



Ricerca di Sistema elettrico

Tecniche di saldatura ad elevata efficienza per il settore ferroviario.

G. Barbieri, F. Cognini, M. Moncada, A. Tati

TECNICHE DI SALDATURA AD ELEVATA EFFICIENZA PER IL SETTORE FERROVIARIO.

G. Barbieri, F. Cognini, M. Moncada, A. Tati

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Razionalizzazione e Risparmio nell'uso Dell'ENERGIA ELETTRICA

Progetto: Prodotti e processi per il miglioramento dell'efficienza energetica nell'elettromobilità

Obiettivo: Sviluppo dei processi di produzione e caratterizzazione di componenti strutturali innovativi per la riduzione del peso dei veicoli a trazione elettrica

Responsabile del Progetto: Antonino Genovese, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 GENERALITÀ SULLA SALDATURA DELL'ALLUMINIO E SUE LEGHE.....	6
3 SALDABILITÀ DELL'ALLUMINIO E DELLE SUE LEGHE.....	9
3.1 DIFFICOLTÀ E NECESSITÀ ESECUTIVE DERIVANTI DALLE PROPRIETÀ FISICO-CHIMICHE DELL'ALLUMINIO.....	9
3.2 SOFFIATURE E POROSITÀ.....	10
3.3 CRICCABILITÀ.....	10
3.4 RESISTENZA ALLA CORROSIONE DEI GIUNTI SALDATI.....	11
4 PROCESSI DI SALDATURA DELL'AL E SUE LEGHE PIÙ COMUNI.....	11
4.1 LA SALDATURA AD ARCO CON SCHERMATURA DI GAS.....	11
4.1.1 <i>Vantaggi e svantaggi della saldatura TIG</i>	15
4.1.2 <i>Vantaggi e svantaggi della saldatura MIG</i>	15
5 TECNOLOGIE INNOVATIVE DI SALDATURA DELLE LEGHE DI ALLUMINIO.....	18
5.1 SALDATURA FRICTION STIR WELDING.....	18
5.2 SALDATURA PLAMA-TIG.....	20
6 SALDATURA CON NUOVE SORGENTI LASER.....	27
6.1 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DELLA NUOVE SORGENTI LASER IN FIBRA AD ELEVATA EFFICIENZA.....	27
FIBRA DI TRASPORTO DEL FASCIO.....	28
6.1.1 <i>Confronto con altri tipi di laser a stato solido</i>	28
6.2 ATTIVITÀ SPERIMENTALI.....	29
7 CONCLUSIONI.....	32
8 BIBLIOGRAFIA.....	33
9 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	33

Sommario

Il lavoro è suddiviso in tre parti. Una prima parte introduttiva che descrive brevemente le tecnologie di saldatura nel settore ferroviario con particolare riguardo alla saldatura delle leghe di alluminio e quindi della parti delle carrozze ferroviarie strutturali e non strutturali ad eccezione dei componenti primari quali i carrelli e di quei componenti la cui classe di performance (CP) sia superiore alla CP B secondo la ISO 15085-3. Una seconda parte, descrive tecniche ad elevata efficienza di derivazione aeronautica/aerospaziale ancora poco utilizzate per il settore ferroviario che ha portato all'acquisizione dei componenti per un impianto prototipale di saldatura Plasma presso il CR Casaccia. La terza parte che riguarda le ultime innovazioni nel settore della saldatura laser a prosecuzione della attività svolte nel corso dei precedenti PAR, grazie alla gentile collaborazione dell'azienda Tube Tech Machinery che, in qualità di socio del Consorzio CALEF partecipato da ENEA, ha messo a disposizione a titolo completamente gratuito un nuovo impianto di saldatura dotato di una nuova sorgente laser in fibra ad elevata brillantezza che ha permesso da un lato di validare ulteriormente i risultati sulla saldatura laser ottenuti con sorgente Nd-YAG ENEA di vecchia generazione sia di pannelli AFS sia di leghe di alluminio della serie 6xxx, dall'altra di aprire una nuova finestra sulla qualità della saldatura laser delle leghe di alluminio grazie all'impiego della testa Wobling a rotazione circolare dello spot focale interamente sviluppata in Italia dalla IPG Photonics.

1 Introduzione

Nel settore ferroviario, l'applicazione delle leghe di alluminio risale agli anni 70 e, nella successiva decade, lo sviluppo delle tecniche di estrusione di forme complesse di elevata dimensione a spessore sottile ha portato alla realizzazione di numerosi treni in varie leghe di alluminio (AA6005 T6, AA6082 T6). Infatti, la ricerca di maggiore velocità e maggiore efficienza nel trasporto ferroviario negli ultimi anni ha portato i maggiori costruttori di treni all'impiego di leghe di alluminio che ormai costituiscono quasi interamente sotto forma di grandi estrusi la carrozzeria dei vagoni ferroviari [1] [2].

A livello mondiale l'impiego di estrusi modulari in lega di alluminio per la realizzazione di treni ad alta velocità è ormai una prassi consolidata vedi i progetti del TGV e TGV Duplex Francesi, ICE tedesco, i treni della TALGO spagnola, che coinvolgono le principali aziende del settore: Alstom, Ansaldo Breda, Siemens e TALGO. La figura seguente mostra uno studio per la realizzazione della carrozza ferroviaria interamente con estrusi di lega di alluminio che nella maggior parte dei casi vengono ancora oggi saldati con processi MIG automatizzati e manuali.

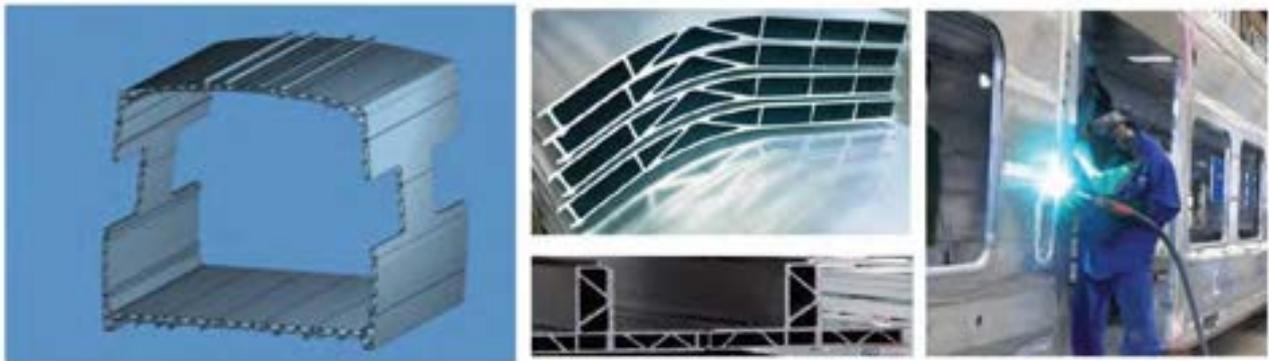


Figura 1: realizzazione di carrozze ferroviarie con assemblaggio per saldatura di grandi profilati estrusi

Restando all'Italia, vedi figura seguente, senza tornare troppo indietro negli anni, a partire dal vecchio pendolino ETR460 si è passati dall'ETR 500 fino ad arrivare al superveloce AnsaldoBreda ETR1000 la cui velocità di omologazione raggiunge i 360 Km/h.



Figura 2: principali treni ad alta velocità diffusi sul territorio italiano che utilizzano larghe quantità di leghe di alluminio

2 Generalità sulla saldatura dell'alluminio e sue leghe

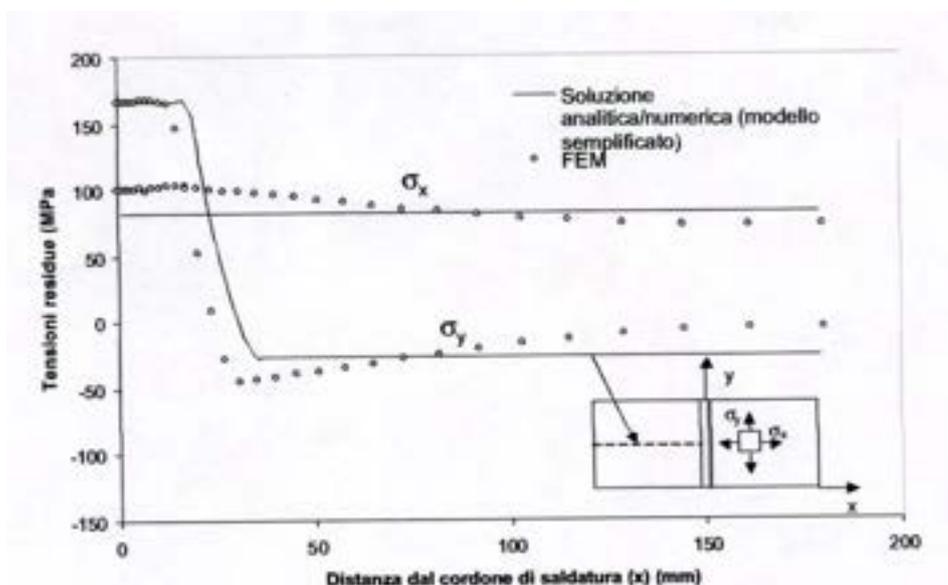
La saldatura rappresenta uno dei più importanti processi tecnologici di giunzione. Si pone in alternativa a sistemi come la rivettatura, la chiodatura, l'incollaggio e rispetto ad ognuno di essi presenta notevoli aspetti positivi, ma al contempo inconvenienti che ne hanno limitato l'impiego sino ad oggi, almeno nelle applicazioni strutturali dell'alluminio.

Rispetto ai sistemi "meccanici", la saldatura in generale risulta vantaggiosa sia dal punto di vista economico, sia per quanto riguarda le prestazioni del giunto. Più in dettaglio, tali vantaggi sono:

- La velocità del processo: permette di risparmiare ore di lavoro e quindi rendere economicamente competitivo il sistema di giunzione;
- L'automatizzazione: molte delle tecniche di saldatura recentemente introdotte sono studiate per essere in parte o del tutto automatizzabili e per essere gestite da macchine a controllo numerico, consentendo così un elevato ritmo di produzione, un'alta precisione e riproducibilità del processo;
- La leggerezza: garantita dal fatto che non vengono inseriti nella struttura, in particolare nei processi di saldatura autogena, elementi estranei come chiodi e rivetti, talvolta ad elevato peso specifico. Questo aspetto è estremamente importante per applicazioni in campo aeronautico e nei trasporti;
- La monoliticità: i due pezzi, anche se realizzati in materiali differenti, sono portati a fusione e solidificando acquisiscono una struttura "unitaria";

Purtroppo, nella fase di raffreddamento durante la saldatura, gli elevati gradienti termici generano tensioni residue in prossimità del cordone. L'intensità di tali tensioni può risultare rilevante per il comportamento meccanico del componente saldato: in particolare possono fortemente ridurre la resistenza a fatica, a frattura, alla corrosione sotto sforzo e produrre "strutture instabili". Portare a livelli accettabili le tensioni residue è possibile tramite una corretta scelta dei parametri di processo. Sfortunatamente, una valutazione dello stato termico e delle tensioni residue associate risulta molto difficile, vista la complessità del fenomeno da cui queste ultime prendono origine.

Recentemente si sono introdotti metodi di calcolo basati su soluzioni analitico-numeriche o agli Elementi Finiti (F.E.M.) e i risultati sembrano promettenti. A titolo di esempio, in Figura 3 è rappresentato l'andamento delle tensioni residue (σ_x , σ_y) dovute al processo di saldatura di piastre in lega di alluminio AA6082 saldate testa a testa [3]. I parametri di esecuzione del giunto sono riportati nella Tabella 1.



Materiale	Al-6082
Tecnica di saldatura	MIG*
Voltaggio	23.4 V
Intensità di corrente	170 A
Velocità di passata	11 mm/s
Diametro del filo d'apporto	1.2 mm
Numero di passate	1
Gas di copertura	Argon

* Metal Inert Gas, saldatura ad arco con elettrodo consumabile

Tabella 1: parametri di processo [4]

Dal punto di vista strutturale, l'insorgere di sollecitazioni interne è legato essenzialmente all'elevato flusso di energia termica necessario per portare a fusione il materiale. Ovviamente, la temperatura raggiunge un picco lungo il percorso di saldatura in corrispondenza del metallo fuso, "weld pool" (Figura 4) [3], e la regione circostante presenta profili decrescenti di temperatura (dissipazione radiale del calore per conduzione) equivalenti in pratica a trattamenti termici che influenzano la struttura finale del materiale. Ci si trova quindi una Zona Termicamente Alterata (ZTA o HAZ nell'accezione anglosassone, Heat Affected Zone) che sovente, e a causa delle modificazioni morfologiche (strutturali) indotte, risulta la zona più indebolita del giunto. Infatti, mentre la Zona Fusa presenta un grano fine dovuto agli elevati gradienti termici a cui è stata soggetta, e presenta anzi il rischio di infragilimento legato a fenomeni di tempra, nella ZTA il grano aumenta di dimensione. Inoltre, nelle soluzioni sovrassature si osservano fenomeni di precipitazione e le fasi precipitate aumentano di volume cambiando la propria morfologia. Il "coarsening" del grano e dei precipitati riducono in modo sostanziale le caratteristiche meccaniche della ZTA e del giunto nel suo insieme.

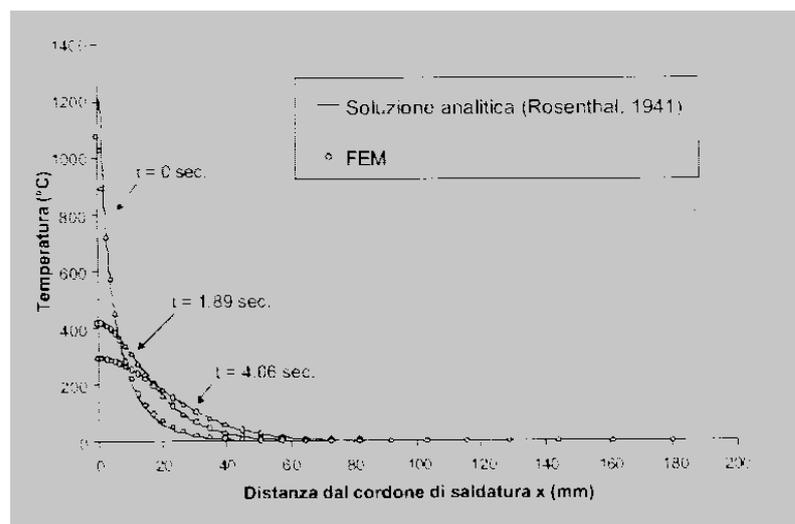


Figura 4: soluzione analitica e FEM del campo di temperatura indotto dal processo di saldatura

I metodi di saldatura con sorgenti ad elevata densità di energia (fascio elettronico o laser), permettono di ottenere la fusione con un apporto termico molto ridotto rispetto alle tecniche tradizionali (Figura 5), quindi una Zona Termicamente Alterata più contenuta. Utilizzando la tecnica della saldatura a fascio elettronico, che descriveremo più dettagliatamente nel capitolo successivo, si ha una densità di potenza

dell'ordine di 10^5 - 10^8 W/cm² (Tabella 2), valore che consente la saldatura per fusione di un grande numero di materiali, anche quelli tradizionalmente ritenuti "poco" saldabili.

