

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica Sessione di Laurea Ottobre 2021

Oscillazione del robot durante una saldatura CMT di un giunto a sovrapposizione

Relatore: Candidato: Franco Lombardi Francesco Russo

Correlatore: Mattia Orlando

ANNO ACCADEMICO 2020/2021

ABSTRACT

La saldatura Cold Metal Transfer ha rivoluzionato il modo di saldare lamiere di metalli simili e dissimili.

É solitamente scelta per saldare metalli sottili che sono soggetti a deformazioni e bruciature grazie alla sua più alta efficienza rispetto alle altre saldature GMAW e consente una saldatura precisa di materiali come acciaio e alluminio, con pochissime scorie e spruzzi.

Il presente lavoro ha come obiettivo la ricerca di un movimento ottimale della torcia che porti ad una più alta qualità di saldatura di due piastre in alluminio 6HS - s650 Novelis di spessore 3 mm.

Tra le tante tipologie di movimento, il pendolamento applicato alla giunzione di lamiere in sovrapposizione è quello su cui ci si concentra maggiormente. Tale movimento, favorendo una maggiore penetrazione e producendo un cordone di saldatura più ampio, può aumentare l'efficienza del processo di saldatura ed è quindi ampiamente utilizzato per ridurre la formazione di pori e impedire alle scorie di essere intrappolate, a patto che questo movimento segua una legge ben definita e sia eseguito con l'ampiezza opportuna. Per stabilire i parametri da utilizzare nella macchina di saldatura, una Fronius TPS 400i, si sono inizialmente effettuate varie ricerche in letteratura per cercare di fissare i valori ottimali di corrente, tensione, velocità di avanzamento filo e di spostamento, e dell'angolo di inclinazione della torcia.

Stabiliti tali parametri, la tesi prosegue con la descrizione delle analisi di resistenza e qualità del giunto da applicare ai provini, quali analisi metallografica, di microdurezza e prove di trazione.

In conclusione, per alleviare le tensioni residue provocate dalla saldatura, vengono illustrati i principali trattamenti termici da effettuare per ottenere le proprietà meccaniche desiderate, tenendo bene a mente che l'oscillazione può portare a un apporto termico che differisce da quello provocato da un andamento di tipo lineare.

Sommario

Ca	apitolo 1	1
	Introduzione	1
Ca	apitolo 2	3
	Termini generali della saldatura GMAW	3
	Classificazione dei processi di saldatura	7
	Saldatura MIG e MAG	. 10
	Metodologie di apporto del materiale	. 13
	Dip transfer arc	. 15
	Intermediate Arc	. 16
	Spray arc	. 17
	Pulsed arc	. 19
	Combined arc	. 20
	CMT	. 20
	Low spatter Control	. 28
	Pulse Multi Control	. 29
	Stabilizzatore della lunghezza d'arco	. 29
	Stabilizzatore di penetrazione	. 30
Cá	apitolo 3	. 32
	Diffusione e saldabilità dell'alluminio	. 32
	Influenza degli elementi leganti sull'alluminio	. 36
	Serie 1xxx (Alluminio non legato)	. 39
	Serie 2xxx (Alluminio-Rame)	. 39
	Serie 3xxx (Alluminio – Manganese)	. 40
	Serie 4xxx (Alluminio – Silicio)	. 41
	Serie 5xxx (Alluminio – Magnesio)	. 42
	Serie 6xxx (Alluminio - Magnesio - Silicio)	. 42
	Serie 7xxx (Alluminio – Zinco – Magnesio)	. 43
	Altri elementi	. 44
	Cromo (Cr)	. 44
	Nichel (Ni)	. 44
	Titanio (Ti)	. 44
	Zirconio (Zr)	. 44
	Litio (Li)	. 44
	Piombo (Pb) e Bismuto (Bi)	. 44

Leghe trattabili e non trattabili termicamente	45
Difetti di saldatura dell'alluminio	46
Capitolo 4	49
L'importanza dell'oscillazione	49
Saldature manuali e automatiche	50
Descrizione attività	52
Caratteristiche di oscillazione	53
Capitolo 5	69
Attività di preparazione provini	69
Brevi considerazioni sul pendolamento	75
Provini pre-saldatura	78
Parametri di saldatura	80
Analisi metallografica	88
Microdurezza	93
Prova di trazione	95
Capitolo 6	101
I trattamenti termici	101
Conclusioni	105
Bibliografia	107

Capitolo 1

Introduzione

Negli ultimi anni, l'industria aerospaziale, automobilistica e dei treni ad alta velocità si sono sviluppati rapidamente. I requisiti di leggerezza stanno diventando sempre più importanti nella produzione. La forma delle parti è sempre più complessa e il metodo di lavorazione tradizionali non sono stati in grado di soddisfare i requisiti complessi. Nuove tecniche di saldatura, quali saldatura con robot oscillante, potrebbero soddisfare queste richieste.

Un movimento oscillante infatti potrebbe favorire una maggiore penetrazione, produrre un cordone di saldatura più ampio e aumentare l'efficienza del processo di saldatura portando quindi a giunzioni di buona qualità.

Tutto questo però deve essere accompagnato da una dimostrazione sul campo tramite un iniziale lavoro di preparazione e di una successiva attività di saldatura che deve essere portata a termine per trarre delle conclusioni ben precise riguardo questo metodo di giunzione innovativo che nessuno ancora ha sperimentato.

La diffusione del pendolamento del robot per saldare lastre in metallo mediate saldatura MIG/MAG è infatti abbastanza poco sviluppata. La maggior parte dei lavori che si sono ricercati per trarre delle informazioni iniziali sperimentano questo tipo di movimento sulla produzione additiva tramite arco di saldatura (WAAM) che permette la produzione di pezzi su larga scala a basso costo e con minor perdita di materiale.

Sebbene queste ricerche possano risultare molto utili nel comprendere l'effetto del movimento della torcia sulla qualità della saldatura, le loro applicazioni sul mondo della fabbricazione additiva fanno nascere delle problematiche che si discostano molto da quelle che sono le problematiche che si dovrebbero riscontrare in una saldatura per sovrapposizione (tra cui rifusione dello strato precedente causato dallo strato superiore). Il solo movimento della torcia comporta una serie di parametri e valori da tenere sotto controllo, per di più la tecnologia CMT è relativamente recente, per cui gli articoli che studiano un movimento della torcia non lineare combinato con una saldatura Cold Metal Transfer sono pressoché inesistenti.

Per tale motivo questa tesi si pone l'obiettivo di ricercare informazioni necessarie per identificare il giusto metodo teorico da portare avanti per realizzare una giunzione a sovrapposizione con processo CMT a torcia oscillante.

La strada più efficace per la preparazione di questa attività si è rivelata essere quella della ricerca di articoli molto vicini al presente lavoro.

Si partirà quindi da una iniziale descrizione dei metodi di saldatura maggiormente noti per poi spiegare le caratteristiche e il perché del materiale scelto.

Una attività successiva di tipo sperimentale necessita di una struttura a cui far riferimento. Si è partiti dalla preparazione del materiale di saldatura che necessita di informazioni e normative ben precise a cui far fede. Queste verranno riportate affinché ogni aspetto sia affrontato con precisione lasciando poco spazio alle ipotesi. Tra i tanti articoli letti, alcuni necessitano di attenzioni particolari e verranno quindi riportati per rispondere alle problematiche che via via si presentano. Una volta definita la configurazione con cui eseguire la saldatura, e una volta definiti quali parametri poter far variare in modo tale che ci possa essere un confronto tra i vari giunti effettuati, verrà esplicitato in modo in cui poter verificare la qualità della saldatura, partendo sempre da una analisi di letteratura.

Per questo lavoro ci aspetta una molteplicità di parametri che possono essere applicati per controllare il movimento e la deposizione di materiale, e non sarà decisamente possibile pretendere di considerarli tutti.

Si presuppone quindi che questi vadano valutati attentamente sia per ridurre il numero di prove da attuare restringendole a quelle effettivamente necessarie e utili per lo studio, sia perché i loro valori se non corretti possono facilmente alterare la qualità della saldatura.

Capitolo 2

Termini generali della saldatura GMAW

La saldatura ad arco GMAW è ampiamente utilizzata nell'unione di materiali, nella riparazione di componenti difettosi e nella fabbricazione additiva per l'elevata efficienza di produzione, basso costo delle apparecchiature e le eccellenti proprietà meccaniche. Il procedimento di saldatura MIG/MAG è un procedimento a filo continuo in cui la protezione del bagno di saldatura è assicurata da un gas di copertura, solitamente gas Argon, che fluisce dalla torcia sul pezzo da saldare. Il fatto che sia un procedimento a filo continuo garantisce un'elevata produttività al procedimento stesso e contemporaneamente la presenza di gas permette di operare senza scoria (entrambe queste caratteristiche aumentano l'economicità del procedimento nei confronti della saldatura a elettrodo).

Nel processo GMAW il filo d'apporto viene riscaldato dall'arco ad alta temperatura e si trasforma in goccioline; le goccioline si staccano e urtano sul substrato, quindi vanno a formare il bagno di saldatura sotto l'influenza della pressione dell'arco plasma, della gravità e della forza elettromagnetica.

Infine, il metallo fuso si solidifica e forma il cordone di saldatura per irraggiamento, convezione e conduzione del calore nell'ambiente circostante. Pertanto, il GMAW è un processo complicato in cui la fisica dell'arco, il trasferimento di calore, la metallurgia e la meccanica sono coinvolti. Durante la saldatura con questo processo può essere generata una quantità significativa di fumi in cui la maggior parte di essi derivano dal consumo dell'elettrodo e non dal metallo di base.

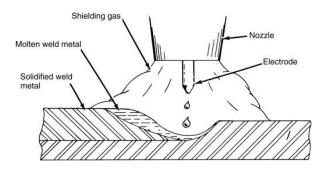


Figura 1: Torcia, elettrodo e gas

Il processo GMAW è emerso alla fine degli anni '40, quando un filo di elettrodo alimentato in modo continuo ha sostituito l'elettrodo di tungsteno nel processo di GTAW poiché più conveniente. Oggi, la saldatura GMAW viene utilizzata per un'ampia varietà di applicazioni: nei settori della produzione industriale, dell'agricoltura, dell'edilizia, della costruzione navale, dell'industria marina e dei veicoli terrestri e dell'industria mineraria. Il processo viene utilizzato nella costruzione di tubi di saldatura, recipienti a pressione, componenti strutturali in acciaio, componenti automobilistici e numerosi altri prodotti. Tutti i metalli commercialmente importanti tra cui acciaio al carbonio, acciaio bassolegato ad alta resistenza, acciaio inossidabile, alluminio, rame, titanio e leghe di nichel possono essere saldati in tutte le posizioni con il processo GMAW scegliendo la combinazione appropriata di gas di protezione, elettrodi e saldature variabili.

Questo processo di saldatura può essere utilizzato su lamiere sia spesse che sottili, nonché su alluminio e altri materiali non ferrosi. La compatibilità metallurgica è necessaria per prevenire fessurazioni nella ZTA o nei metalli di base, e per produrre una microstruttura nella zona di saldatura in grado di fornire adeguate prestazioni del giunto e resistenza alla corrosione. Ad esempio, nella saldatura di un acciaio a basso tenore di carbonio con un acciaio ad alta lega, il bordo di fusione può contenere livelli inaccettabili di fase martensite molto dura e fragile, che ridurrà la resistenza del giunto. Per alcuni metalli metallurgicamente incompatibili, può essere possibile eseguire una saldatura soddisfacente utilizzando un materiale di riempimento adatto.

Una macchina per saldatura MIG/MAG è composta dai seguenti componenti:

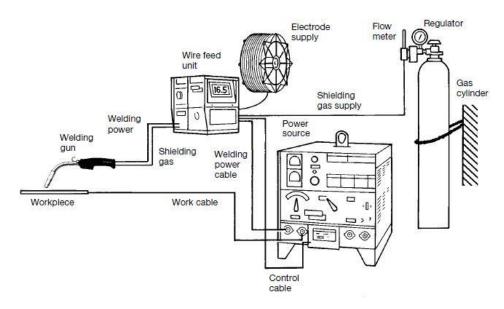


Figura 2: Componenti macchina MIG/MAG

L'attrezzatura per la saldatura ad arco di metallo a gas è costituita da una pistola di saldatura, un alimentatore, un'alimentazione di gas di protezione e un sistema di azionamento del filo che estrae l'elettrodo da una bobina e lo spinge attraverso una pistola di saldatura.

Passando attraverso la pistola il filo viene energizzato dal contatto con un tubo in rame che trasferisce la corrente dalla fonte di alimentazione all'arco.

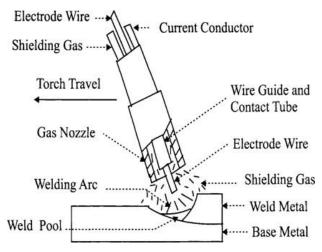


Figura 3: Rappresentazione torcia

Ovviamente la presenza di tutti questi componenti ne fa aumentare notevolmente il prezzo rispetto ad una macchina per saldatura ad elettrodo.

Nella saldatura MIG la tensione, la corrente e la velocità di avanzamento del filo devono essere controllate per produrre una saldatura solida.

La tensione controlla il profilo di saldatura, mentre la corrente controlla l'apporto di calore, la dimensione della saldatura e la profondità di penetrazione.

