. Sili, "Single-pass laser beam welding of clad steel plate", *Welding Journal*, V. 83, N. 2, 2004, pp. 65s-71s
- 8) S. Missori, A. Sili, "Tecnologie innovative per la saldatura a fascio laser in lamiere placcate", *Rivista Italiana della Saldatura*, n. 3, maggio/giugno 2006, pp.375-385
- 9) Voest-Alpine Stahl Linz, *Cladded Plates Catalogue*, (2000)
- 10) S. Missori, F. Murdolo, A. Sili, "Caratterizzazione delle interfacce in acciai placcati per laminazione a caldo con vari rivestimenti", *Giornate Nazionali sulla Corrosione e Protezione*, Messina 20-22 giugno 2007

## Abstract

### Laser beam welding of Ni alloy-clad steel plates

**Keywords:** steel, nickel and alloys, welding, metallography, electron microscopy, mechanical testing, non-destructive testing

Carbon steel plates, clad with high alloyed metals, are an economical solution to meet the increasing demand of cheap materials that combine good mechanical and corrosion resistance properties. These materials are useful in devices, such as pressure vessels, submitted to severe corrosive conditions on process side.

Carbon steel plates, clad with stainless steels or Ni alloys for 10-30% of the total thickness, are commonly produced by hot rolling, achieving remarkable cost reductions if compared to high alloyed massive plate.

To avoid leak of dangerous fluids or explosion of pressure vessels, as consequence of corrosive processes, the clad alloy thickness has to be periodically checked; particularly in the welded joint where, due to dilution effects of subsequent welding passes, composition might be different from the clad layer. So it is worth utilizing an high alloyed filler material for welding, in order to balance dilution effects. In previous works single pass laser beam welds were performed with high Ni alloyed filler metal in the shape of powder or strips, with the aim of obtaining melted volume smaller than the ones produced by the usual multi-pass welding procedures. In particular welding of steel plate clad with austenitic stainless steel were experimented, by means of one or two laser beams, or arc-laser combined processes.

In this work a single pass laser beam welding was developed and experimented on steel plates clad with two different Ni alloys. Characteristics of such process was the butt-welding of plates with squared edge preparation and consumable strips of high Ni alloy as filler material.

On welded joints were performed visual inspections and non destructive tests (penetrant liquid inspection and radiography); on the welded plates, cut transversally to have metallographic samples of the welded sections, were performed optical and scanning electron microscopy (SEM) observations, energy dispersive microanalysis (EDS) measurements and Vickers microhardness tests.

Two different sets of clad plates were considered.

- A plate: S235JRG2-EN 10025/94 ferritic steel clad with Monel alloy (compositions in table 1, metallurgical characteristics in figures 1 and 2, respectively for base and clad materials, particular of cladding interface in fig. 3).
- B plate: low carbon AISI 1010 steel clad with Alloy 59 (compositions in table 2, metallurgical characteristics in figures 4 and 5, respectively for base and clad materials, particular of cladding interface in fig. 6).

In a previous work the interface between clad and base metals was investigated and the thickness involved by microstructural changes evaluated as few hundreds of microns.

Traditional arc welding techniques of clad plates need more than one pass, on base and clad materials, as shown in the sketch of fig. 7. The single pass welding trials were performed by means of a CO<sub>2</sub> EL-EN - RTM laser (6 kW nominal power) equipped by a translating table, that supported plates with base materials on laser beam side (fig. 8).

As filler metal was utilized the Inconel 600 alloy (AWS ER Ni Cr3), with composition given in table 3, putting 1 or 2 strips (0.4 mm thick) between square edge plates.

Welding parameters are given in table 4. Figure 9 shows a joint with the welding points utilized to block plates before the welding trials.

Visual inspections showed joints with satisfactory appearance and good welding penetration on both sides of plates (fig. 10).

Macrographic observations of the welded section, after 2% Nital etching, showed the heat affected zone (HAZ) about 1 mm wide (fig. 11); moreover it is evident the complete fusion of filler metal strips and the fused zone (FZ) composition depends on dilution with base metal, that is steel and clad alloy. The FZ is characterized by a striped morphology due to the occurrence of solidification steps (fig. 12). As pointed out by non destructive tests, the obtained joints are sound, without inclusions and porosity. Figure 13 shows a radiographic image of a joint between B plates and two images after application of the red penetrating liquid and the white revealing liquid respectively

For both the A and B plates, optical micrographic observations showed in the FZ a well recognizable dendritic microstructure, without porosity and microcracks (fig. 14a); while the steel microstructures in the HAZ depends on the temperatures reached during the welding thermal cycle (fig. 14b).

Vickers microhardness survey are performed on welded section, along the ZF axis and traverse across ZF and ZTA. Vickers microhardness behaviours along the ZF axis are given in figure 15 for the A and B plates. For both the two sets of plates microhardness values are around 200 HV, with variation that can be ascribed to lack of homogeneity in the solidification structures.

Different microhardness behaviours were recorded along traverses, according to the different metals involved: for B plates, figure 16 shows the profile across the ZF and the Monel alloy (fig. 16 a) and the profile across the ZF and the AISI 1010 steel, that are characterized by relevant hardness peaks close to the fusion line (fig. 16 b); such peaks are not measured in the S235JRG2 ferritic steel, owing to the lack of carbon.

The Ni content inside the FZ depends on dilution grade among filler metal, steel base metal and clad alloy. FZ chemical composition was measured by means of EDS microanalysis, performed on areas wide about 500x500  $\mu$ m<sup>2</sup>, in order to measure average values and make negligible fluctuations due to local segregation. With the use of two strips, the Ni content (weight percent) in the FZ results very high on the clad alloy side: about 55% for A plate and 48% for B plate.

The EDS maps of the FZ are given in figures 17 and 18, respectively for A and B plates. The FZ composition results quite homogeneous, above all for Ni and Cr. For B plates, the lack of Cu in the FZ is due to its insolubility with Fe. Anyway the choice of an high Ni composition filler metal can assure satisfactory Ni content and good corrosion resistance on clad alloy side.