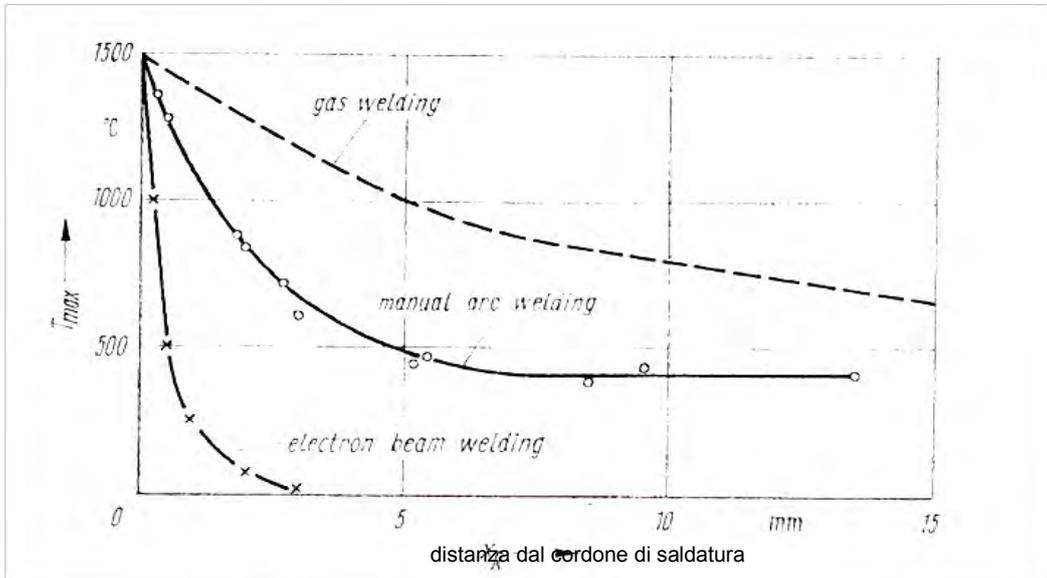


Figura 5: distribuzione della temperatura per diverse tecniche di saldatura [11]

Processo di Saldatura	Intensità di energia W/cm ²	Efficienza di giunzione mm ² /kJ
Ossiacetilenica	$10^2 - 10^3$	0.2 – 0.5
GTAW* , GMAW*	$5 \cdot 10^2 - 10^4$	2 – 4
Al Plasma	$10^3 - 10^6$	5 – 10
Fascio Laser (LBW*)	$10^5 - 10^7$	15 – 25
Fascio Elettronico (EBW*)	$10^5 - 10^8$	20 – 30

GTAW*, Gas Tungsten Arc Welding, GMAW*, Gas Metal Arc Welding
LBW*, Laser Beam Welding, EBW*, Electron Beam Welding

Tabella 2: densità di potenza ed efficienza di giunzione dei processo di saldatura [5]

L'impiego di sorgenti ad alta densità di energia, in ordine Plasma, Laser e fascio elettronico permettono di realizzare saldatura key-hole ad alta velocità e con ridotta propagazione del calore. Questi effetti sono particolarmente positivi sulle leghe di alluminio in quanto, data l'elevata conducibilità termica di questo materiale e l'elevato coefficiente di dilatazione termica permettono di ridurre l'ampiezza della zona alterata dalla saldatura (ZF e ZTA) e ridurre le deformazioni. La rapidità del processo e la severità del ciclo termico induce tuttavia l'insorgere di forti tensioni residue che possono condurre a cricatura macroscopica. L'input termico del processo di saldatura introduce quindi una serie di difetti che è necessario minimizzare per ottenere delle saldature di qualità soddisfacente e ridurre i costi derivanti dalla loro eliminazione. I principali difetti che si presentano sono di norma:

- Distorsioni del pezzo;
- Aumento degli stress interni residui se il pezzo è vincolato rigidamente;
- Trasformazioni di fase;
- Microstrutture indesiderate;
- Suscettibilità alla corrosione;
- Inclusioni, porosità, criccate a caldo e a freddo;
- Caratteristiche meccaniche del giunto inferiori a quelle del metallo base.

3 Saldabilità dell'alluminio e delle sue leghe

Oltre alle difficoltà intrinseche descritte nel paragrafo precedente, e comuni in genere a qualsiasi metallo, dobbiamo aggiungere la particolare natura dell'alluminio, da sempre considerato un materiale ostico sotto l'aspetto saldabilità. L'alluminio possiede un certo numero di proprietà che rendono la sua saldatura differente da quella di altri materiali, ad esempio gli acciai. Esse sono:

- Presenza superficiale di uno strato (layer) di ossido di alluminio (Al_2O_3 alto-fondente $TF=2050\text{ °C}$)
- Alta conducibilità termica
- Alto coefficiente di espansione termica lineare
- Bassa temperatura di fusione
- Assenza di cambiamenti cromatici (colore) all'avvicinarsi della temperatura al punto di fusione

3.1 Difficoltà e necessità esecutive derivanti dalle proprietà fisico-chimiche dell'alluminio

L'alluminio è un metallo chimicamente attivo e reagisce con l'ossigeno atmosferico per produrre una pellicola sottile, consistente e dura di ossido di alluminio sulla superficie del pezzo. L'ossido di alluminio (Allumina) fonde a circa 2050 °C , una temperatura grossomodo equivalente a tre volte quella di fusione dell'alluminio puro (circa 660 °C).

A temperature elevate la pellicola di Al_2O_3 che ricopre le superfici tende ad aumentare in spessore e la sua completa rimozione risulta alquanto difficile. Per tale motivo, lo strato di ossido deve essere rimosso prima del processo di saldatura. Infatti, qualora non venisse completamente eliminato, piccole particelle di ossido allo stato solido rimarrebbero intrappolate nel metallo fuso, dando luogo ad una riduzione della duttilità (presenza di inclusioni), mancanza di fusione e, se la loro frazione volumetrica risultasse eccessiva, portare direttamente a rottura il giunto saldato. Per le leghe contenenti Mg, l'inconveniente è ancora più marcato, vista la forte affinità con l'ossigeno di questo elemento alligante.

La pellicola può essere rimossa con mezzi meccanici, chimici o elettrici. La rimozione meccanica comprende metodi quali la raschiatura con uno strumento affilato, carta smeriglio, spazzola metallica (di acciaio inossidabile) od altri metodi meccanici come la sabbiatura. La rimozione chimica viene effettuata immergendo i pezzi in un'opportuna soluzione (alcalina) di decapaggio e successivo risciacquo. Talvolta si utilizza una serie di attacchi con soluzioni di differente composizione.

Il sistema di rimozione elettrica dell'ossido, è basato sul bombardamento catodico (sabbiatura ionica). Il bombardamento catodico avviene durante il semi ciclo della saldatura elettrica ad arco con elettrodo non fusibile (GTAW o TIG) utilizzando corrente alternata e collegando l'elettrodo al positivo (polarità inversa). Questa è una metodologia estremamente efficace per distruggere lo strato di ossido e lasciare una superficie pulita. Tale effetto distruttivo ha reso il metodo TIG, a corrente alternata, una tecnica molto diffusa per saldare l'alluminio.

L'elevata conducibilità termica delle leghe di alluminio (da tre a cinque volte maggiore di quella dell'acciaio) provoca un notevole assorbimento di calore da parte del materiale base, assorbimento esteso ad un'ampia zona, con possibile riduzione delle caratteristiche meccaniche del giunto saldato e con severe deformazioni dei pezzi. Inoltre, il forte apporto di calore necessario per evitare fusioni parziali e incollature, può provocare il difetto opposto, ovvero lo sfondamento del giunto. Il fenomeno è conseguenza della forte

conducibilità termica che tende ad allargare rapidamente l'area interessata alla fusione una volta che quest'ultima sia stata innescata.

La saldatura dell'alluminio e delle sue leghe richiede quindi l'utilizzo di tecniche ad alta velocità e con sorgenti di calore potenti e concentrate che, riducendo l'estensione della zona riscaldata, attenuino gli inconvenienti sopra menzionati.

3.2 Soffiature e porosità

Un fenomeno che di frequente si riscontra nella saldature delle leghe leggere è la formazione di soffiature e porosità, evento caratteristico che incide su molti aspetti della loro saldabilità. L'insorgenza di tali difetti è limitata nel caso dell'alluminio puro, ma è alquanto estesa e deleteria nelle sue leghe, e, come vedremo, specialmente quelle con il magnesio come principale elemento alligante.

La causa principale delle soffiature è da attribuirsi all'idrogeno la cui solubilità nell'alluminio è molto limitata allo stato solido, ma cresce notevolmente con la temperatura e sale a valori molto elevati allo stato liquido.

La molecola H_2 si dissolve rapidamente nell'alluminio fuso e l'alta temperatura del bagno ne permette l'assorbimento in rilevanti quantità. All'atto del raffreddamento, la solubilità cala bruscamente sino ad un valore di $0.69 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ e dopo solidificazione si scende a $0.036 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$. Tutto l'idrogeno in eccesso dal limite di solubilità, va quindi ad aggregarsi formando porosità. L'unico modo per limitare l'insorgere di questa porosità, è ridurre al minimo le fonti che lo possano portare in soluzione nel bagno. Le principali sorgenti di idrogeno sono l'umidità presente nell'aria e adsorbita alla superficie del pezzo, quello contenuto nel gas di schermatura ed in tutte le sostanze idrogenate (oli, grassi e la sporcizia in genere presente in ogni officina).

Il gas di schermatura è usato quindi, non solo per proteggere il metallo, che ad alta temperatura si combinerebbe formando uno strato di allumina galleggiante sul bagno fuso, ma anche per impedire all'idrogeno e all'umidità atmosferica di penetrare in quantità nella saldatura. Una schermatura totale è comunque di difficile realizzazione ed anche nei gas definiti ad alta purezza non si ha la garanzia assoluta che non vi siano tracce di H_2 [6] [7] [8].

Se durante la solidificazione di un lingotto si formano cavità interne o cricche derivanti dal ritiro, tali discontinuità si trasformano per effetto della laminazione, od altra operazione di produzione del semilavorato, in numerose piccole cavità, talvolta interconnesse, che possono contenere gas (specialmente idrogeno) in pressione. Durante la saldatura, nella zona termicamente alterata la pressione del gas contenuto nelle cavità aumenta ed altro idrogeno può essere assorbito. Di conseguenza il materiale tende a dilatarsi ed ai lati del cordone di saldatura si può manifestare anche un piccolo, caratteristico rigonfiamento.

La ZTA., specie nel tratto di transizione con la zona fusa, è generalmente quella più soggetta a soffiature, difetti che si presentano come porosità diffuse o anche grandi cavità. Come accennato, le soffiature sembrano particolarmente favorite nelle leghe al Mg dall'innesco della reazione $H_2O + Mg \rightarrow MgO + H_2$, accompagnata da notevole diffusione di H atomico nel materiale. Soffiature si possono pure riscontrare nella zona fusa, specialmente se si impiegano procedimenti caratterizzati da un rapidissimo raffreddamento del bagno di fusione.

3.3 Criccabilità

Molte leghe leggere industriali presentano durante la saldatura una tendenza più o meno spiccata a formare cricche sia a caldo (a temperature prossime a quelle del solidus), che nelle fasi finali di raffreddamento. Le cricche a caldo si formano nella zona di fusione alla fine del processo di solidificazione e sono il risultato dell'incapacità del materiale, in fase semi solida, di assorbire le tensioni dovute al ritiro della saldatura al momento della solidificazione e del successivo raffreddamento. Se l'accomodamento della struttura è impedito da un sistema di bloccaggio rigido esterno, le fratture si innescano partendo da siti ove siano presenti perturbazioni strutturali che agiscono da veri e propri fattori di intensificazione di sforzo. In generale, tali perturbazioni, o difetti di volume, sono costituiti da inclusioni fragili, come quelle di

Al_2O_3 (dovute a una non adeguata protezione del bagno), da bordi di grano con precipitati o da regioni interdendritiche ancora parzialmente bagnate dalla fase a più basso punto di fusione.

Le leghe d'alluminio sono caratterizzate da un notevole ritiro di solidificazione, pari a circa il 6% in volume, comportamento che favorisce la criccabilità al raffreddamento. Questa problematica è particolarmente sentita nelle leghe della serie 6xxx ed in generale in tutte le leghe le cui caratteristiche vengono migliorate attraverso trattamenti termici. Dal punto di vista meccanico, una elevata duttilità è generalmente sinonimo di elevata tenacità a frattura, caratteristica che consente al metallo di "assorbire" gli stress associati al ritiro ed impedire la propagazione della cricca.

E' stato sperimentalmente osservato che le leghe Al-Mg-Si sono soggette a hot cracking quando il contenuto in Mg è compreso tra lo 0.5 ed il 2.5%. La suscettibilità a criccatura diminuisce per concentrazioni maggiori. Tuttavia, occorre tenere conto della volatilità del metallo alligante: una consistente frazione di Mg può andare persa per evaporazione durante la saldatura a causa del suo basso punto di ebollizione (circa 1110°C). La riduzione del contenuto di magnesio nella ZF è da tenere in considerazione in particolare per processi ad elevata densità di energia, tuttavia in generale le leghe della serie 6xxx vengono saldate con materiali di apporto ricchi di Mg (AA5183) o Si (AA4043) che permettono di realizzare una ZF meno suscettibile a criccate a caldo.

3.4 Resistenza alla corrosione dei giunti saldati

La saldatura può portare una diminuzione di resistenza alla corrosione nei giunti saldati, una sensibile riduzione se comparata alla resistenza propria del metallo (o metalli) che costituisce il materiale base del giunto. Le cause di tale deterioramento sono di natura elettrochimica.