In studi precedenti sono stati utilizzati molti metodi di saldatura per l'unione di leghe di alluminio, tra cui saldatura ad arco con uso di metallo sotto protezione di gas (GMAW), saldatura ad arco TIG (o GTAW), saldatura ad attrito e agitazione (FSW), saldatura a fascio laser, saldatura a resistenza per punti, saldatura a plasma-MIG e saldatura a punti per attrito con agitazione (FSSW).

La saldatura GMAW viene comunemente eseguita per l'unione di diverse parti in lega di Al grazie al suo elevato tasso di saldatura. Tra i diversi metodi di saldatura per le leghe di Al, GMAW ha anche il vantaggio di un basso costo e di una facile implementazione. Finora i processi di saldatura MIG e TIG sono ancora le tecniche di giunzione più comuni per le leghe di Al nonostante siano in fase di sviluppo processi di giunzione più avanzati. Recentemente sono state condotte indagini sulle proprietà meccaniche, sulla vita a fatica, sulla tolleranza al danno, sulla resistenza alla corrosione e sulle prestazioni di saldabilità. I perfezionamenti in GMAW per la saldatura anche dell'acciaio hanno portato all'uso di miscele di gas, tra cui CO₂ e Argon, e persino ossigeno e Argon. Piccole quantità di ossigeno (fino al 5%) vengono talvolta miscelate con Argon. Le opportune miscele producono prestazioni dell'arco più uniformi, meno spruzzi e una migliore bagnatura (vale a dire, diffusione e adesione) della saldatura al metallo di base. Alcune di queste sono state standardizzate e sono disponibili in commercio in bombole. La selezione dei gas (e delle sue miscele) dipende dal metallo da saldare e da altri fattori. I gas inerti vengono utilizzati per la saldatura di leghe di alluminio e acciai inossidabili, mentre la CO2 o una miscela di argon/anidride carbonica è comunemente utilizzata per la saldatura di acciai a basso e medio tenore di carbonio. La combinazione del filo di elettrodo e dei gas di protezione elimina lo strato di scoria sul cordone di saldatura e quindi preclude la necessità di molatura e pulizia manuale della scoria dalla zona di saldatura depositata. Il processo GMAW è quindi ideale per eseguire più passate di saldatura sullo stesso giunto, ed è ottenibile una velocità di produzione molto più elevata.

La GMAW può essere ottenuta in tre modi diversi:

- Saldatura semiautomatica: l'apparecchiatura controlla solo l'alimentazione del filo dell'elettrodo. Il movimento della pistola di saldatura è controllato manualmente.
 Questa può essere chiamata anche saldatura manuale.
- Saldatura a macchina: utilizza una pistola collegata a un robot di qualche tipo (non portatile). Un operatore deve impostare e regolare costantemente i controlli che muovono il robot.
- Saldatura automatica: utilizza apparecchiature che saldano senza la regolazione costante dei comandi da parte di un saldatore o di un operatore. Su alcune apparecchiature i dispositivi di rilevamento automatico controllano il corretto allineamento della pistola in un giunto di saldatura.

Classificazione dei processi di saldatura

I processi di saldatura costituiscono un universo piuttosto ampio e diversificato che nel tempo si è adattato allo sviluppo dei materiali e delle tecnologie produttive.

A livello macroscopico possiamo dire che i processi che sono stati maggiormente sviluppati in ambito industriale appartengono al gruppo della saldatura per fusione.

Tali processi utilizzano calore generato in vari modi per fondere il materiale base.

La saldatura ad arco è sempre stata la più diffusa e la più utilizzata e i processi di questo gruppo di saldatura sono sempre più in via di sviluppo.

La saldatura ad arco è la saldatura per fusione in cui il calore per la saldatura è ottenuto da un arco o archi elettrici.

La classificazione delle saldature arco per le quali ci soffermeremo è contenuta nella norma europea EN 4063:

CLASSIFICAZIONE CLASSIFICAZIONE		TIPOLOGIA	
EN 4063	AWS		
111	SMAW	Saldatura ad arco con elettrodo	
		rivestito	
		Shielded metal arc welding	

121	SAW	Saldatura ad arco sommerso	
		Submerged arc welding	
131	GMAW	Saldatura ad arco in gas inerte con filo	
		elettrodo fusibile MIG	
		Gas metal arc welding	
135	GMAW	Saldatura ad arco in gas protettivo	
		attivo con filo elettrofusibile MAG	
		Gas metal arc welding	
136	FCAW	Saldatura con filo animato sotto	
		protezione di gas MAG	
		GMAW using active gas and flux cored	
		electrode	
141	GTAW	Saldatura con elettro infusibile sotto	
		protezione di gas inerte TIG	
		Gas tungsten arc welding	
151	PAW	Saldatura ad arco plasma	
		Plasma arc welding	

Tabella 1: Classificazione secondo normativa EN4063

Si tratta di saldature autogene in quanto il metallo base prende parte, fondendo, alla formazione del giunto; il metallo d'apporto può non esserci a secondo del procedimento e dello spessore.

Quando è presente, è metallurgicamente simile al metallo base poiché si tende ad ottenere nella giunzione una continuità strutturale e una resistenza meccanica pari a quella dei pezzi da saldare.

La saldatura SMAW è un tipo di saldatura ad arco manuale che utilizza un elettrodo consumabile e protetto. Quando l'elettrodo si scioglie, la copertura che protegge l'elettrodo si scioglie e protegge l'area di saldatura dall'ossigeno e da altri gas atmosferici. Con questo metodo la porosità spesso non è visibile senza l'uso di metodi di prova non distruttivi avanzati, e questo difetto di solito influisce fortemente sulla resistenza e sulla

qualità della saldatura. Questo processo di saldatura viene utilizzato per acciaio al carbonio, acciaio bassolegato, acciaio altolegato, acciaio inossidabile, ghisa e ghisa duttile. L'attrezzatura richiesta è semplice, il che significa che il metodo è semplice da usare. Può essere utilizzato anche all'esterno, a differenza di altri metodi che richiedono gas di protezione che non sono adatti per un uso all'aperto. Tuttavia il tempo per realizzare questa saldatura è abbastanza elevato a causa del tempo necessario per eliminare la scoria dopo la saldatura e il cambio degli elettrodi.

La saldatura ad arco sommerso (SAW) è ampiamente utilizzata per saldare lamiere relativamente spesse con elevate velocità di deposito del metallo. Il calore per questo processo è derivato dall' arco tra l'elettrodo di metallo e il pezzo. SAW differisce da altri processi di saldatura ad arco in quanto l'arco non è visibile. È schermato da uno strato di materiale fusibile granulare chiamato flusso, che è posto sopra l'area del giunto a monte dell'arco. La pressione non viene utilizzata e il metallo d'apporto è ottenuto principalmente dal filo dell'elettrodo che viene continuamente alimentato attraverso lo strato di flusso nell'arco e nel bagno di flusso fuso. Una caratteristica unica di SAW è che il materiale del flusso granulare copre l'area di saldatura e previene l'emissione di radiazioni dell'arco, scintille, spruzzi e fumi. Oltre a schermare l'arco dalla vista, il flusso produce una scoria che protegge il metallo di saldatura, riducendo la velocità di raffreddamento e aiutando a modellare il contorno della saldatura.

La saldatura ad arco animato (FCAW) è un processo di saldatura ad arco che richiede un elettrodo tubolare consumabile alimentato continuamente, con un gas di protezione fornito dall'esterno a volte utilizzato per generare la necessaria protezione dall'ambiente. Questo processo di saldatura è interessante perché fornisce generalmente una buona penetrazione nel metallo di base e viene normalmente utilizzato negli acciai dolci e debolmente legati, negli acciai inossidabili e nelle leghe ad alto contenuto di Nichel. La saldatura ad arco animato è simile per molti aspetti alla saldatura MIG/MAG, tranne per il fatto che in una versione del processo non viene aggiunto gas di protezione. In questo caso lo scudo a gas ha origine dalla decomposizione dei minerali contenuti nell'elettrodo a nucleo tubolare ed è talvolta indicata come saldatura autoschermata.

La saldatura TIG, nota anche come saldatura con elettro infusibile sotto protezione di gas inerte, è un processo di saldatura ad arco che utilizza un elettrodo di tungsteno non consumabile per produrre la saldatura. Il metallo d'apporto viene aggiunto da una fonte esterna, solitamente come barra d'apporto di metallo. L'area del bagno di saldatura è protetta dall'atmosfera e dalla possibile contaminazione da un gas inerte di protezione, come l'Argon. Normalmente viene utilizzato un metallo d'apporto, sebbene alcune saldature note come saldature autogene non lo richiedano. Questa tipologia GTAW è più adatta per saldare sezioni sottili di acciaio inossidabile e metalli leggeri come alluminio, magnesio e leghe di rame. Il processo consente all'operatore un maggiore controllo sul processo di saldatura rispetto ad altri metodi, il che si traduce in saldature più forti e ad alta integrità.

Rispetto a GMAW e SMAW vengono generati significativamente meno fumi. I fumi generati durante GTAW provengono principalmente dal metallo di base e dal metallo d'apporto esterno se utilizzato.

Gli svantaggi sono che GTAW è più complesso e più lento di molte altre tecniche di saldatura.

La saldatura al plasma è simile a quella TIG, dal momento che si utilizza il filo in tungsteno attorno al quale viene emesso gas ionizzato ad altissima velocità che diventa plasma.

Questo processo si presta per la saldatura di grossi spessori ed è caratterizzato da un'altissima resa sia in termini di produttività sia in termini di qualità e a costi relativamente contenuti.

Saldatura MIG e MAG

Queste tipologie di lavorazione si distinguono l'una dall'altra per via del tipo di gas utilizzato per la protezione del bagno di saldatura. Infatti, per la MIG è inerte e per la MAG è attivo. Nella terminologia del settore entrambe vengono definite come saldature GMAW, Gas Metal Arc Welding, ovvero come saldatura ad arco con uso di metallo sotto protezione di gas.

Il processo MIG quindi si verifica quando si crea un arco tra un elettrodo a filo e il pezzo in lavorazione che li fonde entrambi per formare un bagno fuso. L'elettrodo viene alimentato continuamente e viene utilizzato un gas di protezione. Il processo è

considerato semiautomatico poiché l'avanzamento del filo e la lunghezza dell'arco sono controllati dalla potenza, ma la velocità di spostamento e il posizionamento sono controllati manualmente.

Per una saldatura MIG ottimale occorre valutare la tensione, la portata e la velocità di avanzamento del filo ottimali. La velocità di spostamento impiegata da un saldatore influenzerà la qualità e la forma della saldatura.

I gas di protezione sono necessari poiché utilizzati per proteggere il bagno di saldatura dai contaminanti presenti nell'aria. I tipi più comuni di gas utilizzati durante il processo sono Argon ed Elio, entrambi gas inerti. Ciò significa che non subiscono reazioni chimiche. I generatori a tensione costante (CV) sono utilizzati per la maggior parte della saldatura MIG e altri processi semiautomatici. La fonte di alimentazione fornisce una tensione costante alla lunghezza dell'arco durante il processo. Esiste una funzione di autocorrezione della lunghezza dell'arco che aiuta a produrre condizioni di saldatura stabili.

I processi di saldatura MIG operano con polarità inversa, dove l'elettrodo a filo è positivo. Questo perché viene generato più calore, il che aiuta a ridurre la possibilità di difetti dovuti alla mancanza di fusione.

Esistono numerosi vantaggi per chi utilizza la saldatura MIG che la rendono uno dei processi di saldatura più utilizzati:

- Semplicità: rispetto ad altri processi di saldatura, la saldatura MIG è considerata semplice da imparare ed è un'operazione con una sola mano.
- Versatilità: la saldatura MIG può essere utilizzata per saldare una vasta gamma di metalli e leghe per il quale è disponibile una gamma di materiali per elettrodi a filo d'apporto.
- Minor pulizia: un gas di protezione protegge l'arco durante il processo di saldatura, il che significa che c'è una produzione minima di spruzzi e scorie e una minore pulizia al termine del lavoro.
- Controllo: ci sono una serie di impostazioni sulle saldatrici MIG che consentono agli utenti di controllare la polarità, la velocità del filo e l'amperaggio.
- Efficienza: grazie ad un controllo migliore aumenta la velocità di saldatura e
 l'automazione rendendo più facile l'esecuzione del processo.

Sebbene ci siano molti vantaggi nella saldatura MIG è anche importante sapere quali potrebbero essere alcuni dei contro:

- Costo: il costo di una saldatrice MIG è relativamente alto, con la necessità di una corretta manutenzione e sostituzione delle parti.
- Uso solo in interni: le saldatrici MIG non sono costruite per essere portatili e il vento può spazzare via il gas di protezione necessario per proteggere l'arco rendendolo un processo inadatto per l'esterno.
- Burn-through: esiste la possibilità di bruciare materiali con uno spessore inferiore a 0,5 mm, il che lo rende una scelta meno adatta per l'uso con determinati metalli sottili.
- Posizioni di saldatura limitate: l'elevato apporto di calore e la fluidità del bagno di saldatura forniti con una saldatrice MIG rendono difficile la saldatura verticale o sopraelevata.

Nelle saldature MAG vengono utilizzate miscele di gas attivi come anidride carbonica (CO_2) o ossigeno miscelato con Argon. Essa necessita di fili di composizione adatta (Si e Mn per la disossidazione del bagno) e il trasferimento del metallo fuso avviene tramite grosse gocce che possono causare spruzzi. Gas particolari come lo Shutgas (80% Ar, 15% CO_2 e 5% O_2) risolvono il problema ma aumentano i costi.