Il giunto saldato può contenere (e contiene nella stragrande maggioranza dei casi) notevoli concentrazioni di impurezze o di composti segregati al bordo dei grani, sia nella zona fusa che in quella termicamente alterata; tali precipitazioni, come la fase β Mg_2Al_3 delle leghe Al-Mg e il composto Al_2Cu , presentano un potenziale elettrochimico diverso dalle soluzioni solide circostanti (coppia bimetallica), e possono favorire la corrosione intergranulare, specialmente sotto l'azione congiunta e continuata delle tensioni di ritiro (SCC, Stress Corrosion Cracking).

Infine, la presenza di soffiature o di cricche superficiali può costituire un pericoloso innesco alla corrosione [8] [9] [10].

4 Processi di saldatura dell'Al e sue leghe più comuni

Le tecniche di saldatura più comunemente usate per saldare l'alluminio e le sue leghe sono basate attualmente sull'impiego di un arco elettrico, e le più diffuse sono certamente quelle che utilizzano la schermatura del bagno fuso tramite un flusso di gas inerte. Di quest'ultime daremo un quadro conciso nel paragrafo che segue.

4.1 La saldatura ad arco con schermatura di gas

Tutti i metodi di saldatura basati sull'arco elettrico sfruttano lo stesso principio. Un arco elettrico viene a crearsi nel gioco (gap) presente tra elettrodo e pezzo in lavorazione per la differenza di potenziale esistente tra le due componenti. L'arco è caratterizzato da altissime temperature (nel "core" si ottengono circa 10000°C) [11] e forma un plasma, una miscela di atomi ionizzati ed elettroni liberi. L'elettrodo viene scaldato dalla corrente elettrica che lo attraversa per effetto Joule e per il calore irraggiato dall'arco. Una parte del calore viene trasportata dal plasma sino al metallo da saldare, causandone la fusione parziale e localizzata.

Nel metodo Gas-Shielded Arc Welding (GSAW) la protezione del bagno fuso (weld pool) viene assicurata da un flusso di gas. Tale schermatura fornisce non solo un migliore aspetto del giunto ma anche, e soprattutto, un giunto non inquinato da inclusioni provenienti dalla reazione metallo-elementi contenuti nell'atmosfera dell'ambiente.

Esistono fondamentalmente due metodi per la realizzazione di un giunto saldato tramite la tecnica GSAW:

- Il Gas Tungsten Arc Welding (GTAW, più popolarmente conosciuto come TIG, Tungsten Inert Gas)
- Il Gas Metal Arc Welding (GMAW, più noto come MIG, Metal Inert Gas)

La Figura 6 schematizza i due processi di saldatura ad arco più tradizionali

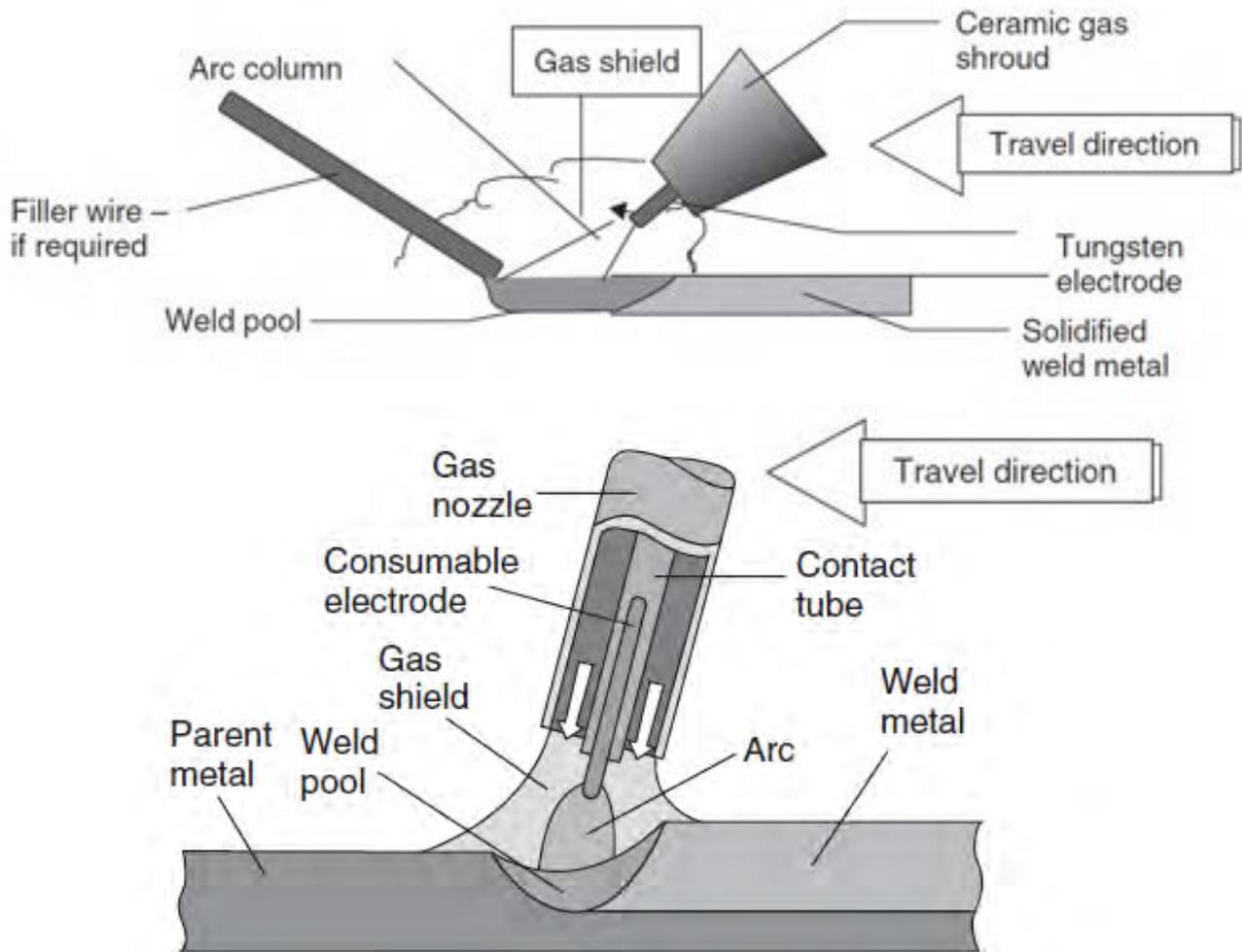


Figura 6: Schematizzazione dei processi di saldatura MIG e TIG [12]

Il TIG (introdotto negli anni 1930) ed il MIG (1948) presentano moltissimi punti in comune, ad esempio gran parte dei componenti dell'equipaggiamento base. Entrambi necessitano di un generatore di corrente, di sistemi di regolazione, di una rete di canalizzazione per il gas di protezione, di un flusso di acqua di raffreddamento per l'elettrodo (TIG) o della pistola di saldatura, "welding gun" (MIG).

La grande differenza risiede nella natura dell'elettrodo. Nel metodo TIG, questo componente è realizzato in materiale refrattario ad altissimo punto di fusione, tungsteno o tungsteno toriato, ed è, salvo incidenti, "inconsumabile". Nella tecnica MIG, l'elettrodo è invece formato da un filo o barretta dello stesso metallo da saldare (in genere) che fornisce materiale d'apporto per la realizzazione del giunto. L'alimentazione del filo è assicurata da un sistema automatizzato che tiene conto della velocità di saldatura e del rateo di fusione del materiale da riportare.

Il metodo TIG può essere utilizzato senza o con "filler metal" (metallo d'apporto); nella prima evenienza gli spessori saldabili (da 3 a 8 mm) sono limitati dalle caratteristiche dell'impianto (caratteristiche elettriche, potenza) e dalle proprietà del metallo da giuntare (conduttività termica, calore specifico, punto di fusione, calore latente di fusione), ed il processo viene portato a compimento con una sola passata (run) o, se

necessario, con due (ripresa al rovescio). Con l'impiego di materiale d'apporto e con un congruo numero di passate non esistono praticamente limiti agli spessori saldabili.

Per entrambe le metodologie di giunzione, di norma, per la saldatura degli acciai e delle leghe di nickel, si utilizza un generatore a corrente continua con l'elettrodo collegato al polo negativo. Tale configurazione viene definita a polarità diretta ed è conosciuta con l'acronimo c.c.p.d. (corrente continua polarità diretta). Essendo l'alluminio e le sue leghe l'oggetto del presente lavoro, occorre notare come l'utilizzo del metodo TIG con configurazione c.c.p.d. sia molto poco adatto per la saldatura di questi materiali.

Con i metodi GSAW, la protezione del cordone è esercitata da un flusso di gas, argon di norma, che impedisce all'aria circostante di entrare in contatto con il bagno fuso e prevenire così la possibilità di ossidazione del metallo. Ma l'alta conducibilità dell'alluminio riscalda notevolmente il metallo, anche in zone lontane dalla sorgente termica di saldatura. Di conseguenza, al di fuori della corrente protettiva, il metallo base reagisce e si ricopre di una pellicola di Al_2O_3 .

La rottura di questa pellicola richiederebbe la polarità inversa (c.c.p.i), flusso ionico in direzione metallo-elettrodo, purtroppo tale configurazione è da evitarsi per non danneggiare l'elettrodo che si riscalderebbe in modo eccessivo, sino a raggiungere la fusione parziale con conseguente gocciolio di W nel bagno di saldatura. L'inconveniente viene eliminato usando una macchina a corrente alternata (50 Hz) con scintilla pilota ad alta frequenza (sino a 1 MHz). In Figura 7 è stato tracciato uno schema che illustra in modo approssimato, ma significativo, le varie configurazioni operative ed i flussi termici caratteristici. Tuttavia per incrementare l'efficienza di saldatura va osservato che oggi sono disponibili sul mercato una serie di generatori Inverter in grado non soltanto di variare la frequenza, frequenza fino a 200 Hz sono ormai abbastanza comuni, ma anche di variare forma d'onda e l'ampiezza dei picchi in modo da ottimizzare l'effetto di sabbiatura ionica rispetto all'effetto termico. In generale come vedremo più in dettaglio la forma d'onda ottimale per la saldatura delle leghe di alluminio è 30(+)/70(-) in questo modo si ha un sufficiente effetto di sabbiatura ionica, ed una quantità di calore trasferita al pezzo del 70% contro il 50% della classica saldatura in corrente alternata che garantisce una maggiore durata dell'elettrodo, una maggiore efficienza del processo.

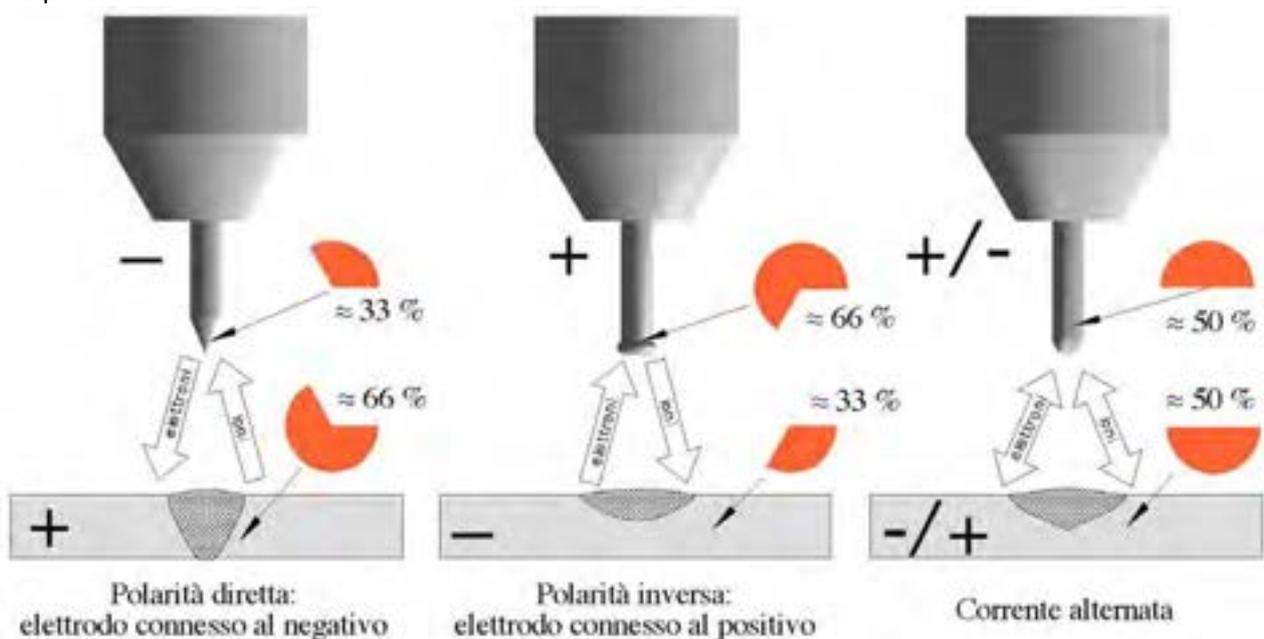


Figura 7: configurazioni di connessione/alimentazione e distribuzione dell'energia termica per il metodo GTAW

Ovviamente, essendo la fusione dell'elettrodo il fenomeno atteso nel procedimento GMAW (MIG), il collegamento c.c.p.i. risulta la configurazione principe per tale metodo di saldatura. Rispetto al procedimento TIG si realizzano maggiori velocità di esecuzione, e simultaneamente si riduce l'estensione della zona termicamente alterata.

Il raffreddamento risulta più veloce, quindi si riscontrano minori pericoli di criccabilità ma sono più frequenti difetti di mancanza di fusione, inclusioni di ossido, soffiature e porosità. Il GMAW richiede essenzialmente l'uso di materiali ben puliti e una accurata messa a punto dei parametri saldatura.

Si è constatato che la velocità di fusione del filo è direttamente proporzionale alla corrente e che per un dato diametro di filo esiste una corrente minima al disotto della quale l'arco diviene instabile; segue un certo campo di funzionamento "ottimale" oltre il quale i bordi del cordone di saldatura cominciano ad assumere un aspetto irregolare e ad un ulteriore innalzamento della corrente si formano incisioni marginali. Per quanto riguarda la tensione all'arco, il campo fra i 24 e i 30 V permette soddisfacenti condizioni di processo con arco stabile ed esente da spruzzi. Il trasporto del metallo attraverso l'arco si effettua sotto forma di goccioline tanto più piccole quanto più elevata è la corrente. Con tale tecnica, anche elementi di lega altamente ossidabili, quali ad esempio il Ti, Mg e Mn, vengono trasferiti attraverso l'arco al bagno di fusione senza sensibili perdite.