Il processo di saldatura MAG può essere utilizzato in una vasta gamma di settori e industrie. Questi possono includere:

- Saldatura di tubi
- Produzione
- o Manutenzione e produzione automobilistica
- o Edilizia e infrastrutture
- Costruzione navale

Dai grandi impianti industriali alle piccole officine di riparazione, la saldatura MAG è una scelta comune e utilizzata per molte applicazioni. Le miscele di gas attivo utilizzate nel processo sono state sviluppate principalmente per la saldatura degli acciai.

Così come per la tipologia MIG, anche la saldatura MAG presenta diversi vantaggi:

Processo più pulito: poiché viene utilizzato un gas di protezione per proteggere
 l'arco, vengono prodotti spruzzi minimi e nessuna scoria da pulire in seguito.

- Elevata velocità di lavoro: la saldatura MAG è considerata un'operazione "a una mano" e consente ai saldatori di migliorare il controllo mantenendo una velocità costante.
- Versatilità: la saldatura MAG può essere eseguita nella maggior parte delle posizioni di saldatura.
- Economicità: rispetto ad altri metodi di saldatura, la saldatura MAG può essere più economica nel tempo poiché le punte degli elettrodi rivestite non vengono bruciate.

Sebbene ci siano molti vantaggi nella saldatura MAG, ci sono alcuni aspetti negativi da tenere a mente:

- Non può essere utilizzato all'aperto: dato che la saldatura MAG utilizza un gas di protezione durante il processo, può essere eseguita solo all'interno poiché il vento può spazzare via il gas e contaminare il progetto.
- Sensibilità ai contaminanti: aspetti come ruggine, sporco, olio e vernice possono causare problemi con la saldatura MAG che può essere sensibile a queste sostanze.
- Vulnerabile alla porosità e alla mancanza di fusione: la porosità è causata dall'azoto e dall'ossigeno intrappolati a causa della scarsa schermatura del gas.
 Una pulizia superficiale insufficiente può contribuire alla mancanza di fusione.

Metodologie di apporto del materiale

Quando si utilizza la saldatura MAG si possono utilizzare diverse modalità di trasferimento, ovvero il modo in cui il metallo viene inviato dall'elettrodo al pezzo da lavorare.

L'arco è un requisito fondamentale per la saldatura MIG/MAG. Il prerequisito di base per la formazione dell'arco è un circuito chiuso. Ogni circuito ha un polo con carica positiva e uno con carica negativa. Il polo caricato negativamente ha un eccesso di elettroni. Il contatto tra l'elettrodo a filo e il pezzo crea un cortocircuito che provoca il riscaldamento della punta dell'elettrodo a filo a tal punto che possono fuoriuscire

elettroni a polarità negativa. La tensione applicata all'interno del circuito fa sì che gli elettroni sulla strada per il polo positivo accelerino a velocità elevate.

Se incontrano atomi di gas neutri nella colonna dell'arco, vengono rilasciati elettroni aggiuntivi e l'atomo di gas viene convertito in uno ione positivo.

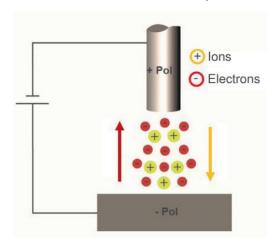


Figura 4: Circuito

Questo processo, e quindi il tipo di arco, dipende dalla tensione e dalla velocità del filo. Se la tensione e la velocità del filo aumentano, il volume della goccia aumenta e il trasferimento di materiale diventa privo di cortocircuiti.

Differenti tipi di arco esistono per le saldature MIG/MAG tra cui:

- Dip transfer arc
- Intermediate arc
- Spray arc
- Pulsed arc
- High performance arc
- CMT arc

Il tipo di arco utilizzato durante il trasferimento del materiale dipende dalla tensione di saldatura (Us) e dall'amperaggio di saldatura (As).

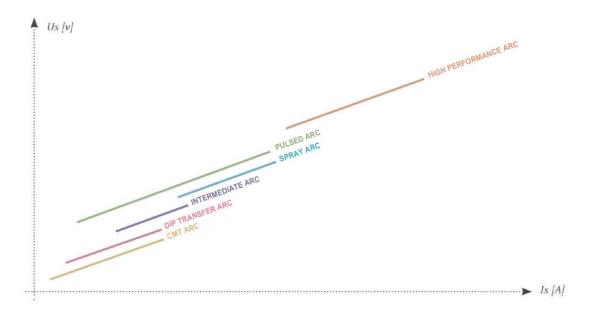


Figura 5: Tipo di arco in funzione della tensione e della corrente di saldatura

Se l'amperaggio o la tensione di saldatura aumenta, il tipo di trasferimento del materiale cambia durante la saldatura MIG/MAG:

Come già detto, all'aumentare della tensione dell'arco il volume della goccia aumenta e il trasferimento di materiale diventa privo di cortocircuiti.

All'aumentare dell'amperaggio invece aumenta il numero di goccioline. Allo stesso tempo il volume diminuisce.

Dip transfer arc

Il Dip transfer arc incontrollato è un arco nel range di potenza inferiore con un elettrodo a filo consumabile.

L'arco di trasferimento per immersione viene acceso attraverso un breve contatto tra l'elettrodo a filo e il pezzo in lavorazione. Ciò produce una corrente di cortocircuito elevata e in rapido aumento.

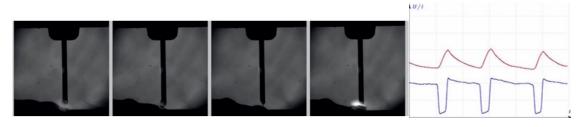


Figura 6: Dip transfer arc

Il calore provoca la liquefazione dell'elettrodo a filo e il distacco della goccia di saldatura. Una volta che il ponte di cortocircuito si rompe, l'arco si riaccende.

Con il Dip transfer arc incontrollato è possibile saldare praticamente in qualsiasi posizione anche se la velocità di deposizione è bassa. È quindi ideale per la saldatura di componenti sottili, saldature fuori posizione, passate in profondità e per colmare il gap di saldatura.

Con la funzione Low Spatter-Control (LSC) viene creato un Dip transfer arc modificato con una stabilità dell'arco estremamente elevata. Il principio LSC si basa sulla premessa che il cortocircuito viene dissipato a un basso livello di corrente. Ciò si traduce in una riaccensione delicata e in un processo di saldatura stabile. L'utente può quindi ottenere risultati eccezionali in combinazione con lo stabilizzatore di penetrazione, soprattutto in uno Spray arc. Questa tipologia è molto diversa dal metodo incontrollato.



Figura 7: Dip transfer arc modificato

Con il Dip transfer arco modificato l'utente ottiene cordoni di saldatura di alta qualità con pochissimi schizzi e un maggiore tasso di deposito.

Intermediate Arc

Con l'arco intermedio si alternano trasferimenti a cortocircuito e spray.

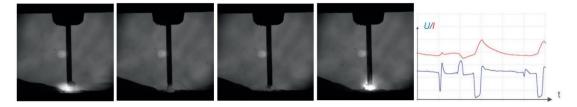


Figura 8: Intermediate arc

Con questo, il passaggio tra cortocircuiti e trasferimenti spray avviene ad intervalli irregolari. Inoltre, vi è un aumento degli spruzzi poiché la corrente relativamente elevata

ha un forte effetto sulle gocce di saldatura. Ecco perché un uso efficace dell'arco intermedio è praticamente impossibile. L'arco intermedio dovrebbe quindi essere sempre evitato.

Spray arc

Lo Spray arc brucia continuamente senza interruzioni di cortocircuito.

Il metallo d'apporto si trasferisce quindi ad alta velocità e in goccioline fini nel bagno di fusione.

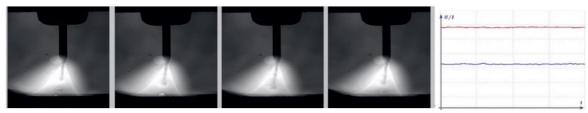


Figura 9: Spray arc

L'elevata energia termica dell'arco spray crea una zona termicamente alterata più ampia rispetto al Dip transfer arc. Questo è il motivo per cui anche la distorsione del pezzo è maggiore con lo Spray arc.

Le caratteristiche includono un'elevata velocità di deposito e una penetrazione profonda. Non essendoci cortocircuiti, l'arco è stabile e privo di spruzzi. Un prerequisito per una saldatura ad arco spray di successo è che i valori di corrente e tensione siano superiori a determinati limiti. Ciò a sua volta significa che viene fornito più calore al pezzo rispetto alla saldatura ad arco corto e solo i materiali di spessore pari o superiore a 5 mm sono adatti per la saldatura ad arco spray. L'elevato apporto di calore significa che anche il bagno di saldatura è grande, per cui la saldatura deve essere eseguita in posizione orizzontale. Va notato che non è possibile ottenere uno Spray arc puro quando si utilizza CO₂ come gas di protezione. Il gas di protezione deve essere Argon puro, preferibilmente con una piccola percentuale di CO₂ (non più del 25 %) o O₂. La saldatura Spray arc è particolarmente indicata per la saldatura MIG di alluminio e acciaio inossidabile per i quali il gas di protezione è principalmente l'Argon. Con un filo d'apporto sottile è possibile eseguire con successo la saldatura ad arco spray a correnti inferiori rispetto a un filo d'apporto più spesso.

La tensione dell'arco deve essere impostata appena sufficientemente alta da mantenere un arco privo di cortocircuiti. Il filo d'apporto è normalmente collegato al polo positivo.

Riassumendo, i vantaggi di questa tecnologia includono:

- elevate velocità di deposizione
- buona fusione e penetrazione
- buon aspetto del cordone di saldatura
- capacità di utilizzare fili di elettrodi di diametro maggiore
- presenza di pochissimi spruzzi.

La Figura 10 illustra come cambia la velocità delle gocce trasferite in relazione alla corrente di saldatura.

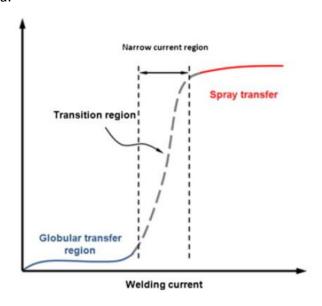


Figura 10: Velocità trasferimento gocce in funzione della corrente saldatura

A basse correnti le gocce sono grandi e vengono trasferite a velocità inferiori a 10 al secondo. Queste gocce si muovono lentamente, cadendo dalla punta dell'elettrodo mentre la gravità le spinge verso il basso, e tendono a colmare il divario tra l'estremità della punta dell'elettrodo e il bagno di saldatura fuso. Questo produce un cortocircuito momentaneo che genera schizzi. Tuttavia, la modalità di trasferimento cambia molto bruscamente al di sopra della corrente critica, producendo lo spruzzo desiderabile.

Pulsed arc

Con l'arco pulsato, il trasferimento del materiale è controllato con precisione da impulsi.

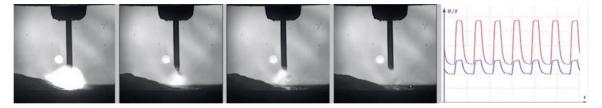


Figura 11: Pulsed arc

Nella fase della corrente di base, l'assorbimento di energia è ridotto a tal punto che l'arco non brucia in modo costante e la superficie del pezzo viene preriscaldata. Nella fase di corrente pulsante, un impulso di corrente accuratamente temporizzato garantisce un distacco preciso della goccia di saldatura. L'arco pulsato elimina quasi completamente i cortocircuiti indesiderati e le simultanee esplosioni di gocce, di conseguenza non ci sono praticamente spruzzi incontrollati.

Le fasi della corrente di fondo e impulsiva possono essere controllate o modulate per ridurre gli spruzzi nelle condizioni più rigorose.

Questi nuovi sviluppi consentono un controllo illimitato su variabili come:

- 1. Livello e durata della corrente di fondo e impulsiva
- 2. La velocità di caduta e caduta della corrente di impulso
- 3. La frequenza di pulsazione

Principalmente, ci sono due tipi di sistemi ad arco a impulsi:

- Arco pulsato con efficienza di deposizione costante.
 Possono essere controllati da computer con un dispositivo di commutazione che offre diversi tipi di modulazione. Questi hanno anche regolamenti di controllo e attuali strutture per le curve di salita e discesa. La caratteristica principale è che sono in grado di controllare una delle seguenti modalità:
 - Una goccia per impulso
 - Diverse gocce per impulso
 - Distacco della goccia dopo ogni secondo o terzo impulso
 - Operazioni di trasferimento di gocce con bridging, ottenute in breve tempo con interruzione dell'arco.

Il limite del sistema è nella penetrazione relativamente scarsa a causa della corrente di fondo sempre più negativa, ma ha un alto tasso di deposizione.

• Arco pulsato con efficienza di deposizione che cambia periodicamente

Vantaggi dell'arco pulsato:

- Saldatura con pochi spruzzi su tutta la gamma di potenza
- Controllo della penetrazione durante la saldatura a sovrapposizione
- Lavorazione di elettrodi di diametro maggiore per la saldatura di lamiere sottili (ad es. materiali in alluminio)

Combined arc

Gli archi combinati sono spesso costituiti da Pulsed arc e Dip transfer arc.

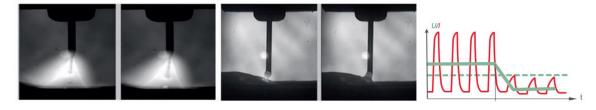


Figura 12: Combined arc

La penetrazione e l'apporto di calore necessari sono generati nella fase dell'arco pulsato.

La fase Dip transfer arc si occupa del raffreddamento nel bagno di fusione, garantendo

così una migliore controllabilità del bagno di fusione.

CMT

Il processo Cold Metal Transfer è quello su cui è necessario soffermarsi maggiormente poiché utilizzato nel caso in esame per la saldatura di un giunto per sovrapposizione in combinazione con una torcia oscillante.

Grazie alla presente tecnologia, il calore ridotto può offrire numerosi vantaggi tra i quali saldare senza spruzzi oppure realizzare giunti fino ad ora impossibili o comunque limitati. Ovviamente il termine "freddo" è relativo quando si parla di un processo di saldatura, ma se paragonato ad un processo MIG/MAG tradizionale quello CMT può effettivamente essere considerato un processo freddo.

Questa alternanza tra freddo e caldo può essere ottenuta grazie ad un'innovazione tecnologica di Fronius attraverso l'integrazione del movimento del filo nella regolazione del processo stesso.

Il processo CMT è particolarmente adatto per la saldatura di sottili lamiere in lega di alluminio a causa del basso apporto di calore e della leggera deformazione.

Quando applicato a sottili fogli di lega di alluminio usando un riempitivo della stessa composizione del metallo di base, la saldatura mostra una composizione quasi binaria.

Questa composizione è potenzialmente meno suscettibile a cricche da solidificazione, alla linea di fusione controllata, alla zona termicamente alterata più stretta e all'area della fase intermetallica ridotta. Le microstrutture per diversi parametri di saldatura rivelano una ricristallizzazione fine ai giunti e una distribuzione uniforme dei grani.

Per la prima volta tramite il processo CMT il movimento del filo viene integrato direttamente nella regolazione digitale del processo, la quale riconosce un cortocircuito e provvede al distacco della goccia ritraendo il filo. Il tutto è controllato da un sistema digitale.

Questa è la prima differenza rispetto alla saldatura Short arc tradizionale.

La seconda differenza consiste nel passaggio del materiale pressoché senza corrente. Il filo si muove in avanti e non appena si verifica il cortocircuito si ritrae nuovamente in modo automatico. Lo stesso arco voltaico durante la fase di bruciatura produce calore per un tempo estremamente ridotto riducendo da subito l'apporto di calore. Da qui l'alternarsi di caldo e freddo.

C'è però ancora una terza differenza fondamentale: il movimento di ritorno del filo favorisce lo stacco della goccia durante il cortocircuito; quest'ultimo viene controllato mentre la corrente di cortocircuito viene mantenuta bassa. Il risultato è un passaggio di materiale privo di spruzzi con un distacco della goccia preciso che garantisce una quasi identica quantità di materiale d'apporto fusa dopo ogni cortocircuito.

Tutte queste differenze consentono applicazioni che fino ad ora potevano essere realizzate unicamente a fronte di costi elevati.

La tecnologia CMT non offre soltanto una soluzione di saldatura/brasatura che lavora con un minor apporto di calore, bensì un vantaggio davvero interessante, ovvero un arco voltaico stabile.

Nella saldatura tradizionale la superficie del pezzo da lavorare e la velocità di saldatura possono influire sensibilmente sulla stabilità dell'arco voltaico. Tramite il processo CMT il rilevamento e la regolazione della lunghezza d'arco voltaico avvengono meccanicamente. Ciò significa che l'arco voltaico rimane stabile indipendentemente dalla tipologia di superficie del pezzo e dalla velocità di saldatura. Questo processo di saldatura può pertanto essere utilizzato ovunque e in qualunque posizione.

Poiché tale processo consente di lavorare con un minor apporto di calore ne deriva automaticamente un ulteriore vantaggio: la riduzione dei valori delle emissioni di sostanze nocive. Secondo quanto emerso da alcune ricerche effettuate le concentrazioni sono notevolmente inferiori rispetto ai valori di concentrazione della saldatura MIG. Si parla di 90% di Solfato metallico in meno e una riduzione fino al 63% dello Zinco rispetto alla tecnologia Short arc tradizionale.

Per quanto concerne le applicazioni automatizzate o manuali, il processo CMT si adatta a qualunque settore: dal settore automobilistico e relativo indotto alla costruzione di impianti industriali e di condutture, fino ai lavori di manutenzione e riparazione. Tutte le lamiere sottili a partire da uno spessore di 0.3 mm prediligono questo processo e più in generale tutte le applicazioni che devono soddisfare le esigenze più difficili dal punto di vista estetico. Fino ad ora simili applicazioni erano possibili unicamente in condizioni dispendiose oppure si ripiegava su altre tecnologie di unione. Così facendo si rinunciava ovviamente ai vantaggi offerti dal giunto saldato.

Il processo di trasferimento

Nel processo CMT, quando la punta del filo dell'elettrodo entra in contatto con il bagno fuso, il servomotore della torcia di saldatura viene invertito dal controllo del processo digitale. Ciò fa sì che il filo si ritragga favorendo il trasferimento di goccioline illustrato in Figura 13.

Durante il trasferimento del metallo, la corrente scende quasi a zero e quindi si evita la generazione di spruzzi. Non appena il trasferimento del metallo è completato, l'arco viene

riacceso e il filo viene nuovamente fatto avanzare con il ritorno della corrente di saldatura impostata.

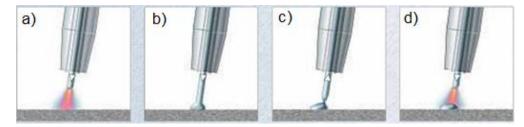


Figura 13: Fasi processo CMT. a) materiale condotto nel bagno di fusione. b) immergendo il materiale nel bagno di fusione l'arco voltaico si spegne e la corrente di saldatura si abbassa. c) movimento di ritorno del filo che favorisce il distacco della goccia durante il cortocircuito. d) il movimento del filo viene invertito e il processo ha nuovamente inizio.

Un tipico ciclo di segnale elettrico per saldatura CMT può essere definito come il periodo necessario per depositare una goccia di elettrodo fuso nel bagno di saldatura. L'analisi della forma d'onda di corrente e tensione è essenziale per studiare la distribuzione dell'energia delle diverse fasi nel processo di trasferimento delle gocce. Il ciclo è suddiviso in tre fasi come segue:

- La fase della corrente di picco: questa è una tensione d'arco costante corrispondente a un impulso di corrente elevato che provoca facilmente l'accensione dell'arco di saldatura e quindi riscalda l'elettrodo per formare una goccia.
- La fase della corrente di fondo: La fase corrisponde a una corrente inferiore. La corrente viene diminuita per impedire il trasferimento globulare della goccia di liquido formata sulla punta del filo. Questa fase continua fino al cortocircuito.
- La fase di cortocircuito: In questa fase la tensione dell'arco viene portata a zero.
 Contemporaneamente viene fornito il segnale di ritorno al trainafilo che
 conferisce al filo un movimento di arretramento. Questa fase favorisce il distacco
 del liquido e il trasferimento del materiale nel bagno di saldatura.

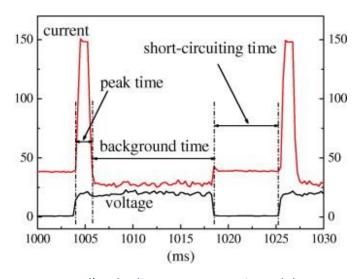


Figura 14: Forme d'onda di corrente e tensione del processo CMT.

Un sistema di saldatura CMT può essere schematizzato nel seguente modo in configurazione automatica o robot:

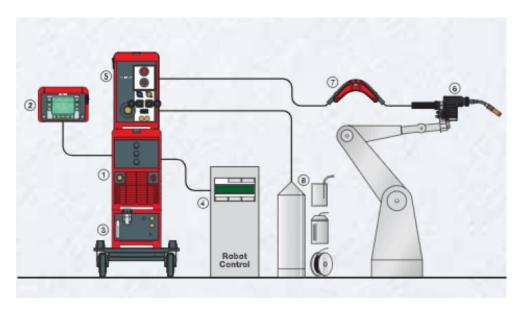


Figura 15: Sistema di saldatura CMT

In cui sono identificabili i seguenti elementi:

- 1. Generatore CMT a regolazione digitale e controllato da un microprocessore
- 2. Comando a distanza con display per controllo di dati di saldatura
- 3. Gruppo di raffreddamento per garantire un raffreddamento ottimale della torcia di saldatura
- 4. Interfaccia robot

- 5. Avanzamento filo a regolazione digitale
- 6. Torcia per saldatura robot
- 7. Tampone del filo che permette il movimento coordinato dei due sistemi di traino disaccoppiandoli, mette a disposizione una riserva di filo aggiuntiva e garantisce un'alimentazione del filo precisa e priva di perdite.
- 8. Alimentazione filo

L' azienda Fronius ha anche proposto un nuovo metodo di saldatura CMT, il processo di saldatura CMT plus pulse (CMT+ P). È una combinazione del processo di saldatura a impulsi e del processo di saldatura CMT convenzionale (cioè diversi trasferimenti di gocce di saldatura a impulsi seguono alcuni trasferimenti di gocce di saldatura CMT convenzionali durante un ciclo di saldatura, quindi il ciclo si ripete).

L'elevata corrente a impulsi fornisce un maggiore apporto di calore per la saldatura. Rispetto ai vantaggi di cui sopra, l'apporto di calore può essere più facilmente regolato e controllato meglio durante il CMT+P. Gli impulsi aggiuntivi associati al processo di saldatura CMT consentono la saldatura di strutture in alluminio più spesse. Inoltre è possibile ottenere diverse forme del cordone di saldatura alterando la durata del cortocircuito.

Lo schema di un tipico ciclo di segnale elettrico di saldatura CMT + P è mostrato in Figura 16.

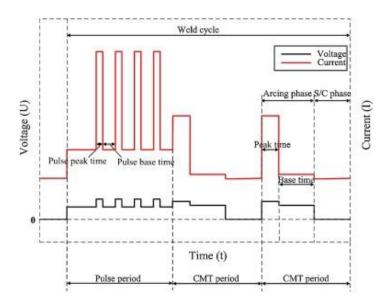


Figura 16: Schema del ciclo di segnale elettrico in saldatura CMT+P

Il ciclo di saldatura è costituito da un periodo di impulso e un periodo di cortocircuito CMT. Quando il numero di impulsi e i cortocircuiti CMT sono rispettivamente 4 e 2, il ciclo di saldatura completo può essere suddiviso in tre parti: un periodo di impulso e due periodi di cortocircuito CMT. Sulla base della Figura 16 il periodo dell'impulso può essere ulteriormente suddiviso in un tempo di picco dell'impulso e un tempo di base dell'impulso. La fase d'arco può anche essere suddivisa in peak time e base time.

Oltre alla tecnologia CMT convenzionale e CMT pulse (CMT-P), altre varianti possono essere CMT advanced (CMT-ADV) e CMT pulse advanced (CMT-PADV) le cui differenze possono essere valutate nella Figura 17.

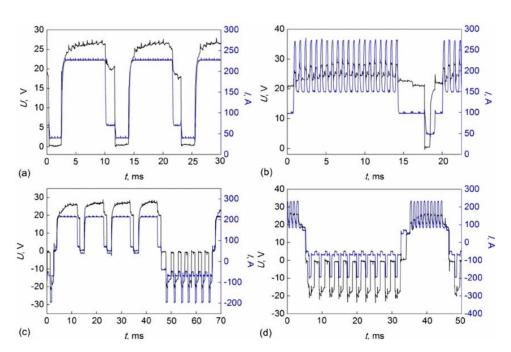


Figura 17: Forme d'onda di corrente e tensione dell'arco del processo CMT (a), CMT-P (b), CMT-ADV (c) e CMT-PADV (d); WFS=7,5 m

Il processo CMT Advanced assicura un rendimento di metallo depositato perfettamente regolabile grazie ai cicli di processo positivi e negativi. Oltre al movimento del filo, nella regolazione del processo è integrata anche la polarità della corrente di saldatura. Il cambio di polarità avviene nella fase di cortocircuito, garantendo la stabilità tipica del processo CMT.

Dunque si verifica un'alternanza di cicli CMT positivi e negativi. Il movimento del filo è integrato nel processo.

Mentre i cicli positivi si alternano ai cicli negativi durante il processo di CMT Advanced, il processo di saldatura CMT Advanced Pulse combina cicli CMT con polarità dell'elettrodo negativa e una fase di impulso con polarità positiva. Il processo raggiunge un tasso di deposizione più elevato durante la fase a polarità negativa con un minore apporto di calore. Nel cortocircuito avviene l'inversione di polarità nei cicli di impulso a polarità positiva. Oltre a un maggiore apporto di calore, la fase a impulsi offre all'utente il vantaggio del trasferimento delle gocce senza cortocircuito. La relazione tra i cicli di processo positivo e negativo è liberamente selezionabile. CMT Advanced Pulse permette di unire acciai altoresistenziali con un tasso di deposizione sufficientemente alto ma con un basso apporto di calore.

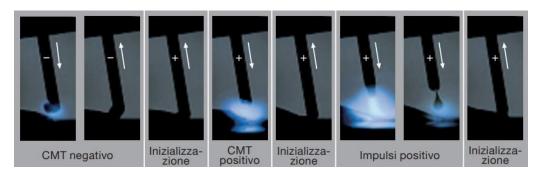


Figura 18: Fasi processo CMT advanced pulse

Tra gli altri vantaggi figurano l'apporto di calore controllato, il maggiore rendimento di metallo depositato a fronte di un apporto di calore invariato e una distorsione minima del materiale lavorato.