La fusione del filo d'apporto nel processo MIG avviene essenzialmente per effetto Joule ed il processo in condizioni standard di saldatura in corrente continua avviene con il cosiddetto processo di autostabilità dell'arco di fusione. Questo è il motivo perché in generale questo processo è di facile apprendimento per l'operatore che operando sul controllo del filo, entro il range di funzionamento del generatore della saldatrice, induce automaticamente un cambiamento nella corrente di saldatura. In funzione della corrente di saldatura il procedimento MIG, ha tre condizioni di funzionamento: short-arc, globular e spray. Il primo è l'ultimo sono le condizioni di funzionamento che a seconda delle necessità sono desiderati mentre la condizione intermedia è usualmente indesiderata in quanto non permette di controllare la direzione delle gocce di fuso che sono grandi e tendono a formare spatter. Resta anche in questo caso da ricordare che l'introduzione anche in questo caso di generatori inverter a microprocessore ha reso disponibili una serie di programmi di saldatura pulsati (pulsed) che permettono di saldare con forme d'onda specifiche i vari materiali semplificando anche la saldatura delle leghe di alluminio.

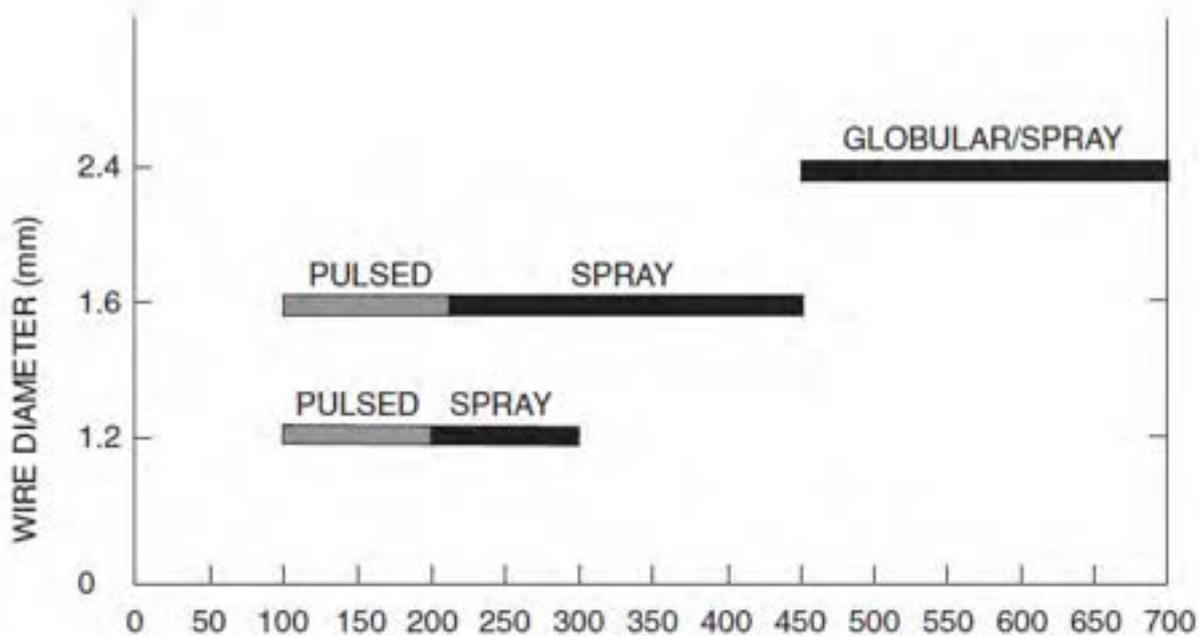


Figura 8: Modalità e correnti tipiche di saldatura per leghe di alluminio con processo MIG [12]

Rimane da dire che il procedimento di saldatura in argon con elettrodo non fusibile è impiegato sia sotto forma di procedimento manuale che automatizzato. L'automazione rende necessaria una più precisa preparazione dei lembi, ma permette di raggiungere maggiori velocità esecutive e di ottenere la massima uniformità di giunzione.

4.1.1 Vantaggi e svantaggi della saldatura TIG

- la qualità estetica del giunto finale è nettamente superiore a quella ottenuta in MIG, non sono presenti spruzzi ed è quindi possibile utilizzare il prodotto direttamente senza operazioni di pulitura (ad esempio se va verniciato), questo rende il TIG largamente utilizzato per la saldatura di telai di moto, bici e di tutto ciò che presenta saldature a vista che richiedono una buona qualità visiva.
- il procedimento TIG presenta un arco più concentrato, minore dispersione di calore e quindi un migliore controllo della saldatura. Questo permette la saldatura di spessore più sottili di quelli saldabili a MIG.
- un ulteriore controllo della saldatura può essere ottenuto mediante l'utilizzo di diversi dispositivi come comandi a distanza, a pedale o torce UP-DOWN. Questo permette di controllare la corrente di saldatura mentre si sta saldando aumentando o diminuendo il valore a secondo delle necessità (riscaldamento del pezzo, variazione dello spessore, ecc.). Modificando i parametri della frequenza di saldatura e del bilanciamento, si può poi andare a modificare la concentrazione dell'arco e la sua penetrazione.
- la velocità di saldatura è nettamente minore di quella a MIG, questo spesso esclude il procedimento a TIG nelle lavorazioni di produzione, può succedere che grazie al suo migliore controllo della penetrazione, si scelga di effettuare la prima passata a TIG e il riempimento in MIG.
- saldare a TIG richiede una manualità maggiore rispetto al MIG, ne consegue anche che l'addestramento di nuovi saldatori necessita di un tempo di apprendimento più lungo.

Nella tabella seguente sono riportati i parametri tipici per giunti di testa su leghe di alluminio per saldatura manuale TIG AC.

Spessore (mm)	Root gap (mm)	Angolo (gradi)	Corrente (A)	N° di passate	Diametro filo d'apporto	Velocità di saldatura (mm/min)	Diametro ugello (mm)
0.8	0	Lembi dritti	55	1	1,6	300	9.5
1,2	0	Lembi dritti	100	1	2,4	400	9.5
1,5	0.8	Lembi dritti	130	1	2.4	470	9.5
2	0.8	Lembi dritti	160	1	3.2	380	9.5
2,5	08	Lembi dritti	170	1	3,2	300	9.5
3,2	0.8	Lembi dritti	180	1	3.2	300	12.7
5	1,6	Lembi dritti	250	1	4,8	200	12.7
6.5	0	70° a V	320	1	4.8	150	12.7
8	0	70° a V	340	2	4.8	165	12.7
10	0	70° a V	350	2	6.4	180	12.7

Tabella 3: parametri di saldatura consigliati per TIG AC in Argon su leghe di Al [12]

4.1.2 Vantaggi e svantaggi della saldatura MIG

Per quanto riguarda il procedimento a MIG vanno innanzi tutto ricordati alcuni accorgimenti necessari per una buona riuscita della saldatura. Essendo noto che uno dei problemi principali nell'uso delle bobine di alluminio è il traino del filo, sarà necessario utilizzare una guaina torcia guidafilo diversa da quella utilizzata per la saldatura con bobine di ferro (ad es. teflon), utilizzare diametri di filo non troppo sottili e se possibile preferire fili di tipo Al-Mg che sono meno morbidi di quelli di tipo Al-Si.

Non stringere troppo il gruppo premifilo del motoriduttore e saldare "spingendo" la torcia e non "tirandola" in modo di avere sempre una buona protezione gassosa del cordone.

La soluzione migliore è comunque quella di rivolgere la propria attenzione su saldatrici specifiche per la saldatura dell'alluminio, che ovviano a questi problemi utilizzando una torcia *push-pull* che presenta due rulli in testa alla torcia in modo da avere il filo sempre in tensione per facilitarne la fuoriuscita. Alcuni modelli presentano inoltre programmi SINERGICI che automatizzano e facilitano la saldatura con diversi tipi di filo d'apporto e permettono la regolazione della corrente durante la saldatura rendendo il procedimento più semplice. I principali vantaggi e svantaggi di questa tecnica sono:

- uno dei principali vantaggi della saldatura a MIG è sicuramente la sua rapidità di esecuzione, questo lo rende il procedimento più utilizzato per ottenere maggiore produttività ed un abbassamento dei costi. Bisogna infatti ricordare che nella valutazione dei costi della saldatura il 70-80% è dato dal saldatore e poco vanno invece ad incidere i costi del gas e del materiale d'apporto.
- immediatezza in termini di utilizzo e facilità di apprendimento, quindi rapida intercambiabilità dell'operatore.
- adoperando torce *push-pull* dedicate si possono utilizzare fili sottili per saldare piccoli spessori come quelli presenti nel settore dell'autoriparazione.

La qualità visiva finale del giunto non è paragonabile a quella ottenuta a TIG, in quanto spesso sono presenti spruzzi da rimuovere.

Le figure seguenti mostrano un esempio di saldatura MIG di lamiere spesse 12 mm (testa a testa e ad L) utilizzando come gas di protezione argon.

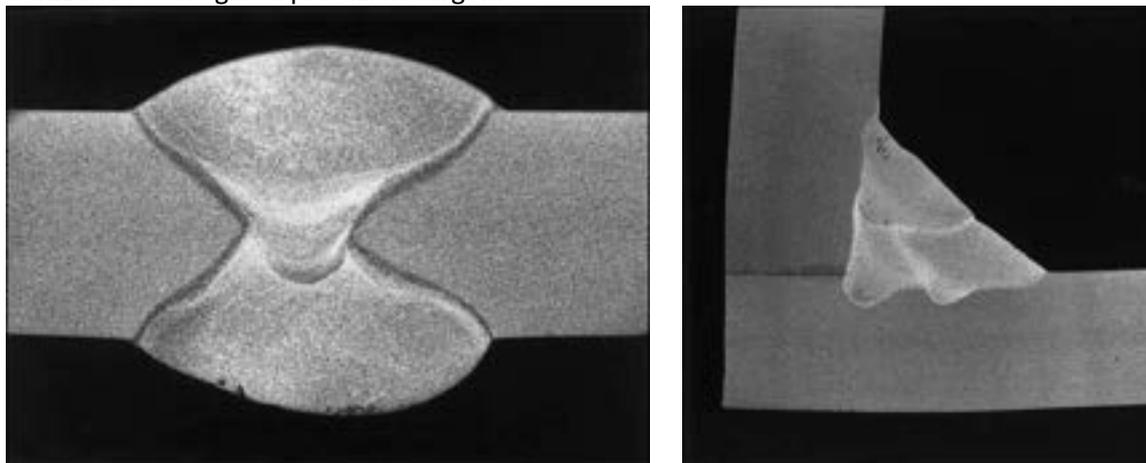


Figura 9: saldatura MIG in Argon su lamiere in lega di Al

Mentre le figure seguenti mostrano la saldatura delle stesse leghe di alluminio, spessori (12 mm) e geometria dei giunti, ma utilizzando l'Elio come gas di protezione. L'elio è usualmente applicato in sistemi automatizzati con correnti di saldatura e velocità di saldatura maggiori in quanto il minore potenziale di ionizzazione renderebbe l'arco poco stabile alle correnti di saldatura utilizzate nei processi manuali.

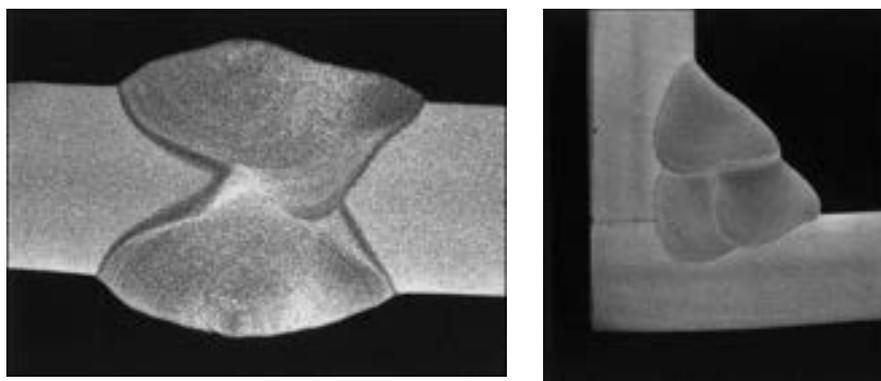


Figura 10: saldatura MIG in Elio, protezione con Elio

La tabella seguente riporta i parametri tipici di saldatura consigliati in funzione dello spessore della lamiera da saldare, con Argon come gas di protezione.

Spessore (mm)	Root gap/face (mm)	Angolo (gradi)	Sostegno al Rovescio	Corrente (A)	Tensione (V)	N° di passate	Diametro filo d'apporto	Velocità di saldatura (mm/min)
1,6	0	Lembi dritti	Temporaneo	100	19	1	0,6	1000
	2,5	Lembi dritti	Permanente	100	19	1	0,6	1000
2,4		Lembi dritti	Temporaneo	140	21	1	0,6	1000
		Lembi dritti	Permanente	130	23	1	0,6	780
3,2		Lembi dritti	Temporaneo	160	24	1	1,2	780
		Lembi dritti	Permanente	135	23	1	1,2	720
4	1,5	Lembi dritti	nessuno	170	26	1 al dritto 1 al rovescio	1,2	750
	1,5/2,5	60° a V	Temporaneo	160	27	1	1,2	750
	4,5/1,5	60° a V	Permanente	185	27	2	1,6	750
6,3	2,5	Lembi dritti	nessuno	200	28	1 al dritto 1 al rovescio	1,6	750
	2,5/2,5	60° a V	Temporaneo	185	27	2	1,6	750
	6/1,5	60° a V	Permanente	225	29	3	1,6	750
8	2,5/1,5	60° a V	Temporaneo	245	29	2	1,6	750
	4,5/0	60° a V	Permanente	255	29	3	1,6	750
10	2,5/4,5	90° a V	nessuno	290	29	1 al dritto 1 al rovescio	1,6	750
	2,5/2,5	60° a V	Temporaneo	275	29	2 al dritto 1 al rovescio	1,6	900
	4,5/0	60° a V	Permanente	275	26	3	1,6	800/550
12,5	0,8/1,5	90° doppio V	nessuno	260/225	24/26	3 al dritto 3 al rovescio	1,6	1050 root/800
	2,5/1,5	60° a V	Temporaneo	260	24	3 al dritto 1 al rovescio	1,6	850 root/550
	4,5/0	60° a V	Permanente	270	24	3	1,6	850 root/450
16	1,5/1,5	90° doppio V	nessuno	275	23/26	4 al dritto 4 al rovescio	1,6	850 root/650
	4,5/0	60° a V	Permanente	280	26	4	1,6	550 root/450
20	1,5/1,5	90° doppio V	nessuno	255 root/230	22/26	4 al dritto 4 al rovescio	1,6	900 root/550
	3/2,5	60° a V	Temporaneo	350	29	4 al dritto 1 al rovescio	2,4	1000
	6/0	60° a V	Permanente	380	30	5	2,4	1000
25	1,5/1,5	90° doppio V	nessuno	255 root/230	22/26	6 al dritto 6 al rovescio	1,6	600
	4/2,5	60° a V	Temporaneo	350	29		2,4	1000
	6/0	60° a V	Permanente	350	29		2,4	1000

Tabella 4: parametri di saldatura consigliati per MIG in Argon su leghe di Al [12]

5 Tecnologie innovative di saldatura delle leghe di alluminio

Le tecnologie di saldatura automatiche ben si associano allo sviluppo di prodotti estrusi di grande dimensione e dei pannelli AFS. Come verificato nelle attività dei precedenti PAR, la saldatura laser ed in particolare la saldatura laser ibrida con laser a stato solido sono ottime candidate nella realizzazione di impianti automatizzati per la saldatura di sub componenti, in particolare piani, realizzati dalla saldatura di grandi estrusi di alluminio la cui larghezza raramente supera i 500 mm. La diretta concorrente della saldatura laser, in termini di qualità della giunzione e non di produttività e flessibilità dell'utensile, è la saldatura a stato solido Friction Stir Welding.