CMT Advanced garantisce il massimo riempimento dei gap per i materiali più svariati tra cui l'alluminio:

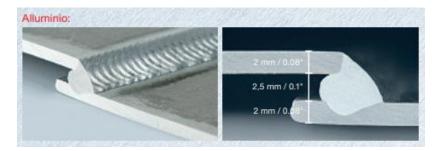


Figura 19: Gap per saldatura dell'alluminio in lap-joint

Le caratteristiche possono essere riassunte in:

- Giunzioni di lamiere sottili e sottilissime con maggiore riempimento dei gap.
- Unione di acciai ad alta resistenza con apporto di calore ridotto.
- Minore fusione durante il riporto anti usura.
- Prime passate senza supporto del bagno di fusione.
- Giunti misti (ad es. acciaio/alluminio): minore apporto di calore e maggiore rendimento di metallo depositato.
- Brasatura di acciai ad alta e ad altissima resistenza.

Low spatter Control

I miglioramenti nella qualità e nell'applicazione della saldatura sono ancora più evidenti quando nello scenario vengono introdotte modalità di processo avanzate. Con la piattaforma TPS/i, LSC (Low Spatter Control) e PMC (Pulse Multi Control) sono due di queste modalità avanzate.

Con LSC, Fronius ha preso una forma d'onda di cortocircuito convenzionale e l'ha modificata. Questo processo modifica la corrente elettrica in diversi momenti chiave all'interno della saldatura per ottenere un basso apporto di calore e una riduzione degli spruzzi. La corrente viene ridotta al minimo quando il filo entra in contatto con il bagno di saldatura per eliminare il violento distacco che produce spruzzi. La corrente quindi aumenta per il distacco della goccia.

Da lì, si verifica una seconda riduzione di corrente per trasferire la goccia al bagno di saldatura. Queste riduzioni di corrente garantiscono un basso trasferimento di calore al metallo di base, il che è positivo per i metalli di spessore più sottile che sono soggetti a deformazioni dovute al trasferimento di calore. Nella saldatura robotizzata, questo processo eccelle in applicazioni come la saldatura di telai dei sedili delle automobili. Questi telai utilizzano acciai più sottili e ad alta resistenza che si deformano facilmente con l'eccesso di calore.

Un ulteriore controllo del filo mantiene costanti la corrente e la penetrazione al variare della distanza tra la torcia di saldatura e il componente. L'arco diventa significativamente più stabile e la penetrazione è molto più costante. Sui dispositivi MIG/MAG standard senza stabilizzatore di penetrazione, la corrente di saldatura, e quindi la potenza di saldatura, diminuisce al variare della distanza. Se la penetrazione è insufficiente,

potrebbe esserci una mancanza di fusione. Se la penetrazione è eccessiva, il cordone di saldatura può passare attraverso le lamiere sottili, all'aumentare della corrente di saldatura.

Pulse Multi Control

PMC consente un controllo preciso dell'apporto di calore. Grazie alle capacità di elaborazione rapida viene generata un'elevata stabilità dell'arco che consente elevate velocità di marcia e un facile funzionamento con energia ridotta per unità di lunghezza, rendendo la saldatura più economica che mai. Il PMC ha due stabilizzatori che offrono velocità di marcia più elevate e penetrazioni costanti.

Stabilizzatore della lunghezza d'arco

Questa nuova funzione mantiene permanentemente l'arco pulsato indipendente dalla velocità di marcia, dall'angolo della torcia e dalla sporgenza del filo (Stickout).

Una volta impostata, la lunghezza dell'arco rimarrà costante anche quando si cambiano le posizioni di saldatura, ad es. saldatura di testa e saldatura ad angolo. Dalla immagine in basso notiamo che quanto cambia la posizione della torcia, se lo stabilizzatore è inattivo occorrerà una correzione manuale.

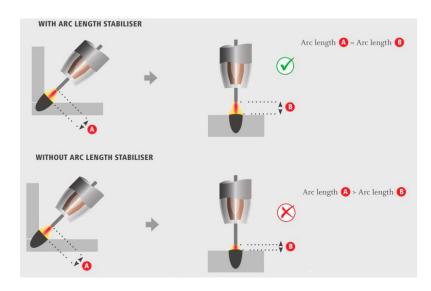


Figura 20: Processo con e senza stabilizzatore della lunghezza d'arco

Lo stabilizzatore può essere impostato tra 0.1 - 5 a cui corrispondono le seguenti distanze:

0.1 = 0.025 ms	1,1 = 0,275 ms	2,1 = 0,525 <u>ms</u>	3,1 = 0,775 <u>ms</u>	4,1 = 1,025 <u>ms</u>
0.2 = 0.050 ms	1,2 = 0,300 <u>ms</u>	2.2 = 0.550 ms	3,2 = 0,800 <u>ms</u>	4,2 = 1,050 <u>ms</u>
0.3 = 0.075 ms	1,3 = 0,325 <u>ms</u>	2,3 = 0,575 <u>ms</u>	3,3 = 0,825 <u>ms</u>	4,3 = 1,075 <u>ms</u>
0.4 = 0.100 ms	1,4 = 0,350 <u>ms</u>	2,4 = 0,600 <u>ms</u>	3,4 = 0,850 <u>ms</u>	4,4 = 1,100 <u>ms</u>
0.5 = 0.125 ms	1,5 = 0,375 <u>ms</u>	2,5 = 0,625 <u>ms</u>	3,5 = 0,875 <u>ms</u>	4,5 = 1,125 <u>ms</u>
0.6 = 0.150 ms	1,6 = 0,400 <u>ms</u>	2,6 = 0,650 <u>ms</u>	3,6 = 0,900 <u>ms</u>	4,6 = 1,150 <u>ms</u>
0.7 = 0.175 ms	1,7 = 0,425 <u>ms</u>	2,7 = 0,675 <u>ms</u>	3,7 = 0,925 <u>ms</u>	4,7 = 1,175 <u>ms</u>
0.8 = 0.200 ms	1,8 = 0,450 <u>ms</u>	2.8 = 0.700 ms	3,8 = 0,950 <u>ms</u>	4,8 = 1,200 <u>ms</u>
0.9 = 0.225 ms	1,9 = 0,475 <u>ms</u>	2.9 = 0.725 ms	3,9 = 0,975 <u>ms</u>	4,9 = 1,225 <u>ms</u>
1,0 = 0,250 <u>ms</u>	2.0 = 0.500 ms	3.0 = 0.750 ms	4,0 = 1,000 <u>ms</u>	5.0 = 1.250 ms

Figura 21: Distanze per stabilizzatore lunghezza d'arco

Maggiore è l'impostazione, più corto diventa l'arco.

I vantaggi sono:

- Velocità di traslazione maggiori grazie alla regolazione dell'arco corto
- Meno possibilità di sottosquadro sulle punte di saldatura
- Minore apporto di calore
- Il saldatore ha una migliore sensazione di controllo
- Si combina con lo stabilizzatore di penetrazione: risultato ripetibile

Stabilizzatore di penetrazione

Un ulteriore controllo del filo, che è anche applicato al LSC, mantiene costanti la corrente e la penetrazione al variare della distanza tra la torcia di saldatura e il componente. L'arco diventa significativamente più stabile e la penetrazione è molto più costante. Sui dispositivi MIG/MAG standard senza stabilizzatore di penetrazione, la corrente di saldatura, e quindi la potenza di saldatura, diminuisce al variare della distanza. Se la penetrazione è insufficiente potrebbe esserci una mancanza di fusione. Se la penetrazione è eccessiva il cordone di saldatura può cadere su lamiere sottili all'aumentare della corrente di saldatura.

In sostanza questa nuova funzionalità mantiene la penetrazione anche quando ci sono modifiche al CTWD (contatto a distanza di lavoro).

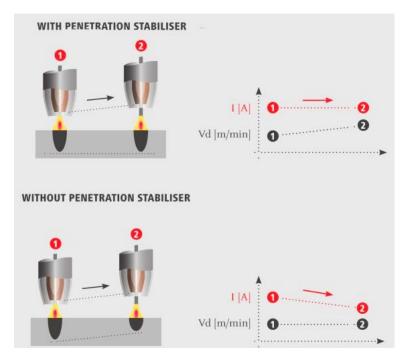


Figura 22: Processo con e senza stabilizzatore di penetrazione

I vantaggi dello stabilizzatore di penetrazione sono:

- Risultati ripetibili
- Cambiamenti imprevisti meno critici
- Offre al saldatore maggiore flessibilità quando lo spazio è un problema

Capitolo 3

Diffusione e saldabilità dell'alluminio

Per proteggere l'ambiente l'utilizzo di materiale leggero sta diventando sempre più interessante nell'industria automobilistica arrivando anche a sostituire l'acciaio inossidabile nella maggior parte delle applicazioni, ad esempio parti aeronautiche e aerospaziali, industrie automobilistiche, carrozze ferroviarie, costruzioni navali, produzione di caldaie. Poiché la lega di alluminio è leggera e resistente e può essere riciclata, nuovi tipi di auto prodotte da leghe di alluminio sottili sono in rapido sviluppo e alcuni prodotti sono già sul mercato.

L'alluminio, in aggiunta, permette di ridurre la massa totale dell'auto, riducendo al contempo il consumo di carburante durante la guida.

I trasporti infatti sono uno dei settori che consumano più energia, utilizzando circa il 19% della domanda mondiale di energia. Al giorno d'oggi il 96% dei sistemi di trasporto mondiali dipende da combustibili e prodotti a base di petrolio, con i sistemi di trasporto globali che rappresentano circa il 40% del consumo mondiale di petrolio di quasi 75 milioni di barili di petrolio al giorno. Proprio perchè l'uso dell'alluminio aiuta a ridurre il peso di automobili, autobus, camion, aerei, treni e barche, l'energia extra e le emissioni extra di gas serra legate alla produzione di alluminio rispetto ai materiali alternativi possono essere "rimborsate" molte volte durante il ciclo di vita del prodotto.

Tra le leghe di alluminio, le leghe lavorate trattabili termicamente di media resistenza alluminio-magnesio (Al-Mg-Si) mostrano migliori caratteristiche di saldabilità rispetto alle leghe di alluminio ad alta resistenza.

La densità dell'alluminio è di soli 2,70 g/cm³, circa un terzo di quella dell'acciaio (7,83 g/cm³). Il punto di fusione di Al (cioè, 660 ° C) è molto simile a quello di Mg (cioè, 650 ° C), e mostrano proprietà simili. Inoltre, la densità di Al è alquanto superiore a quella del magnesio (cioè 1,74 g/cm³). Nonostante ciò, l'alluminio ha un uso molto più ampio del magnesio a causa della sua formabilità molto più elevata grazie alla sua struttura cristallina cubica a facce centrate (fcc) con abbondanti sistemi di scorrimento alternativi rispetto alla struttura esagonale compatta (cph) del magnesio che non è simmetrico e ha un numero limitato di sistemi di scorrimento.

Le leghe di alluminio hanno una struttura fcc a tutte le temperature fino al punto di fusione. Pertanto non subiscono una trasformazione di fase allotropica durante la saldatura e la loro durezza rimane generalmente costante nella zona termicamente alterata (HAZ). L'alluminio può essere unito con vari metodi, tra cui saldatura per fusione e resistenza, brasatura, saldatura, incollaggio e metodi meccanici come rivettatura e bullonatura.

Di particolare interesse sono le leghe della serie 5000 (utilizzate per pannelli interni della scocca, scudi termici e parti strutturali e saldabili) e le leghe della serie 6000 (per componenti della carrozzeria, pannelli esterni e interni della carrozzeria e parti strutturali e saldabili).

Il trattamento termico T6 è comunemente applicato alle leghe di alluminio della serie 6xxx a causa della generazione di precipitati aghiformi come β " Mg_5Si_6 nella soluzione solida di magnesio e silicio che sono responsabili di eccellenti proprietà meccaniche. In generale le leghe indurenti per precipitazione sono suscettibili di un meccanismo di rammollimento nella regione della zona termicamente alterata (HAZ) ogni volta che sono sottoposte a ciclo termico di saldatura. Questo meccanismo di addolcimento porta alla riduzione delle proprietà meccaniche, causando la dissoluzione dei precipitati di rinforzo. Pertanto, per mantenere le proprietà meccaniche del giunto saldato, è necessario il trattamento termico post-saldatura (PWHT).

La saldatura di lastre di Alluminio è quindi il problema chiave per accelerare l'uso della lega di alluminio e garantire la proprietà delle auto in lega di alluminio. Essa però presenta solitamente molti problemi come bruciature e distorsioni e tende ad ossidarsi e usurarsi velocemente, il che porta a una breve vita dei componenti a causa del danno superficiale.

Proprio per questo motivo la tecnica del rivestimento può essere utilizzata per riparare parti strutturali in lega di Al con graffi e usura sulla superficie utilizzando fili Al-Si con saldatura CMT.

I principali tentativi per saldare la lega di alluminio 7075 difficile da saldare sono piuttosto vari. La saldatura a raggio laser (LBW) presenta vantaggi sia tecnici che economici rispetto ai processi convenzionali grazie al basso apporto di calore e all'elevata velocità di

saldatura. Tuttavia, il rapido trasferimento di calore nel pezzo di saldatura e la bassa viscosità del bagno di saldatura prima della solidificazione rendono le leghe di alluminio difficili da unire con LBW. La saldatura FSW come processo di giunzione allo stato solido è in grado di produrre saldature prive di difetti di alta qualità in lega di alluminio 7075 nonostante una osservata riduzione della resistenza a trazione e della duttilità dei giunti ottenuti. La preoccupazione principale in questo processo è la velocità di saldatura limitata e l'importabilità del processo a causa del bloccaggio del pezzo e dei requisiti di accesso. Pertanto si afferma generalmente che il processo di saldatura preferito per le leghe di alluminio 7xxx è spesso la saldatura a gas inerte dei metalli (MIG) per la sua semplicità, versatilità, rapidità e facilità d'uso.

La tecnologia MIG convenzionale è tradizionalmente utilizzata nella saldatura dell'alluminio, ma quando si uniscono fogli di alluminio sottili la mancanza di controllo sulla penetrazione spesso ne limita l'uso sul campo. Il trasferimento di metallo in cortocircuito è un metodo adatto per unire sottili fogli di alluminio a causa delle sue caratteristiche di basso apporto termico. Tuttavia gli eccessivi spruzzi durante il processo di saldatura danno anche al produttore un grosso problema. Un recente sviluppo nella tecnologia di saldatura è il processo di trasferimento del metallo a freddo (CMT), che è ideale per la saldatura dell'alluminio grazie al processo di saldatura senza schizzi e al basso apporto termico ed energetico.

Sebbene nessun metallo d'apporto in alluminio soddisfi tutte le esigenze, ER5356 e ER4043 sono i due più comuni e costituiscono la maggior parte delle applicazioni di metallo d'apporto in alluminio. Possono essere utilizzati con i più diffusi metalli di base in lega di alluminio.

La saldatura CMT delle leghe di alluminio è piuttosto poco utilizzata poiché il processo è relativamente nuovo. La maggior parte degli studi si concentra sulla saldatura di alluminio o magnesio a metalli dissimili come acciaio o leghe di titanio poiché l'apporto di calore può essere controllato, e di conseguenza questo controlla la frazione di volume dei composti intermetallici.

Tuttavia, poco lavoro è stato fatto nell'area della saldatura CMT delle leghe di alluminio trattabili termicamente nonostante il grande potenziale del processo per superare la maggior parte dei limiti della saldatura di queste leghe.

Tuttavia, per motivi di sicurezza, il corpo interamente in alluminio non è stato ancora in grado di sostituire l'utilizzo di alluminio + acciaio. Pertanto l'uso crescente di diversi materiali "acciaio + alluminio" nel campo automobilistico è ancora la direzione privilegiata per la produzione di carrozzerie. La lamiera d'acciaio zincato è ampiamente utilizzata nell'industria automobilistica grazie alla sua eccellente resistenza alla corrosione, pertanto diventa particolarmente cruciale anche ottenere un collegamento efficace e affidabile della lega di alluminio e della lamiera di acciaio zincato.

La saldatura, a causa dell'eccessiva evaporazione dello zinco a basso punto di fusione, ha una forte influenza sull'aspetto macroscopico e sulla qualità del giunto saldato. D'altra parte, c'è una grande differenza tra alluminio e acciaio nelle proprietà fisiche e termiche. Si possono rilevare facilmente fessurazioni durante il processo di giunzione a causa dell'esistenza di tensioni residue.

Anche in quest'ultimo caso la tecnologia di saldatura CMT inventata da Fronius può risolvere efficacemente questo problema.

La saldabilità delle leghe di alluminio può essere riassunta dalle due tabelle seguenti:

	Table A-7 Weldability ^{1,2} of Nonheat-Treatable Wrought Aluminum Alloys											
Aluminum Alloy	Gas	Arc with Flux	Arc with Inert Gas	Resistance	Pressure	Brazing	Soldering with Flux					
1060	A	A	A	В	A	A	A					
1100	Α	Α	Α	Α	Α	Α	A					
1350	Α	A	Α	В	Α	Α	Α					
3003	Α	Α	Α	Α	Α	Α	Α					
3004	В	Α	Α	Α	В	В	В					
5005	Α	Α	Α	Α	Α	В	В					
5050	Α	Α	A	Α	Α	В	В					
5052, 5652	Α	Α	Α	Α	В	C	C					
5083	C	С	Α	Α	C	X	X					
5086	C	C	A	Α	В	X	X					
5154, 5254	В	В	Α	Α	В	X	X					
5454	В	В	Α	Α	В	X	X					
5456	C	C	Α	Α	C	X	x					

^{1.} Weldability ratings are based on the most weldable temper:

Readily weldable.

B. Weldable in most applications; may require special technique or preliminary trials to establish welding procedures, performance, or both.

C. Limited weldability.
 X. Particular joining method is not recommended.

^{2.} All alloys can be adhesive bonded, ultrasonically welded, or mechanically fastened.

	v	Veldability ^{1,2} o		le A-8 ble Wrought A	Numinum Ali	oys	
Aluminum Alloy	Gas	Arc with Flux	Arc with Inert Gas	Resistance	Pressure	Brazing	Soldering with Flux
2014	X	С	С	В	С	X	C
2017	X	C	С	В	Ċ	X	C
2024	X	C	C	В	C	X	C
2036	X	С	В	В	C	X	C
2090	X	x	В	В	С	X	С
2218	X	C	С	В	C	X	C
2219	X	C	A	В	C	X	C
2519	X	С	В	В	С	X	C
2618	х	С	С	В	С	X	С
6005	A	A	A	A	В	A	В
6009	С	С	В	В	В	X	C
6010	C	С	В	В	В	X	C
6013	С	С	В	A	В	X	C
6061	A	A	A	A	В	A	В
6063	Α	A	A	A	В	A	В
6070	C	C	В	В	В	X	C
6101	A	A	A	A	A	Α	A
6262	C	C	В	A	В	В	В
6351	A	A	A	A	В	A	В
6951	Α	Α	A	A	A	A	A
7004	Х	х	Α	A	В	В	В
7005	X	X	A	Α	В	В	В
7039	X	X	A	A	В	Ċ	В
7075	X	X	Ċ	В	č	x	č
7079	Х	Х	С	В	С	Х	С
7178	X	X	C	В	C	X	C

Weldability ratings are based on the most weldable temper:

Figura 23: Saldabilità delle leghe di alluminio

Influenza degli elementi leganti sull'alluminio

Le leghe di Alluminio stanno acquisendo un'enorme importanza industriale grazie alla loro eccezionale combinazione di proprietà meccaniche, fisiche e tribologiche rispetto al metallo di base. Gli elementi in lega vengono selezionati in base alle loro proprietà individuali in quanto influiscono sulla struttura e sulle caratteristiche prestazionali. La loro scelta influisce sull'integrità dei materiali in servizio con conseguente miglioramento del comportamento alla corrosione e meccanico. Quindi, la necessità di comprendere i giusti inoculanti che potrebbero avere un impatto relativo sulle proprietà meccaniche instabili a bassa resistenza è fondamentale. Gli altri elementi come Ferro, Magnesio, Manganese, Zinco e Silicio vengono aggiunti per formare una lega del 15% in peso.

La formazione di porosità nelle leghe di alluminio saldate è anche correlata al tipo e alla quantità di elementi di lega. Le leghe Al-Si, Al-Cu, Al-Fe e Al-Zn riducono la solubilità

A. Readily weldable.

B. Weldable in most applications; may require special technique or preliminary trials to establish welding procedures, performance, or

C. Limited weldability.
 X. Particular joining method is not recommended.
 All alloys can be adhesive bonded, ultrasonically welded, or mechanically fastened.

dell'Idrogeno mentre le leghe Al-Li, Al-Mg e Al-Ti forniscono una maggiore solubilità. Questo può essere visto nella Figura 24.

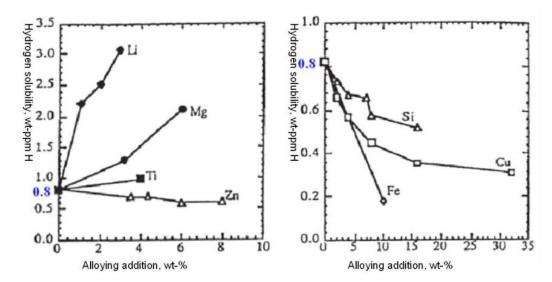


Figura 24: L'effetto degli elementi di lega sulla solubilità dell'idrogeno nell'alluminio liquido a 1246 °C e 1 atm di pressione parziale dell'idrogeno [1]

Ad esempio le leghe Al-Cu danno una grande riduzione della solubilità dell'idrogeno se l'aggiunta di Cu è superiore al 3 % in peso. Tuttavia le leghe Al-Mg forniscono una maggiore solubilità dell'Idrogeno. Col 6% in peso di Magnesio, la lega Al-Mg ha quasi raddoppiato la solubilità dell'Idrogeno rispetto allo 0% in peso di Mg.

L'alluminio puro non viene solitamente utilizzato per applicazioni strutturali per cui per produrre alluminio di resistenza adeguata alla fabbricazione di componenti strutturali è necessario aggiungere altri elementi all'alluminio. La caratteristica di resistenza dell'alluminio (serie 1xxx) lo rende un prodotto utile per la fabbricazione strutturale e contiene livelli di impurità come ferro e silicio che gli consentono di rispondere all'incrudimento.

Si può dedurre che il diverso elemento di lega è utilizzato per produrre ciascuna delle sette serie di leghe di alluminio selezionate.

La Tabella 2 mostra il risultato del test di diverse proprietà meccaniche delle leghe.

Per i prodotti in lamiera sono identificate da un sistema numerico a quattro cifre gestito dalla Aluminium Association e sono suddivise in otto gruppi in base al loro principale elemento di lega.

Leghe	Trattame nto	Tensio ne di snerva mento 0.20% (MPa)	Resis tenza a trazi one (MP a)	Resist enza a taglio (MPa)	Alunga mento A5 (%)	Allunga mento A50 (%)	Durezz a Brinell HB	Durezz a Vickers HV	Limite di resistenz a a fatica (MPa)
	H2	85	100	60	12		30	30	
AA1050	H4	105	115	70	10	9	35	36	70
A	Н6	120	130	80	7		39		
	H8	140	150	85	6	5	43	44	100
	Н9	170	180	63	0	3	48	51	100
	0	35	80	50	42	38	21	20	50
	T3	290	365	220	15	15	95	100	250
	T4	270	350	210	18	18	90	95	250
AA2011	T6	300	395	235	12	12	110	115	250
AAZUII	T8	315	420	250	13	12	115	120	250
	H2	115	135	80	11	11	40	40	230
	H4	140	155	90	9	9	45	46	130
	H6	160	175	100	8	6	50	50	130
	H8	180	200	110	6	6	55	55	150
	H9	210	240	125	4	3	65	70	130
	0	45	105	70	29	25	29	29	100
	H2	240	330	185	17	16	90	95	280
	H4	275	360	200	16	14	100	105	280
AA3103	H6	305	380	210	10	9	105	110	200
71110100	H8	335	400	220	9	8	110	115	
	H9	370	420	230	5	5	115	120	
	0	145	300	175	23	22	70	75	250
	H2	165	210	125	14	14	60	65	
	H4	190	230	135	13	12	65	70	230
AA5083	Н6	215	255	145	9	8	70	75	
	Н8	240	280	155	8	7	80	80	250
	Н9	270	310	165	5	4	90	90	
	0	80	180	115	26	25	45	46	200
	H2	185	245	150	15	14	70	75	
	H4	215	270	160	14	12	75	80	250
AA6063	Н6	245	290	170	10	9	80	85	
	Н8	270	315	180	9	8	90	90	280
	Н9	300	340	190	5	4	95	100	
	0	100	215	140	25	24	55	55	220
	0	50	100	70	27	26	25	85	110
	T1	90	150	95	26	24	45	45	150
	T4	90	160	110	21	21	50	50	150
	T5	175	215	135	14	13	60	65	150
AA5251	T6	210	245	150	14	12	75	80	150
	T8	240	260	155		9	80	85	
	0	60	130	85	27	26	35	35	120
	T1	170	260	155	24	24	70	75	200
AA6082	T4	170	260	170	19	19	70	75	200
	T5	275	325	195	11	11	90	95	210
	T6	310	340	210	11	11	95	100	210
	T6	240	290		8				
AA6262	T9	330	360	1.5	3	1			
	0	105	225	150		17	60	65	230

AA7075	Т6	505	570	350	10	10	150	160	300
	T7	435	505	305	13	12	140	150	300

Tabella 2: Proprietà meccaniche di ogni lega

La lettera "H" seguita da numeri denota la specifica condizione ottenuta dall'incrudimento.

Il primo numero che segue la "H" indica le operazioni di base utilizzate durante o dopo l'incrudimento.

La lettera "T" indicante il trattamento termico è sempre seguita da un numero che specifica la tipologia.

La lettera "O" indica completa ricottura.

Serie 1xxx (Alluminio non legato)

Questa lega è costituita per il 99% da alluminio ad elevata purezza.

Le sue proprietà principali sono:

- Perfetta resistenza alla corrosione
- Buona lavorabilità
- Elevata conduttività termica ed elettrica.

I suoi utilizzi invece sono:

- Trasmissione di elettricità o rete elettrica
- Per collegare la rete naturale in tutto il paese

La lega 1350 è utilizzata per le applicazioni elettriche mentre la lega 1100 è usata per applicazioni di contenitori alimentari. Le applicazioni più comuni per le leghe della serie 1xxx sono fogli di alluminio, fili, serbatoi chimici e sistemi di tubazioni.