5.1 Saldatura Friction Stir Welding

Brevemente nella Friction Stir Welding (FSW) il cordone di saldatura è formato da un utensile cilindrico che è distinto in un due sezioni la spalla "shoulder" più larga e la punta leggermente più corta dello spessore da saldare. L'utensile intero ruotando genera attrito, quindi calore, rendendo plastico il materiale. La punta penetra fra i due lembi plasticizzati e induce un'azione di "rimescolamento" del materiale fra i due lembi e generando così la saldatura. Una volta che l'utensile è all'interno, la traslazione lungo la linea di contatto chiude dietro di sé la separazione con metallo compatto ed uniforme. Aspetto interessante della FSW sta nel fatto che nel materiale da saldare non viene raggiunta la temperatura di fusione, riducendo così i difetti dovuti alla criccabilità a caldo.

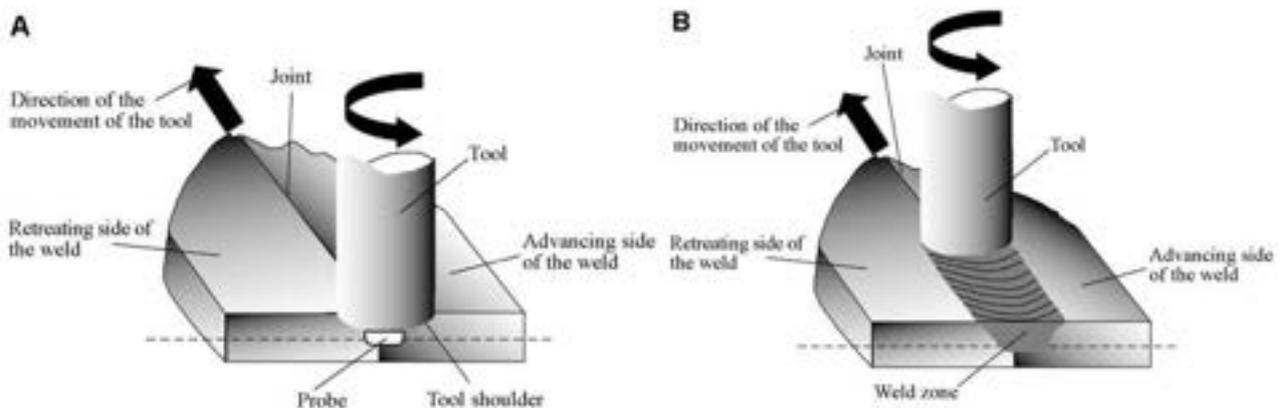


Figura 11: schematizzazione del processo di saldatura per FSW

I principali vantaggi della saldatura FSW sono:

- Bassa Distorsione;
- Eccellenti proprietà meccaniche ;
- Assenza di porosità, assenza di spattering e buona finitura superficiale;
- Assenza di fumi di saldatura.

Le principali limitazioni:

- Velocità di saldatura più bassa rispetto ad alcuni processi di saldatura per fusione, in particolare rispetto al laser welding;
- I pezzi da saldare, considerato il tipo di processo devono essere bloccati in modo solido;
- Il supporto a rovescio è obbligatorio e le geometrie di giunzione sono presso che limitate alla sola saldatura di testa.

Complessivamente considerato che la punta deve sempre variare in funzione dello spessore il processo FSW è estremamente poco flessibile. Tuttavia con tale processo in doppia passata contrapposta è possibile saldare anche spessori notevoli di alluminio.



Tabella 5: Saldatura FSW di testa di lamiere di AA6082 di spessore 75mm [12]

Per quanto riguarda l'efficienza del processo di saldatura, la tabella sottostante mostra come la saldatura FSW, precedentemente ritenuta fra le più efficienti energeticamente, in realtà non lo sia in quanto, se pur vero che non porta a fusione il materiale e le potenze in gioco sono spesso inferiori alle tecnologie di saldatura tradizionali, la lentezza del processo fa sì che il calore complessivo per unità di lunghezza della saldatura, a parità di condizioni, sia sensibilmente maggiore anche alle tecnologie di saldatura tradizionale e di conseguenza molto meno efficiente rispetto alla tecnologie di saldatura laser e plasma.

Alloy	FSW		GTAW		GMAW	
	P (W)	HI(kJ/CM)	P (W)	HI(kJ/CM)	P (W)	HI(kJ/CM)
6061Al (11 ipm)	3265	6.59	3850	6.05	5200	6.10
5083 Al (4.5 ipm)	2030	9.57	3850	6.05	5200	6.10
7075 Al (3.1 ipm)	2105	14.36	3850	6.05	5200	6.10
6082 Al (11 ipm)	3382	6.53	3850	6.05	5200	6.10

Tabella 6: comparazione dell'apporto termico complessivo necessario per la saldatura a diverse velocità delle leghe di alluminio

In fine, la saldatura FSW, prevede dei costi di impianto notevoli legati anche alle royalty che è necessario pagare al TWI proprietario della tecnologia, produttività minore rispetto alla saldatura laser possibilità di saldatura quasi esclusivamente testa a testa.

La saldatura laser, qui non descritta in quanto ampiamente trattate nei precedenti PAR, è certamente più produttiva ma ha comunque dei costi di impianto notevoli ed è suscettibile a porosità, cricatura a caldo ed inclusioni di allumina. Tali problematiche possono essere superate mediante l'impiego di opportuni

materiali d'apporto e tecnologie ibride laser arco che comunque moltiplicano la complessità dell'impianto che trova economicità principalmente in elevati volumi di produzione dello stesso componente (automotive) e meno si presta all'applicazione nel settore delle costruzioni ferroviari dove i particolari identici sono di grosse dimensioni e di piccoli numeri.

5.2 Saldatura Plasma-TIG

Una delle tecnologie invece ancora poco applicata, in particolare nel tessuto nazionale è la tecnologia di saldatura plasma (PAW) delle leghe di alluminio che promette con costi di investimento più limitati livelli qualitativi comparabili con la saldatura laser. Inoltre, questa tecnologia è parente della più tradizionale tecnologia TIG con problematiche di sicurezza ben note agli addetti ai lavori per cui più metabolizzabile dal tessuto produttivo delle piccole medie imprese del panorama italiano.

La saldatura plasma key-hole raggiunge densità di energia di 10^6 W/cm^2 comparabili con quelle dei sistemi di saldatura laser, la figura seguente mostra schematicamente la formazione del gas plasma che viene generato per mezzo di un arco pilota fra elettrodo ed ugello. Il gas ionizzato così generato viene espulso ad alta velocità verso il pezzo attraverso un ugello raffreddato. L'energia in questo modo resta molto meglio confinata e si hanno variazioni limitate al variare della distanza fra elettrodo e pezzo.

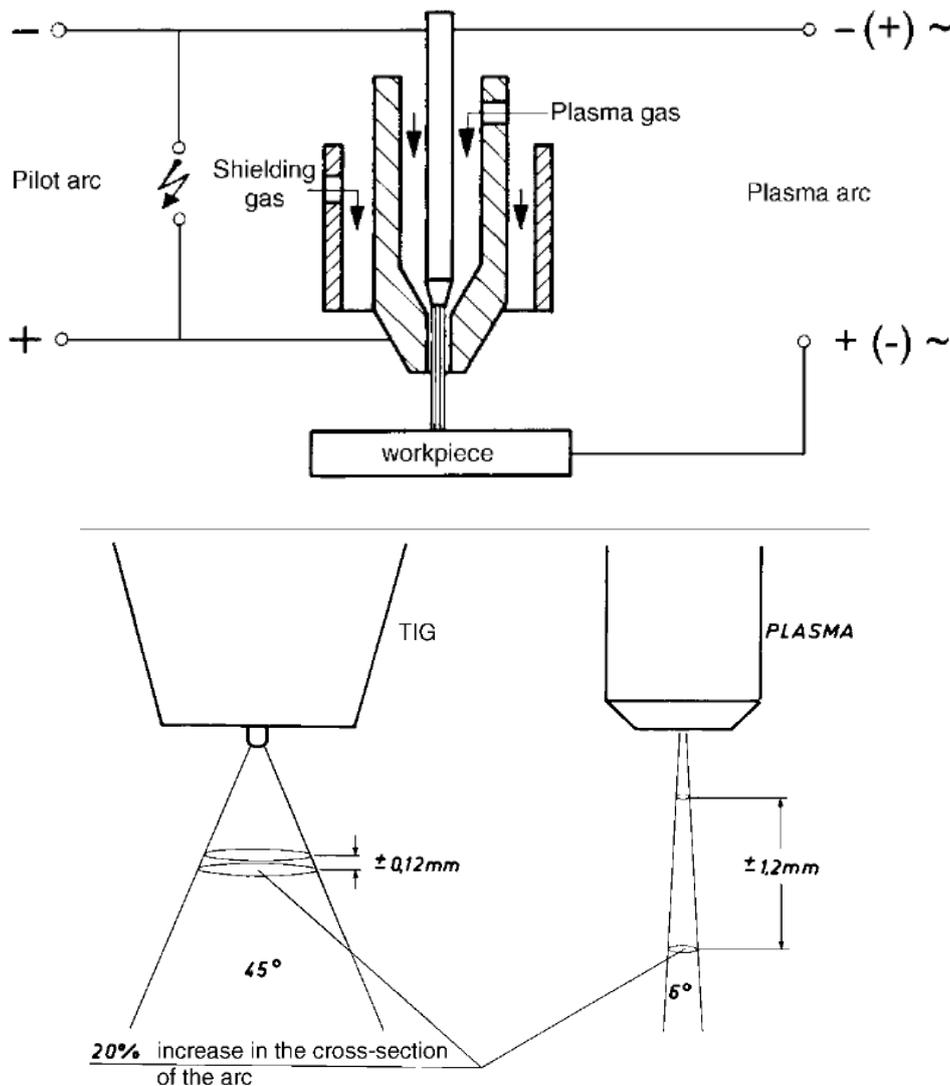


Figura 12: schematizzazione della saldatura plasma e differenza di distribuzione di energia fra la saldatura TIG e la saldatura Plasma

A differenza della saldatura TIG dove l'arco è libero e la sua temperatura decresce da circa 10000° K a circa 4000° K sul pezzo, la saldatura a plasma confinato permette di raggiungere temperatura che vanno da oltre 24000° K a circa 16000° K sul pezzo.

La figura seguente sintetizza i due processi:

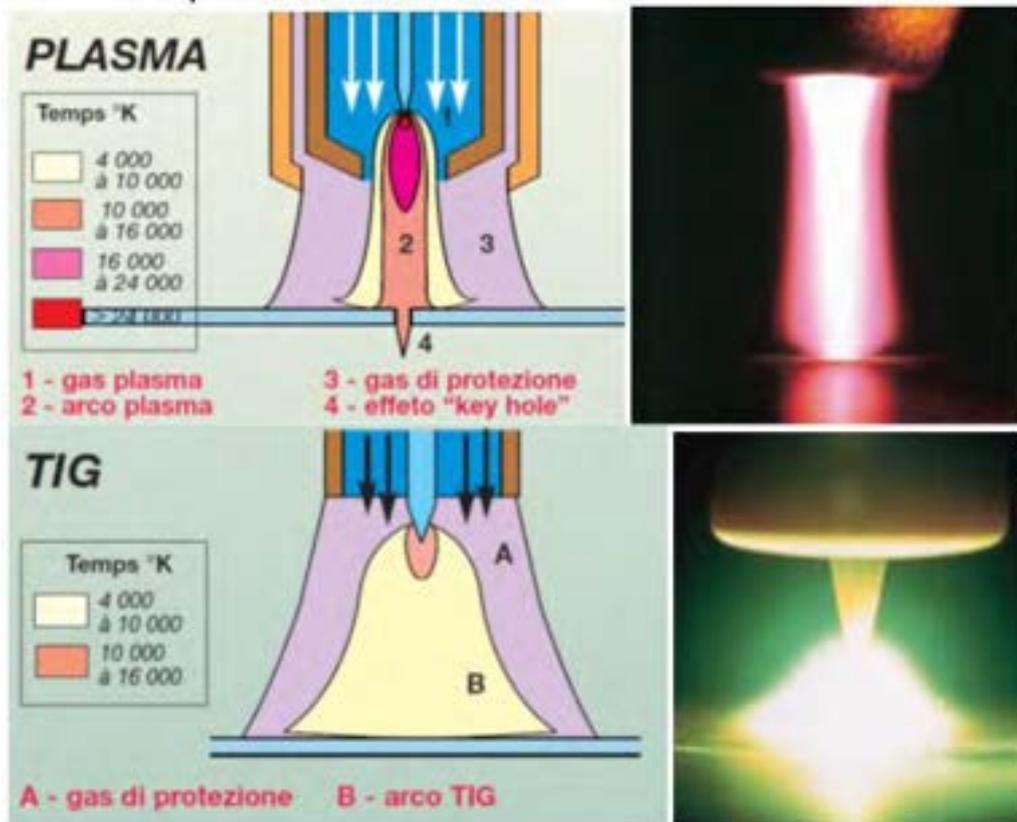


Figura 13: differenza fra distribuzione di temperatura del sistema plasma key-hole e TIG