Serie 2xxx (Alluminio-Rame)

La lega di alluminio e rame è costituita dal 2-10% di rame con altre tracce di elementi. La Figura 25 illustra la micrografia SEM della diversa quantità di Fe 0,53 nel campione di Cu. La soluzione sovrasatura di Al se spenta in acqua o rapidamente raffreddata e lasciata invecchiare passerà attraverso la formazione di precipitati dalle Zone GP alla fase θ (CuAl₂). La resistenza aumenta durante l'indurimento mediante la formazione di zone GP. L'aggiunta di rame in lega Al-Si-Mg ha dimostrato di migliorare le proprietà meccaniche a

causa della precipitazione del composto intermetallico di Cu-Al. La migliore combinazione di proprietà meccaniche si ottiene con 1,5% di Cu in lega Al-Si-Mg dopo solidificazione. Alcuni studi hanno rivelato un aumento della resistenza alla trazione da 152 a 402 MPa con contenuto di rame dall'1 al 6% a causa della modifica del silicio eutettico. Un'eccessiva formazione di composto intermetallico CuAl₂ potrebbe portare alla formazione di crepe e pori nella matrice che indeboliscono i giunti e accelerano il processo di corrosione.





Figura 25: Micrografia SEM

caratteristiche:

- Fornisce resistenza e facilita l'indurimento per precipitazione.
- Riduce la duttilità e la resistenza alla corrosione.
- Contiene leghe di alluminio trattabili termicamente ad alta resistenza.
- È usato nel settore aerospaziale e di veicoli militari

Serie 3xxx (Alluminio – Manganese)

La lega di manganese e alluminio migliora l'incrudimento e il rafforzamento ma non riduce la duttilità o la resistenza alla corrosione. Mantiene una buona resistenza quando viene utilizzato su materiali non trattabili termicamente. Gli usi per la serie 3xxx sono utensili da cucina, radiatori, evaporatori, scambiatori di calore e sistemi di tubazioni

associati. La Figura 26 mostra la micrografia SEM di manganese in ferro e EDX di polvere di ferrite di manganese (Mn-Fe2O4).

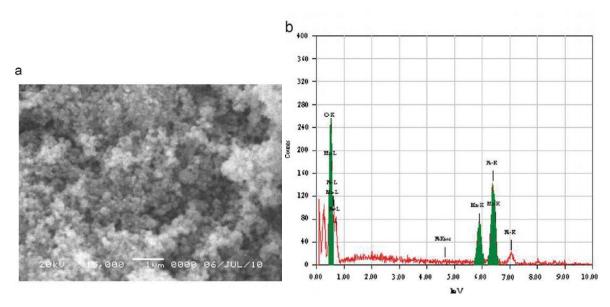


Figura 26: Micrografie SEM e EDX

Serie 4xxx (Alluminio – Silicio)

La lega di silicio e alluminio riduce la temperatura del punto di fusione e migliora la fluidità. In Figura 27 la micrografia SEM di leghe di alluminio-silicio colate.

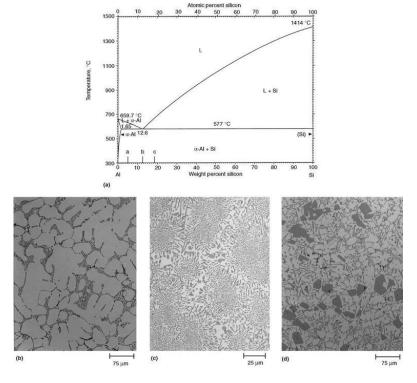


Figura 27: Micrografica SEM di leghe di alluminio-silicio

Caratteristiche:

- Produce una lega non trattabile termicamente
- Il silicio con il magnesio produce una lega trattabile termicamente indurente per precipitazione
- Leghe di silicio e alluminio sono utilizzate per la produzione di getti
- Sono utilizzati anche come fili d'apporto per la saldatura per fusione.

Serie 5xxx (Alluminio – Magnesio)

Si utilizza rafforzamento in soluzione solida per migliorare l'incrudimento del metallo mediante la lega di magnesio con alluminio. La Figura 28 ci permette di osservare la micrografia SEM di un materiale di magnesio con microstruttura porosa.

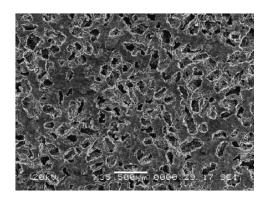


Figura 28: Micrografia SEM

Sono ampiamente utilizzati per applicazioni strutturali, vengono sono prodotti principalmente in lamiera e sono utilizzati anche per carrozzerie di camion e treni, veicoli blindati, costruzione di navi e imbarcazioni, cisterne chimiche, recipienti a pressione e serbatoi criogenici.

Serie 6xxx (Alluminio - Magnesio - Silicio)

La lega di magnesio e silicio con l'alluminio forma il composto Mg₂Si. Queste leghe 6xxx forniscono la trattabilità termica e spesso si trovano in un'ampia selezione di forme estruse.

Gli usi di questa lega sono: telai di biciclette, impalcature, alberi di trasmissione, sezioni di telai per autoveicoli, rinforzi e sostegni utilizzati su camion, barche e molti altri manufatti strutturali.

Serie 7xxx (Alluminio – Zinco – Magnesio)

La miscela di zinco e alluminio con altri oligoelementi come magnesio e rame produce leghe di alluminio resistenti trattabili termicamente. Lo zinco aumenta la resistenza e consente l'indurimento per precipitazione. Alcune di queste leghe sono soggette a tensocorrosione e per questo motivo solitamente non sono saldate per fusione. Sono stati sviluppati nuovi trattamenti termici per mantenere l'elevata resistenza delle leghe migliorare contemporaneamente la loro resistenza alla corrosione, come ad esempio il trattamento di invecchiamento chiamato trattamento di invecchiamento preprecipitazione ad alta temperatura (HTPP). Alcune delle applicazioni comuni delle leghe della serie 7xxx sono: nel settore aerospaziale, veicoli corazzati, mazze da baseball e telai di biciclette. La Figura 29 illustra la micrografia SEM per una lega di alluminio tramite (a) soluzione per colata, (b) soluzione per colata invecchiata a 20°C-60 min, (c) laminata a caldo e (d) laminata a caldo invecchiata a 200°C—60 min.

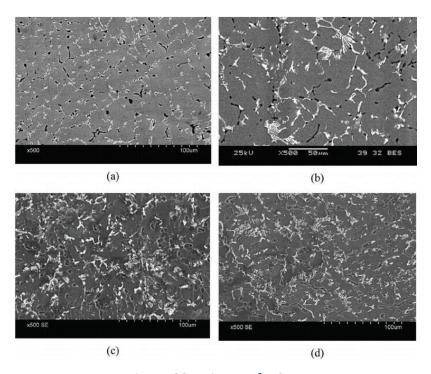


Figura 29: Micrografia SEM

Altri elementi

Cromo (Cr)

La presenza del cromo in alluminio è utile per controllare la struttura del grano, proteggere la crescita del grano nelle leghe di alluminio-magnesio e prevenire la ricristallizzazione nelle leghe di alluminio-magnesio-silicio o alluminio-magnesio-zinco durante il trattamento termico. Il cromo ridurrà anche la tensocorrosione e migliorerà la tenacità.

Nichel (Ni)

La lega di nichel e alluminio-rame migliora la durezza e la resistenza a temperature elevate e riduce il coefficiente di espansione.

Titanio (Ti)

Il titanio viene aggiunto all'alluminio per fungere da affinatore del grano. L'effetto di affinamento del grano del titanio è potenziato se il boro è presente nel fuso o se viene aggiunto come lega madre contenente boro in gran parte combinato come TiB₂. Il titanio è un'aggiunta comune al filo di saldatura in alluminio poiché affina la struttura della saldatura e aiuta a prevenire la rottura.

Zirconio (Zr)

Il precipitato fine di particelle intermetalliche che inibiscono la ricristallizzazione viene prodotto quando lo zirconio viene aggiunto all'alluminio.

Litio (Li)

L'aggiunta di litio all'alluminio aumenta la resistenza e il modulo di Young, fornisce anche un indurimento per precipitazione e diminuisce la densità.

Piombo (Pb) e Bismuto (Bi)

Questi vengono aggiunti all'alluminio per favorire la formazione di trucioli e migliorare la lavorabilità. Queste leghe non sono saldabili perché il piombo e il bismuto producono

costituenti a basso punto di fusione e possono produrre proprietà meccaniche scadenti e un'elevata sensibilità alla cricca durante la solidificazione. La Figura 30 mostra la microstruttura della lega Al-6,16Zn-3,02 Mg-1,98Cu, invecchiata a 172°C per 4 ore: (a) micrografia SEM, che mostra la fase S e la particella Al7Cu2Fe; (b) Micrografia SEM, che mostra la fase e le particelle Al7Cu2Fe.

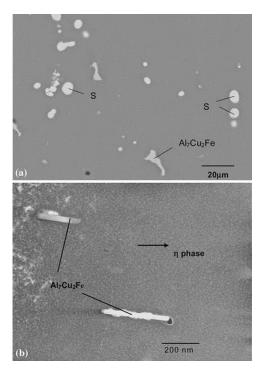


Figura 30: Micrografia SEM

Leghe trattabili e non trattabili termicamente

Le leghe di alluminio non trattabili termicamente costituiscono un gruppo di leghe che si basano esclusivamente sulla lavorazione a freddo e sul rafforzamento della soluzione solida per le loro proprietà di resistenza. Differiscono dalle leghe trattabili termicamente in quanto non sono in grado di formare precipitati di seconda fase per una maggiore resistenza. Pertanto, le leghe non trattabili termicamente non possono raggiungere le caratteristiche di elevata resistenza delle leghe indurite per precipitazione.

L'assenza di elementi che formano precipitato in queste leghe non trattabili termicamente di media-bassa resistenza diventa un fattore positivo quando si considera la saldabilità perché molte delle aggiunte di lega necessarie per l'indurimento per precipitazione (ad esempio rame più magnesio o magnesio più silicio) possono portare

alla liquazione o a cricche a caldo durante la saldatura. Inoltre, le efficienze dei giunti sono maggiori nelle leghe non trattabili termicamente perché la zona termicamente alterata (ZTA) non è compromessa dall'ingrossamento o dalla dissoluzione dei precipitati. Ciò elimina la necessità di giunti di spessore elevato o di trattamenti termici postsaldatura.

La Tabella 3 seguente illustra le leghe trattabili e non termicamente.

Lega	Principali elementi leganti	Trattamento termico
1xxx	Alluminio non legato	Non trattabile termicamente
2xxx	Rame	Trattabile termicamente
3xxx	Manganese	Non trattabile termicamente
4xxx	Silicio	Non trattabile termicamente
5xxx	Magnesio	Non trattabile termicamente
6xxx	Magnesio and silicio	Trattabile termicamente
7xxx	Zinco	Trattabile termicamente
8xxx	Altri elementi	-

Tabella 3: Leghe trattabili e non termicamente

Difetti di saldatura dell'alluminio

La saldabilità dell'alluminio e delle sue leghe è buona se si prendono le dovute precauzioni. Tuttavia, è importante conoscere i difetti che possono verificarsi e come evitarli. I difetti più comuni nelle saldature per fusione sono:

- Porosità: L'alluminio è uno dei metalli più suscettibili alla porosità. La porosità è causata dal gas idrogeno che rimane intrappolato nel bagno di saldatura mentre il metallo si raffredda. L'idrogeno deriva dal vapore acqueo o dalla contaminazione da idrocarburi attraverso oli, grassi, lubrificanti e solventi. Quando il metallo di saldatura è allo stato fuso, assorbe un'elevata quantità di idrogeno. Poi, mentre si solidifica, cerca di espellerlo. Tuttavia, se la saldatura si sta solidificando anche a velocità moderata, l'idrogeno non ha possibilità di fuoriuscire e forma piccoli pori all'interno della saldatura. Per ridurre al minimo la probabilità di porosità da contaminazione da idrocarburi è necessario eseguire un'accurata pulizia della superficie del materiale e del filo d'apporto. Ecco alcune tecniche appropriate:
 - Pulizia meccanica: Dopo lo sgrassaggio viene utilizzata una spazzola metallica per rimuovere le impurità sulla superficie del metallo.

- Solventi: i solventi organici possono essere utilizzati per rimuovere grasso, olio, sporco e particelle incoerenti. Immergere, spruzzare o pulire i metalli con solventi prima della saldatura può aiutare a rimuovere eventuali contaminanti e impurità.
- Attacco chimico: Occorre utilizzare una soluzione di idrossido di sodio al 5% per pulire i metalli, seguita da un'aggiunta di NO₃ e acqua per rimuovere i prodotti di reazione sulla superficie.
- espansione termica e una sostanziale contrazione durante la solidificazione, sono anche soggette a fessurazioni. Tipicamente queste crepe si verificano lungo la linea centrale della saldatura. Sono causate principalmente da una combinazione errata di materiale d'apporto e metallo madre, geometria di saldatura errata o durante la saldatura in condizioni di forte vincolo. Inoltre, impurità come zolfo e fosforo sono un fattore importante poiché questi si separano durante la solidificazione. Pertanto, è importante rimuovere la contaminazione da olio o grasso dall'area di saldatura prima della saldatura. Dovrebbero anche essere evitati i metalli a basso punto di fusione come rame, stagno, piombo e zinco. Il rischio di cricche da solidificazione può essere ulteriormente ridotto utilizzando un riempitivo resistente a cricche come quelli delle leghe della serie 4XXX e 5XXX.
- Cricche da liquazione: Le leghe trattabili termicamente, in particolare le leghe
 6XXX e 7XXX, sono più soggette a cricche da liquazione. Questo tipo di
 fessurazione deriva dalla fusione localizzata ai bordi dei grani della zona
 interessata dal calore combinata con la non capacità di resistere alle sollecitazioni
 di contrazione durante il raffreddamento del metallo di saldatura. Tuttavia il
 rischio di rottura da liquazione può essere ridotto utilizzando un metallo d'apporto
 con una temperatura di fusione inferiore rispetto al metallo di base.
- Imperfezioni del cordone di saldatura: L'elevata conducibilità termica dell'alluminio e il bagno di saldatura a rapida solidificazione rendono le leghe particolarmente suscettibili alle imperfezioni sul cordone di saldatura. Per

combattere il rischio di incoerenza, sottosquadro e fusione/penetrazione insufficiente è opportuno assicurarsi di utilizzare parametri e tecnica corretti per la saldatura. Se infatti si avesse un eccessivo apporto di calore (causato dall'impostazione della tensione o della velocità di alimentazione del filo troppo alta o da una velocità di avanzamento troppo lenta) questo può portare a deformazioni o bruciature, specialmente sui materiali più sottili. Poiché l'alluminio è più soggetto a questi effetti rispetto all'acciaio, generalmente richiede una velocità di saldatura maggiore rispetto all'acciaio per evitare l'accumulo di calore. La mancanza di fusione invece può verificarsi quando la tensione o la velocità di avanzamento del filo sono impostate troppo basse o quando la velocità di traslazione della torcia è troppo elevata. Poiché l'alluminio conduce il calore molto più velocemente dell'acciaio è soggetto a mancanza di fusione all'inizio di una saldatura fino a quando non viene immessa abbastanza energia. Alcune apparecchiature di saldatura affrontano questo problema aumentando automaticamente la corrente all'inizio di una saldatura e poi diminuendola per evitare un accumulo di calore eccessivo.