Come mostra il grafico di Figura 13, rispetto alla sola saldatura TIG, fissata una velocità di saldatura di 0,4 m/min gli spessori saldabili in single pass passano da circa 2mm a 4 mm

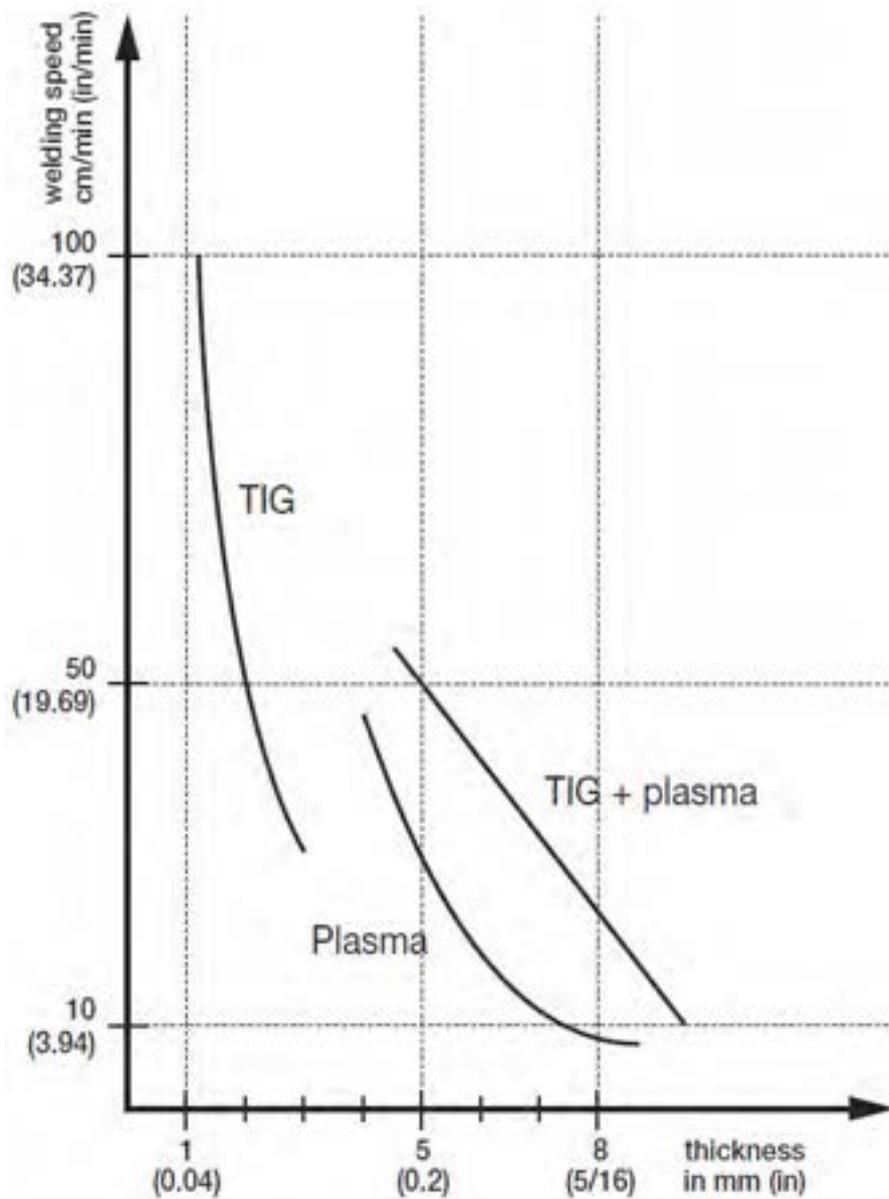


Figura 14: potenzialità della saldatura plasma di leghe di Al in termini di spessori e velocità

Un'ulteriore variante della tecnica Plasma è il Variable Polarity Plasma Arc (VPPA) in cui viene rapidamente invertita la polarità dell'elettrodo secondo lo schema di Figura 15.

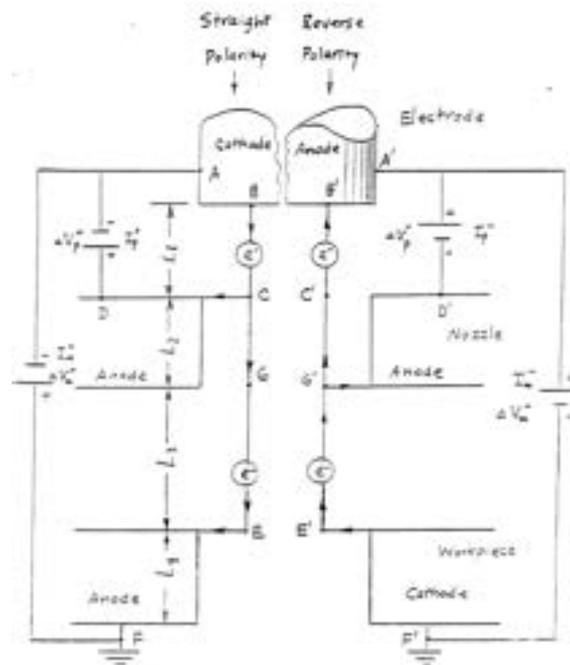


Figura 15: schema delle 2 fasi della saldatura plasma a polarità variabile [13]

Si sommano quindi i vantaggi del plasma (elevata concentrazione dell'apporto termico) e del TIG a elettrodo positivo (rimozione dello strato di ossido refrattario). Lo sviluppo del VPPA, già sperimentato dalla Boeing, ricevette una forte spinta dalla Nasa nei primi anni '80, per la costruzione del serbatoio esterno dello Shuttle, in lega AA2195. Il TIG infatti induceva una difettosità tale da richiedere un'eccezionale cura nella preparazione dei lembi, l'esame RX sul 100% del saldato e onerose riparazioni. Il nuovo procedimento, una volta messo a punto e adottato, dette validi risultati: drastica riduzione dei difetti e delle porosità, minori distorsioni termiche, maggiore produttività. Più recentemente è stata valutata positivamente l'applicazione del VPPA ai tailor-welded blanks (lamiere composite) in leghe di alluminio [14]: la maggiore "rigidezza" e direzionalità dell'arco elimina alcune difficoltà del TIG dovute alla diversa altezza delle lamiere accoppiate e la velocità di processo è consistente (oltre 5 m/min). Rispetto al laser non ci sono problemi di riflettività e il costo globale è minore.

Il sistema di saldatura plasma progettato è schematizzato nella figura seguente ed è costituito da:

- un generatore a caratteristica cadente, in particolare il generatore prescelto è capace di erogare una corrente stabile di 450 A in continuo;
- un sistema di controllo a microprocessore in grado di controllare la forma d'onda dell'arco e di gestire rampe di salita ed evanescenza dell'arco. Questo particolare sistema di controllo permette di poter gestire in modo completamente libero la forma d'onda della corrente di saldatura, aspetto molto importante nello sviluppo di processi di saldatura sull'alluminio in quanto il processo deve essere in grado di effettuare l'operazione di "sabbatura ionica" per distruggere lo strato di allumina Al_2O_3 ovvero avere gli ioni indirizzati verso il pezzo e non gli elettroni come accade nella tradizionale saldatura TIG.
- un sistema di gestione del filo d'apporto e dei gas di assistenza che per questo tipo di tecnica si suddividono in gas plasma, che in generale è argon dato il suo basso potenziale di ionizzazione, il gas di copertura al dritto e se necessario il gas di copertura a rovescio.
- Una torcia specifica per saldatura plasma SP7 in aggiunta alla torcia esistente per saldatura TIG AC MEC4

- Un sistema di controllo della lunghezza d'arco per garantire la stabilità di processo in presenza di variazioni di spessore o deformazione.

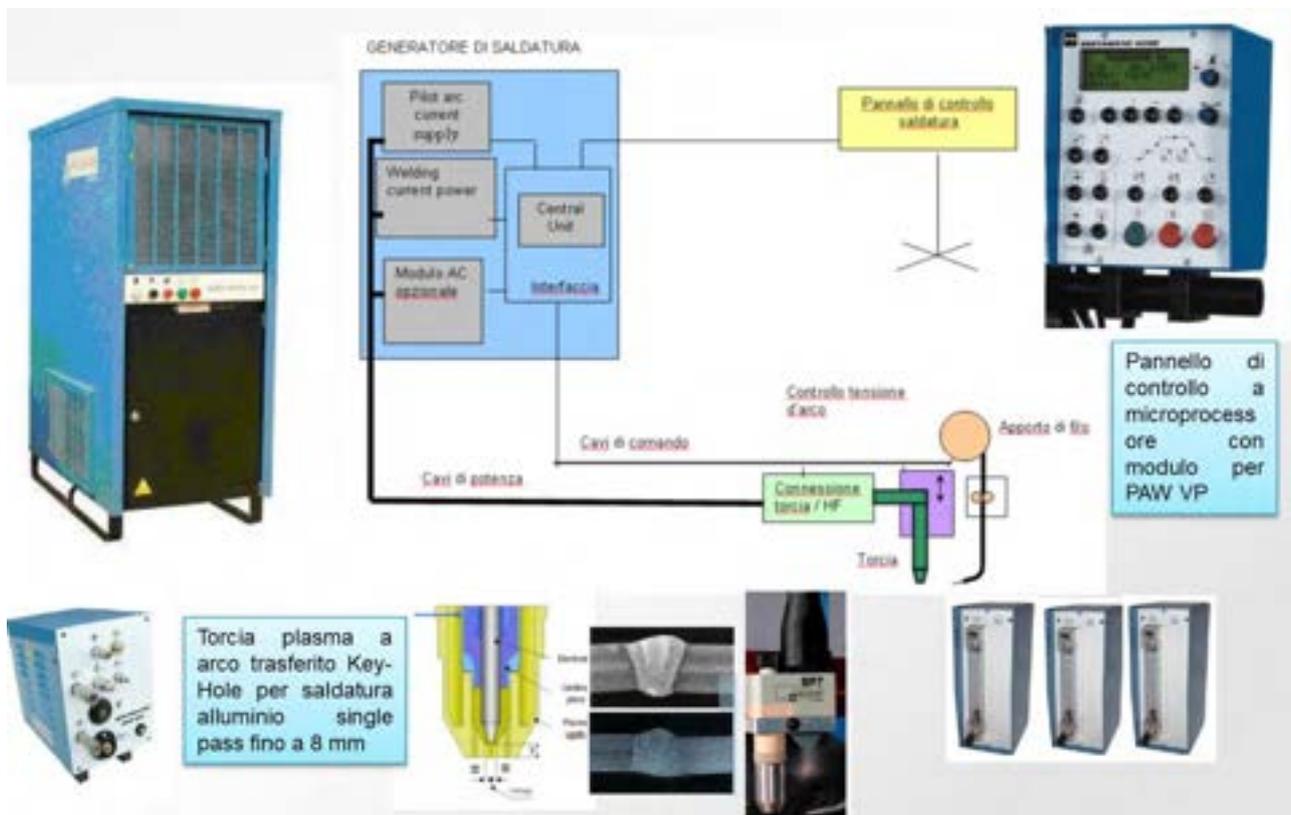


Figura 16: componenti dell'impianto di saldatura plasma in allestimento presso il laboratorio saldatura dell' UTTMAT del CR ENEA Casaccia

Il generatore acquisito è progettato specificatamente per lavorare sia in TIG AC che in Plasma DC.

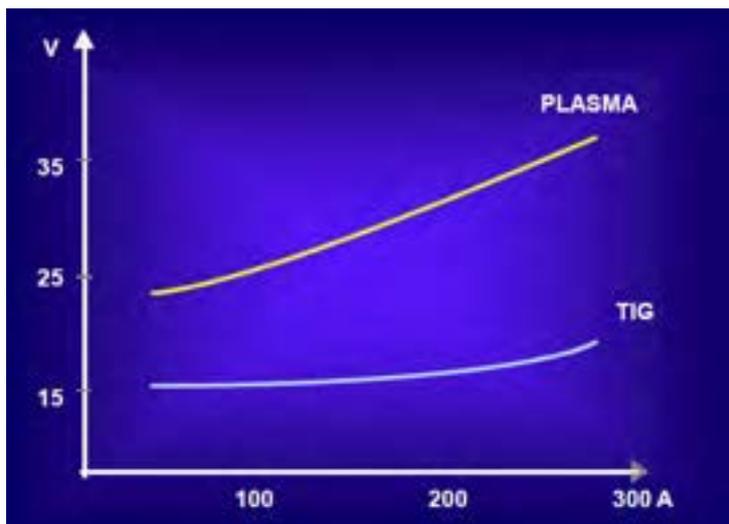


Figura 17: Caratteristiche del generatore NERTAMATIC 450 FRO-Air Liquid Welding

L'impiego della tecnologia plasma rispetto alla TIG, anche su spessori relativamente sottili come quelli delle pelli degli AFS, è giustificato dal fatto che la bassa densità di energia del processo TIG associata all'elevata conduzione del calore delle leghe di alluminio, e in particolare del sistema AFS, ha mostrato in alcuni test di

saldatura TIG-automatica un elevato transitorio nella stabilizzazione del processo che è difficilmente controllabile.



Figura 18: effetti transitori dovuti alla bassa densità di energia del processo di saldatura TIG su AFS

Tali problematiche possono essere superate riducendo gli effetti della conduzione grazie alla saldatura plasma ed al controllo della forma d'onda di saldatura. In particolare, il generatore Nertamatic 450, permette di gestire in modo completo la forma d'onda

Sia in corrente continua che in corrente pulsata questa caratteristica permette di ottimizzare il rapporto fra energia di saldatura ed energia destinata alla sabbiatura ionica (pulitura dallo strato di allumina) delle superfici.

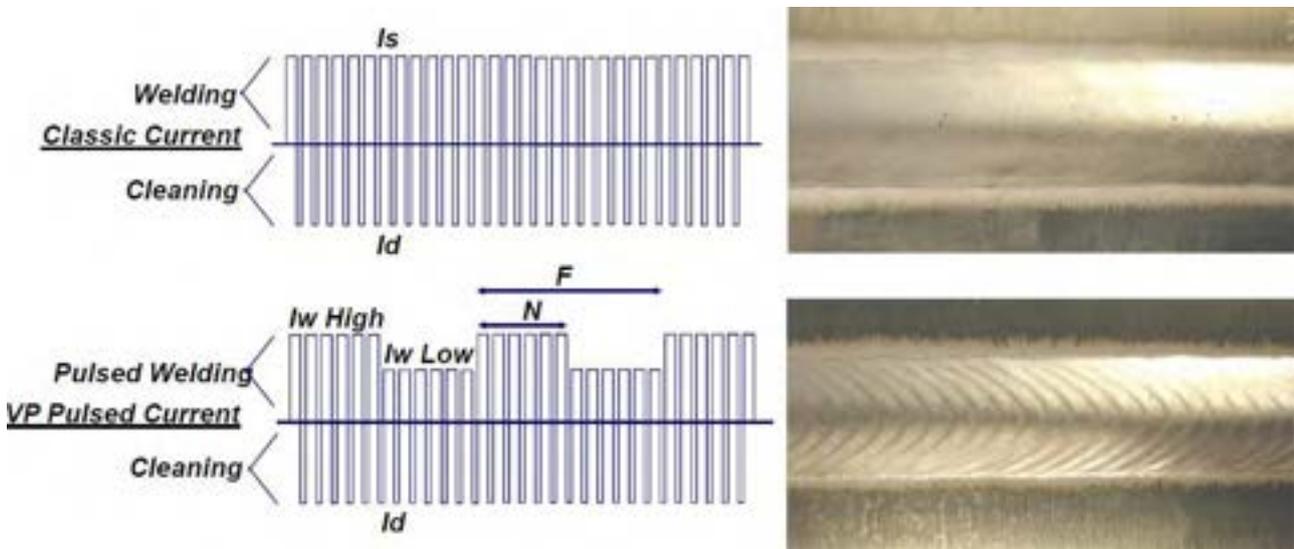


Figura 19: Controllo della pulsazione anche in Variabile polarity (VP)

Con una preventiva pulitura delle superfici il sistema acquistato permette la saldatura anche in TIG DC con elio ottenendo giunti di testa single pass fino ad 8mm di spessore con la torcia TIG MEC4.

Thickness (mm)	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Wire speed (cm/min)	Helium gas flow rate (l/min)
1,6	100	13	75	110	30
2,0	150	13	75	110	30
2,5	210	13	75	130	30
3,0	220	14	65	200	30
4,0	250	14	45	200	30
5,0	250	14	45	220	30
6,0	300	15	30	220	30
8,0	360	15	18	140	30

Tabella 7: Principali parametri di saldatura su leghe di alluminio di giunti di testa in TIG DC con elio (cortesia di FRO Ail Liquide welding)

I test di saldatura su AFS effettuati in modalità VP TIG con torcia MEC4 filo d'apporto diametro 1,2 mm hanno permesso di individuare i seguenti parametri come candidati alla saldatura TIG di pannelli AFS ad estrusi di alluminio:

- Preparazione a lembi dritti;
- Velocità di processo 120 mm/min;
- Velocità del filo 240 mm/min
- Elettrodo di tungsteno diametro 2,4 mm ;
- Forma d'onda quadra con proporzioni -70/+30
- Frequenza 200 Hz
- Tensione di saldatura 12-13 V
- Distanza elettrodo pezzo 2,5 mm.

I parametri sono stati testati sia con elettrodo a punta che con elettrodo piatto, mostrando come nel primo caso il cordone di saldatura si presenti più largo.

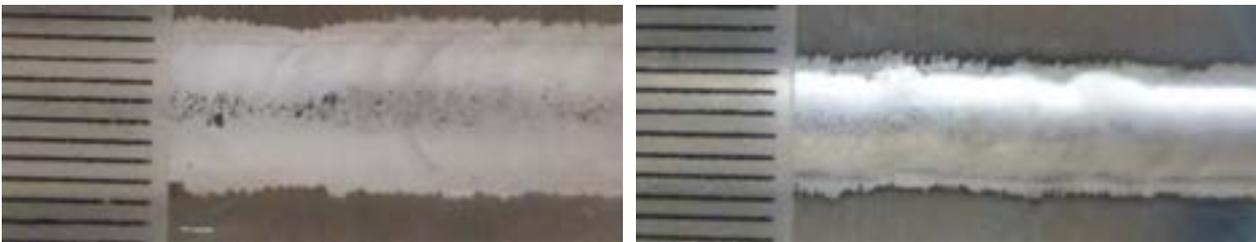


Figura 20: Controllo fra saldatura TIG con elettrodo a punta (40°) e elettrodo piatto

Altro effetto riscontrato, e ben noto nella saldatura automatica, è che il processo cambia in funzione della distanza pezzo elettrodo. Questo effetto è molto più critico nella saldatura TIG che in quella plasma come ben schematizzato nella Figura 12.

L'apporto termico complessivo in termini di energia complessiva è di 650 J/mm, questo considerando un rendimento elettrico del generatore del 90% corrisponde ad un consumo di energia alla presa di 720 J/mm.

6 Saldatura con nuove sorgenti laser

La disponibilità da parte della Tube Tech Machinery (TTM) s.r.l di Cazzago San Martino (BS) di una stazione di saldatura laser sperimentale con sorgente laser in fibra da 5 kW, robot antropomorfo e sistema di adduzione per filo d'apporto, ha permesso di testare i parametri di saldatura determinati sulla sorgente Nd:YAG da 2 kW di ENEA; quest'ultima rappresentava, agli inizi del 2000, lo stato dell'arte che è oggi espresso, a livello di qualità del fascio ed efficienza, dai sistemi con laser in fibra. Particolare attenzione va posta proprio sull'efficienza energetica delle nuove sorgenti laser a stato solido che sono passate dal 2-3% circa dei laser Nd:YAG pompate a lampade a circa il 30% delle nuove sorgenti in fibra.

La figura seguente mostra i componenti dell'impianto.

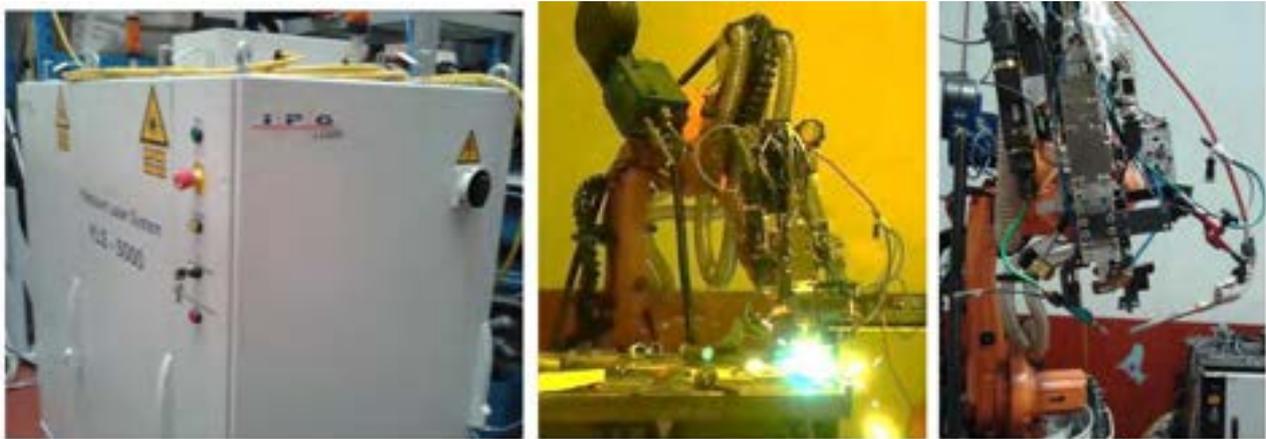


Figura 21: componenti dell'impianto di saldatura TTM

6.1 Principio di funzionamento della nuove sorgenti laser in fibra ad elevata efficienza

I laser in fibra hanno tecnologia sviluppata a partire dai laser a bassa potenza per telecomunicazioni il cui segnale opportunamente amplificato ha permesso la realizzazione di sorgenti multi kW.

Si tratta di sorgenti a stato solido dove è la fibra stessa (drogata con terre rare) a realizzare il mezzo laserante. La stimolazione del mezzo attivo, nota come pompaggio, è realizzata a sua volta da laser a diodi, mentre la lunghezza di emissione dei fotoni è direttamente legata all'elemento di terre rare utilizzato per il drogaggio.

Per i laser in fibra ad elevata potenza l'elemento drogante più utilizzato è l'itterbio che permette l'emissione di fotoni ad una lunghezza d'onda compresa fra 1,060 e 1,085 nm, prossima a quella dei laser Nd:YAG.

Nella Figura 22 è mostrato lo schema del sistema di pompaggio dei laser in fibra e nella Figura 23 è mostrato lo schema di realizzazione e funzionamento di un laser in fibra multi kW.

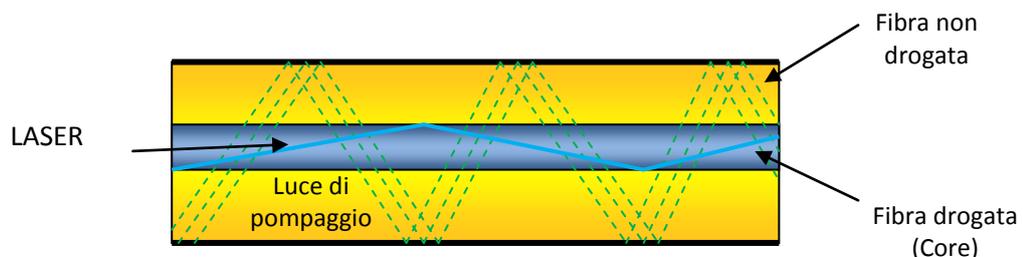


Figura 22: Schema della composizione dell'elemento laserante di un laser in fibra.

La fibra emettitrice, drogata con Itterbio è circondata da un materiale a basso indice di rifrattività che funziona come guida d'onda della luce di pompaggio assicurando il migliore trasferimento della sua energia al mezzo laserante del core. Due reticoli di diffrazione sono utilizzati come *rear mirror* ed *output coupler* in

modo da formare il risonatore laser. Questa tecnologia permette di realizzare un laser lungo ed estremamente sottile che, grazie alla flessibilità delle fibre, può essere raccolto a spire in una forma estremamente compatta. In linea teorica, la fibra laserante stessa può essere utilizzata anche per il trasporto del fascio, tuttavia, si preferisce disaccoppiare la fibra laserante da quella per il trasporto in modo da ridurre i rischi di retro riflessioni in cavità.

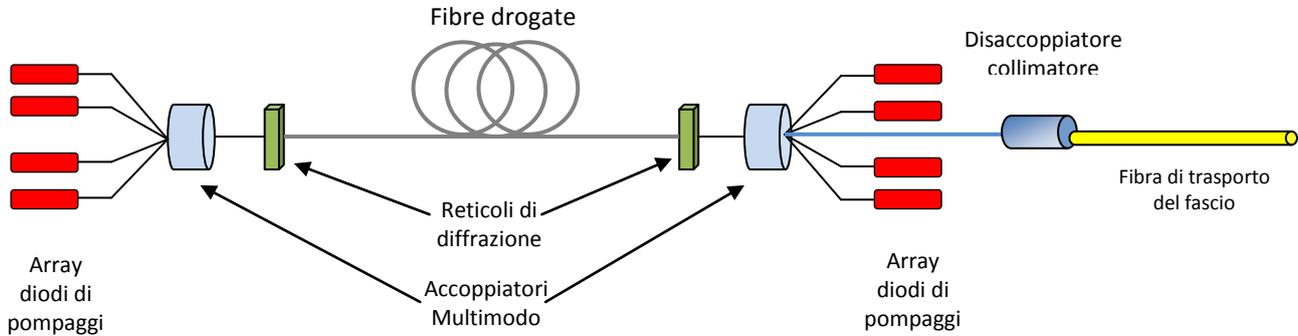


Figura 23: Architettura delle sorgenti Yb-YAG

6.1.1 Confronto con altri tipi di laser a stato solido

I laser a stato solido per lavorazioni industriali di taglio e saldatura sono essenzialmente basati su Nd:YAG. Questi possono essere distinti in base al pompaggio, a lampade o a diodi, e al mezzo attivo, barretta di granato di ittrio drogato con neodimio o disco sottile di granato di ittrio drogato con itterbio, nei più recenti disk laser: quest'ultima generazione di sorgenti laser ha permesso di incrementare le potenze massime e migliorare la qualità del fascio.

Nella tabella seguente è riportato un confronto fra le prime tre tipologie di laser e quelli in fibra.

	Nd-YAG Pompato a Lampade	ND-YAG Pompato a Diodi	Disk Laser Yb-YAG	Fiber Laser Yb fiber
Mezzo Laserante	Barretta cristallina	Barretta cristallina	Disco cristallino	Fibra drogata
Trasmissione del fascio	Fibra e lenti	Fibra e Lenti	Fibra e Lenti	Fibra e Lenti
Dimensioni tipiche della fibra di trasmissione [mm]	600	400	100-200	100-300
Potenze commercialmente disponibili	Fino a 4 kW	Fino a 6 kW	Fino ad 8 kW	Fino a 20 kW
BPP tipico	25-12	12	7-4	12-2
Intervalli di manutenzione [h]	800-1000	2.000-5.000	2.000-5.000	100.000
Efficienza elettrica	3-5%	10-20%	10-20%	25-30%
Costo approssimativo [kW/k€]	90-100	100-120	90-100	90-100
Ingombro della sorgente	medio	medio	medio	piccolo
Possibilità di spostare sorgente	scarsa	scarsa	scarsa	alta

Tabella 8: Confronto fra le principali caratteristiche dei laser a stato solido per applicazioni industriali

La qualità del fascio è definita con il parametro BPP (*Beam Parameter Product*: a qualità migliore corrisponde un BPP inferiore). I dati in tabella, in accordo con lo standard ISO, sono riferiti al valore di BPP calcolato con metà diametro e metà divergenza.

L'elevato rendimento energetico delle sorgenti laser in fibra permette di risparmiare sia sui consumi diretti che su quelli indiretti dovuti ai sistemi di raffreddamento necessari a dissipare l'effetto termico del pompaggio. Per sorgenti di potenza inferiore a 2 kW sono disponibili anche sistemi di raffreddamento ad aria. Ulteriore vantaggio energetico deriva dalle modalità di accensione del laser che sono praticamente immediate (80-100 ms). Ulteriori risparmi si hanno in termini di ridotti ingombri e limitato spazio necessario all'installazione, alla possibilità di movimentazione delle sorgenti che sono spesso carrellate e ai costi di manutenzione, dichiarati dal costruttore, estremamente ridotti.

6.2 Attività sperimentali

Sono state effettuate prove di rifusione su un pannello di AFS con pelli di spessore 1,7mm.

Le prove hanno permesso di verificare la migliore focalizzazione garantita da questo nuovo laser che permette di utilizzare fibre, per il trasporto del fascio, da 200 micron contro i 600 micron del laser Nd:YAG con bassa qualità del fascio laser.

Le migliori proprietà del fascio di questi nuovi laser permettono di avere uno spot focale di 400 micron con lente di focalizzazione di 300 mm contro i 450 micron con focale da 150 mm utilizzati nel corso delle sperimentazioni del vecchio PAR. Questo fattore induce due vantaggi diretti:

- 1- Maggiore profondità di campo, minore sensibilità alla focalizzazione del fascio che garantisce condizioni operative più ampie: sono stati testati intervalli da -3 a + 3 mm di defocalizzazione senza apprezzabili variazioni sulla qualità del processo;
- 2- La possibilità di utilizzare focali molto più lunghe elimina del tutto i problemi legati agli spattering ed al danneggiamento dei vetri di protezione.

A partire dai parametri di saldatura con laser Nd-Yag (potenza 2000 W, velocità 2 m/min) sono state effettuate una serie di prove con il nuovo sistema di saldatura laser che hanno evidenziato come la finestra dei parametri di saldatura si ampli garantendo una maggiore robustezza del processo, qualità questa molto ricercata nel mondo industriale. I parametri per la saldatura di testa delle pelli dei pannelli AFS sono riportati in tabella.

Potenza	velocità	Focalizzazione	Filo d'apporto
P= 2000 W	Vs= 2, 5 m/min	+3/-3	VW= 2, 5- 3m/min

Tabella 9: parametri di saldatura AFS con laser e filo d'apporto

Con i parametri determinati sono stati saldati campioni rappresentativi di possibili configurazioni di giunzioni per la realizzazione di componenti per l'alleggerimento nel settore ferroviario.

In termini energetici la realizzazione di questo giunto tipo implica un apporto termico di 48 J/mm che, ipotizzando per difetto un rendimento elettrico della complessiva apparecchiatura del 20%, indica un consumo di energia per mm di saldatura pari a 240 J (esattamente 1/3 rispetto alla saldatura TIG).

Sulla stessa stazione di lavorazione, è stato possibile testare anche un'innovativa testa di focalizzazione che imprime un movimento orbitale circolare (*wobbling*) allo spot focale del fascio laser, all'interno del bagno fuso, permettendo di migliorare la stabilità del key-hole: è questo un aspetto critico nell'applicazione del laser alla saldatura delle leghe di Al che sono soggette a porosità nei giunti saldati. Come descritto nei PAR precedenti è oggi possibile affrontare tale problema solo con l'applicazione di tecnologie ibride che implicano una maggior complessità del processo ed uno stretto controllo dei parametri.

La testa di saldatura prototipale utilizzata, di proprietà della IPG Photonics ed interamente sviluppata e brevettata in Italia, è mostrata nella figura seguente. E' stata installata sulla stazione di lavorazione TTM ed

è stata utilizzata sia per la saldatura diretta fra AFS sia per la saldatura di AFS con Profilati Estrusi di lega A6060.

La saldatura con wobbling viene effettuata con un collimatore da 200 mm ed una focale da 300 mm portando in questo caso lo spot focale a 300 micron. Tuttavia questo viene ruotato velocemente, con frequenze nell'ordine dei 100 Hz, per cui, pur essendo maggiormente focalizzato rispetto alla configurazione precedente, la rotazione ne riduce l'effetto penetrante.

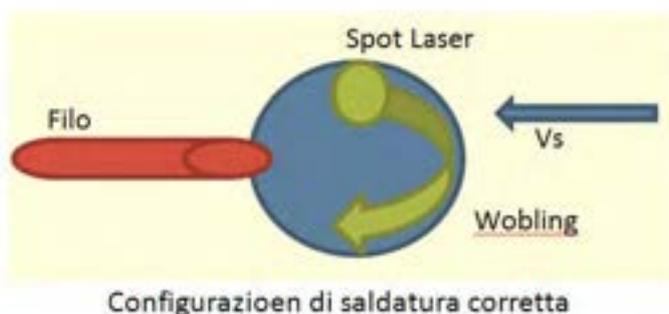
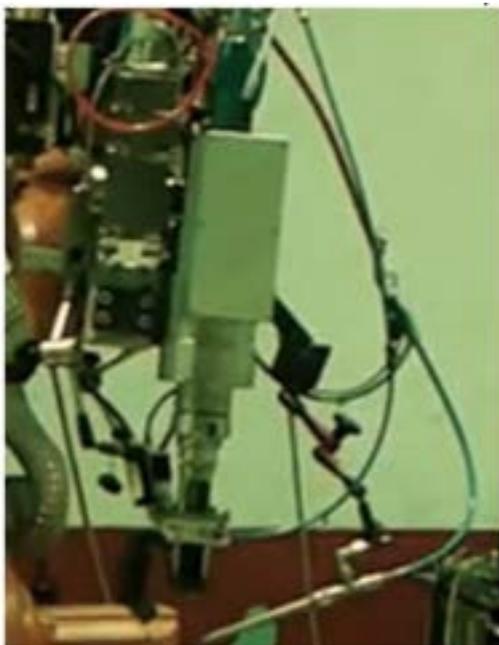


Figura 24: saldatura con testa di focalizzazione con wobbling circolare della IPG Photonics Italia

Nelle condizioni di saldatura è stato verificato come sia necessario ridurre la velocità ed abbassare la velocità di saldatura per permettere la piena penetrazione (vedi tabella seguente).

Potenza	velocità	Focalizzazione	Filo d'apporto
P= 2500 W	Vs= 1,5 m/min	+3/-3	VW= 1,5m/min

Tabella 10: parametri di saldatura AFS con laser Wobbling e filo d'apporto

Il rapporto fra potenza e velocità si dimezza passando da 1,25 a 0,6 tuttavia cresce molto la qualità della saldatura che si presenta con un profilo molto ben raccordato e con un aspetto superficiale eccellente. La migliore qualità è stata confermata anche da test radiografici su saldature di lamiera di alluminio di spessore maggiore che hanno mostrato come le porosità siano completamente assenti con l'impiego del wobbling.

In termini energetici pur passando da 240 J/mm della saldatura laser a 500 J/mm abbiamo sempre un vantaggio rispetto alla saldatura TIG convenzionale.

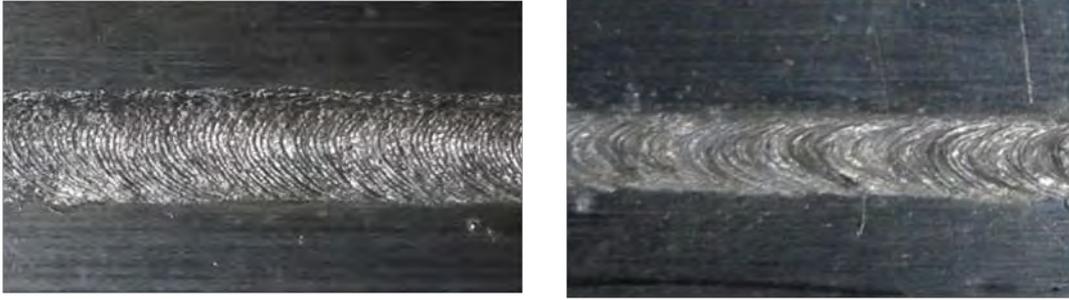


Figura 25: a sinistra l'aspetto superficiale della saldatura di AFS con Laser-Wobbling, a destra la saldatura con solo Laser

In fine, sono stati saldati dei simulacri di componenti che è possibile assemblare con AFS e profilati di alluminio. In figura sono riportati i simulacri che, parzialmente realizzati con saldatura Laser e Laser-Wobbling saranno finiti di assemblare con saldatura Plasma.



Figura 26: Simulacri di componenti alleggeriti ottenuti per assemblaggio di AFS e Profilati estrusi

7 Conclusioni

Il report fornisce una panoramica sulle principali tecnologie, tradizionali e non, per la saldatura delle leghe di alluminio nel settore ferroviario, individuando la tecnologia di saldatura plasma, che viene principalmente utilizzata nel settore aerospaziale e per la saldatura di recipienti in pressione anche nel settore nucleare, come una possibile candidata all'impiego nel settore ferroviario, in particolare per la realizzazione di stazioni di saldatura per la giunzione di grandi estrusi e pannelli AFS.

Lo studio ha portato ad individuare tutti i componenti necessari per la realizzazione di una stazione di saldatura prototipale per testare sperimentalmente quanto dedotto principalmente da analisi di letteratura. L'analisi ha portato a verificare come in Europa le aziende che realizzano impianti specifici Plasma sono assai limitate. La maggior parte delle aziende individuate forniva impianti TIG adattati per cui l'unica azienda individuata per la fornitura di un impianto nativo Plasma con le caratteristiche dedicate è stata la francese FRO AIR Liquide Welding. Data la particolarità dell'impianto richiesto i tempi di fornitura sono stati leggermente oltre le attese per cui, non essendo disponibili impianti di saldatura plasma, l'attività sperimentale si è concentrata da un lato sulla saldatura TIG (con apparecchiature simili), dall'altro su una nuova campagna di sperimentazione laser grazie alla collaborazione di due importanti aziende Italiane. La prima, TTM di Cazzago San Martino, è un'azienda leader proprio nel settore dello sviluppo di apparecchiature di saldatura per il taglio e la saldatura laser ed è particolarmente interessata alla saldatura laser delle leghe di alluminio per il settore dei trasporti con particolare riguardo a quello ferroviario. La seconda, IPG Photonics Italia, oltre ad essere leader nella vendita di sorgenti laser in fibra ha da poco in fase di sviluppo una speciale testa di saldatura per le leghe di alluminio detta "Wobling".

Questa collaborazione ha permesso di testare i parametri individuati nel corso dei precedenti PAR sull'impianto laser di ENEA Laboratorio laser ENEA Trisaia, e di adattarli e validarli su nuove sorgenti laser estremamente più efficienti e robuste.

Non considerando indicatori legati alla produttività dei differenti processi, un'analisi preliminare mostra che, sulla base della sola efficienza energetica di saldatura dalla rete elettrica, la saldatura laser presenta un vantaggio che va dal 66 al 33 % rispetto alla saldatura TIG. Questo dato porta ad ipotizzare che, considerato che il plasma ha un'efficienza maggiore rispetto al TIG, questo processo potrebbe essere in concorrenza con la saldatura laser, benché quest'ultima sia attualmente il principale candidato in considerazione degli sviluppi in termini di potenza (20 kW) e dell'introduzione di nuove teste di saldatura.

La saldatura plasma resta nel suo complesso estremamente competitiva se si considerano i costi di investimento e le problematiche di sicurezza. Considerando l'installazione su una identica stazione di lavorazione, il generatore PLASMA allo stato dell'arte ed i relativi ausiliari a corredo per saldatura single pass fino a 8 mm di spessore ha un costo di circa 50 k€. Per un impianto laser, ipotizzando la saldatura del medesimo spessore con una sorgente da 5 kW, il costo può essere superiore a 300 k€. A questo maggiore costo di investimento iniziale va considerato un trattamento completamente differente per i rischi legati alla sicurezza sul posto di lavoro con particolare riguardo al rischio di radiazioni ottiche coerenti, che nel caso specifico prevede la presenza e la valutazione da parte di figure specifiche quali il Tecnico di Sicurezza Laser.

8 Bibliografia

- [1] E. Caretta, "Estrusi di Alluminio nel Carbody Ferroviario," *Alumotive*, no. [http://www.aluplanet.com/documenti/InfoAlluminio/METRA\(alum%20dic_05\).pdf](http://www.aluplanet.com/documenti/InfoAlluminio/METRA(alum%20dic_05).pdf), Settembre-Dicembre 2005.
- [2] Y. Celotti, "Aluminium in the rail transport industry," *A & L*, vol. 4, pp. 79-81, Apr. 2010. [Online]. http://www.aluplanet.com/documenti/InfoAlluminio/al_trasporto_ferroviario.pdf
- [3] P. Ferro, F. Bonollo, and A. Tiziani, "Analisi numerica e teorica del campo di tensioni indotte dal processo di saldatura di piastre in lega leggera," in *XXXI Convegno Nazionale AIAS*, Parma, 1982.
- [4] J. Canas, R. Picòn, F. Paris, A. Blazquez, and J.C. Marin, "A Simplified Numerical Analysis of Residual Stresses in Aluminium Welded Plates," *Computers & Structures*, vol. 58, no. 1, 1996.
- [5] American Society for Metals, *Welding, Brazing and Soldering*, Metals Handbook, 9° ed. vol. 6.
- [6] Q. Yan and H. Kutsuna, "Study on porosity formation in laser welds in aluminum alloys: Effects of hydrogen and alloying elements," *Welding International*, vol. 12, no. 12, 1998.
- [7] Katayama, Matsunawa Xijing, "Character of melting and evaporation in laser beam welding of two Aluminum alloys," *Welding Research Supplement*, Feb. 1997.
- [8] Martukanitz, *Selection and weldability of heat-treatable Aluminum alloys*, 7th ed.: American Welding Society.
- [9] Dickerson, *Welding of Aluminum alloys*, 7th ed.: American Welding Society.
- [10] Cross, *Selection and weldability of non-heat-treatable Aluminum alloys*: American Welding Society.
- [11] L.E. Svensson, *Control of Microstructures and Properties in Steel Arc Welding*: CRC Press, 1993.
- [12] Gene MAters, *The welding of aluminium and its alloys*. Abington Hall, Abington Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited, , 2002.
- [13] R.J. Hung and G.J. Zhu, "The variable polarity plasma arc welding process: characteristics and performance," University of Alabama, 1991.
- [14] J Micheli and C. Pilcher, "Advanced variable-polarity plasma arc welding," *The Fabricator*, novembre 2000.
- [15] S. Schiller, U. Heisig, and S. Panzer, *Electron Beam Technology*: Wiley-Interscience.
- [16] Cieslak, *Cracking phenomena associated with welding*, 7th ed.: American Welding Society.

9 Abbreviazioni ed acronimi

FEM: finite element method (metodo degli elementi finiti)
MIG: metal inert gas (saldatura ad arco con elettrodo metallico e gas inerte)
ZTA: zona termicamente alterata
HAZ: heat altered zone (vedi ZTA)
GTAW: gas tungsten arc welding (saldatura ad arco con elettrodo in tungsteno e gas inerte)
LBW: laser beam welding (saldatura con fascio laser)
TIG: tungsten inert gas (vedi GTAW)
PAW: plasma arc welding (saldatura al plasma)
AFS: aluminium foam sandwich