Capitolo 4

L'importanza dell'oscillazione

Una delle pratiche su cui focalizzarsi per produrre saldature di qualità con maggiore efficienza è l'esecuzione di oscillazioni durante la saldatura.

La comprensione degli effetti della saldatura è particolarmente importante per garantire l'integrità e il funzionamento ottimale dei componenti meccanici, ma per far ciò occorre analizzare l'influenza che i parametri di saldatura hanno sulle caratteristiche finali del giunto.

Come dimostrato da [2], l'oscillazione stessa può ad esempio provocare un apporto termico che differisce da quello derivante da un andamento lineare.

L'articolo spiega come nei più comuni processi di saldatura ad arco elettrico, viene utilizzato un elevato apporto termico per unire due parti metalliche attraverso la fusione localizzata del metallo d'apporto, o anche del metallo base del pezzo, influenzando così le proprietà dei materiali, la microstruttura e di conseguenza le caratteristiche della loro prestazione di servizio.

La distribuzione della temperatura durante la saldatura è fondamentale per i risultati ottenuti nell'unione delle parti metalliche, nonché per le proprietà del giunto come la forma e la composizione chimica del cordone di saldatura, le dimensioni della zona termicamente alterata, la presenza di difetti e i livelli di sollecitazioni residue.

É importante ribadire che l'ampiezza di oscillazione non può essere troppo elevata causa imperfezioni che possono nascere, ma se della giusta dimensione è fondamentale per depositare cordoni di saldatura di larghezza maggiore.

Se il movimento è eseguito correttamente, il percorso impedisce alle scorie di essere intrappolate e riduce la formazione di pori fornendo un po' più di tempo al gas per uscire dal bagno fuso durante il raffreddamento, [3]. Inoltre esso può migliorare la fusione ai bordi della saldatura.

Nella saldatura ad elettrodo rivestito ad esempio alcuni manuali consentono un movimento dell'elettrodo di massimo tre volte il diametro dell'elettrodo stesso [4]. In sostanza, nonostante differenti articoli si riferiscano al movimento oscillante come un errore da evitare che causa difetti di saldatura [5], tale movimento, favorendo una maggiore penetrazione e producendo un cordone di saldatura più ampio, può aumentare

l'efficienza del processo di saldatura e quindi è ampiamente utilizzato per ottenere saldature di alta qualità, a patto che questo movimento segua una legge ben definita e non sia frutto di movimenti casuali specie se ci riferiamo a saldature manuali. In merito a questo è utile fare una distinzione tra saldatura manuale e automatica.

Saldature manuali e automatiche

Come detto, in ambito produttivo, diverse sono le metodologie di deposizione del materiale che possiamo elencare di seguito facendo riferimento a AWS WHC1.11:

- Saldatura manuale: la saldatura manuale è un tipo di tecnica di saldatura in cui
 intere operazioni di saldatura sono controllate manualmente. Il portaelettrodo, la
 torcia di saldatura e il cannello sono controllati solo manualmente. Non vengono
 utilizzati dispositivi meccanici per controllare queste apparecchiature. Gli esempi
 di questa tecnica sono la saldatura ad arco SMAW e manuale GTAW.
- Saldatura semiautomatica: la saldatura semiautomatica è quella in cui l'attrezzatura utilizzata controlla l'alimentazione del metallo d'apporto ma l'avanzamento della saldatura è controllato manualmente, ovvero un alimentatore di filo è collegato all'attrezzatura di saldatura che fa avanzare il metallo d'apporto continuamente attraverso la torcia di saldatura mentre essa è comandata manualmente dall'operatore. Gli esempi di questa tecnica di saldatura sono la saldatura FCAW, GMAW e GTAW.
- Saldatura a macchina: La saldatura a macchina è definita come una saldatura eseguita con l'attrezzatura che dispone di controlli che possono essere regolati dall'operatore in risposta ai cambiamenti nelle condizioni di saldatura. La torcia, la pistola o il portaelettrodo sono tenuti da un dispositivo meccanico. In questa tecnica tutte le operazioni di saldatura sono controllate da dispositivi meccanici o elettronici e gli operatori di saldatura possono solo variare manualmente i valori dei parametri durante la saldatura in base alla configurazione del giunto. Gli esempi di questa tecnica di saldatura sono SAW, GMAW, FCAW e GTAW.

• Saldatura automatica: la saldatura automatica è eseguita con un'attrezzatura che esegue le operazioni di saldatura senza regolazione dei comandi da parte dell'operatore di saldatura, ovvero l'operatore di saldatura non può controllare i parametri poichè a monte dell'operazione è realizzato un programma di saldatura i cui parametri sono preimpostati ed eseguiti. Per questo tipo di saldatura, l'attività del saldatore è l'avviamento della macchina con la ricerca di difetti o problematiche da correggere. Una tipologia di saldatura automatica è la saldatura robotizzata controllata da apparecchiature robotizzate che non richiedono alcun intervento da parte del saldatore. La funzione principale del saldatore qui è effettuare il controllo qualità e correggere eventuali deviazioni o problemi.

La saldatura automatizzata può produrre almeno il doppio di ciò che un saldatore esperto può offrire. Consente inoltre di ripetere il ciclo di saldatura senza pregiudicare la qualità del risultato. Dopotutto, la macchina è comunque soggetta a guasti o malfunzionamenti. Se infatti la saldatura automatizzata può produrre prodotti con la stessa qualità, potrebbe non essere l'ideale per piccoli ritocchi che un saldatore umano può semplicemente eseguire rapidamente con una torcia sulle aree necessarie.

Nonostante ciò, la saldatura manuale potrebbe essere soggetta a problemi di qualità comuni come la formazione di spruzzi di saldatura, porosità e penetrazione superficiale, solo per citarne alcuni.

Per quanto riguarda la flessibilità per il passaggio da un'operazione di saldatura all'altra potrebbe essere necessario più tempo per regolare la macchina automatizzata per un altro ciclo di saldatura.

Un saldatore umano, d'altra parte, può trasferirsi facilmente da una postazione di lavoro all'altra per eseguire diverse attività di saldatura. Le saldatrici manuali potrebbero impiegare più tempo a spostarsi, ma in termini di completamento di diverse saldature in un tempo limitato, la saldatura manuale è l'ideale.

In termini di costi invece per il processo automatico non sarà necessario assumere saldatori altamente qualificati per eseguire il lavoro: sarebbe sufficiente qualcuno in grado di azionare i sistemi automatizzati. Poiché è necessaria meno forza lavoro umana, è possibile ridurre la probabilità di errori umani, riducendo anche il numero di scarti di produzione.

Tutto ciò deve essere rapportato all'investimento iniziale. Sebbene ci siano opzioni economiche per passare all'automazione della saldatura, alcuni potrebbero comunque trovare l'investimento iniziale superiore all'investimento per un'operazione di saldatura manuale. Tuttavia, a lungo termine, i vantaggi economici dell'automazione si fanno sempre più importanti.

Nel presente lavoro si fa riferimento ad un processo automatizzato i cui valori opportuni di ampiezza di oscillazione, velocità e frequenza andranno inseriti nella macchina al fine di ottenere un andamento di saldatura adeguato. Verranno poi definiti meglio nei capitoli successivi le strategie da adottare per un corretto movimento.

Descrizione attività

La seguente attività si pone l'obiettivo di preparare il materiale e la macchina per effettuare una successiva operazione di saldatura stabilendo un pendolamento ottimale della torcia. Per la valutazione di qualità di saldatura, ovvero porosità, resistenza a trazione, durezza nella zona saldata e microstruttura della sezione trasversale, si effettueranno ricerche al fine di stabilire le analisi più utili da eseguire, e come poterle preparare al meglio.

Per il presente lavoro si è fatto riferimento come detto a ricerche in letteratura per identificare quelli che sono i processi, le normative di riferimento e le strategie che sono state applicate in attività simili a questa e in parte applicabili in situazioni di saldatura differenti.

Il materiale oggetto della ricerca è costituito da due piastre in alluminio serie 6000 dello spessore di 3 mm da unire insieme per sovrapposizione tramite un processo di saldatura MIG di tipo Cold Metal Transfer. Andranno discussi gli effetti della velocità di saldatura (S) e alimentazione del filo (WFS), la tensione (V) e la corrente (I) tenendo in considerazione che nella saldatura CMT, essi sono correlati tra loro, ovvero cambiando uno dei parametri sopra, cambiano anche i restanti. Si cercherà quindi di attribuire un giusto valore a ciascuno dei sopracitati parametri. L'apporto di calore (Q) è un valore che verrà mostrato dalla macchina o in alternativa è calcolabile tramite un'apposita formula. A causa dei coefficienti di espansione termica e conduttività termica relativamente alti rispetto

all'acciaio, questo valore è un prerequisito importante per evitare alcuni problemi come bruciature e distorsioni.

Il posizionamento della torcia è un parametro da tenere fortemente in considerazione. Questo perché l'inclinazione e la distanza da vertice delle due lamiere in sovrapposizione influenzerà la qualità della saldatura. In particolare occorre prestare attenzione ai seguenti aspetti:

- la distanza della sporgenza del filo dal vertice formato dalle due lamine in sovrapposizione
- il Work angle ovvero l'inclinazione della torcia sul piano della sezione trasversale che determinerà a sua volta la posizione di puntamento della torcia
- il Travel angle ovvero l'inclinazione della torcia nel piano passante per la direzione di saldatura.
- Il passo di oscillazione da cui poi ricavare la frequenza

Si presuppone che la torcia durante la sua oscillazione (simmetrica) andrà a toccare entrambe le 2 lamine di alluminio.

Caratteristiche di oscillazione

Al fine di stabilire la corretta strategia di oscillazione per una saldatura con processo CMT si è fatto riferimento ad alcuni articoli che trattano problematiche simili a quelle da esaminare.

I seguenti articoli riportati sono quelli che si concentrano maggiormente sul tema del movimento torcia, per cui ci si sofferma principalmente sui movimenti trattati, facendo riferimento però anche ad altri valori da tenere a mente, come ad esempio il gas di protezione, le varie velocità e i metodi di verifica dei difetti.

Tra le tante ricerche eseguite, l'articolo [6] è tra i più interessanti sebbene utilizzi una macchina per Additive manufacturing, poiché uno dei pochi ad utilizzare un tale movimento non lineare applicato ad una macchina di saldatura GMAW (sinergica pulsata). Questa tipologia di saldatura lega i parametri della saldatura pulsata alla velocità

d'avanzamento del filo in modo da ottenere condizioni di saldatura ottimali sull'intera gamma delle velocità d'avanzamento del filo per un dato diametro.

Il filo d'apporto usato è un ER70S-6 (acciaio dolce) di diametro 1.2 mm con piastra di supporto in acciaio S235JR dello spessore di 8 mm. Il gas di protezione utilizzato è un fattore importante per la presente ricerca. Occorre infatti definirne la composizione ottima per il tipo di materiale di base utilizzato. In questo caso è stato utilizzato una miscela di Argon 80% e CO₂ 20% mentre la velocità di avanzamento del filo è di 8 m/min. Ritornando alle strategie di deposizione, esse erano 2: per sovrapposizione con andamento lineare e di oscillazione triangolare con ampiezza picco-picco di 20 mm.

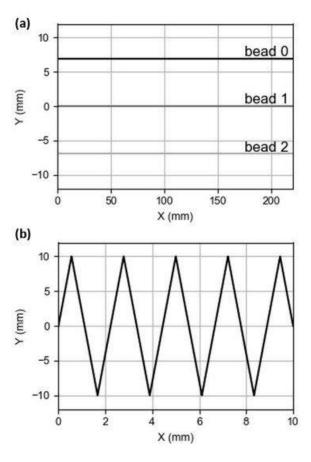


Figura 31: Le due strategie di deposizione

Nel nostro caso ovviamente ci si è focalizzato sulla strategia ad oscillazione triangolare tralasciando l'andamento lineare.

È stato effettuato uno studio preliminare per la selezione dei parametri che però non viene citato, progettando una serie di prove al fine di trovare i parametri di processo ottimali per la realizzazione delle pareti. Sono state quindi prodotte saldature unitarie e

scansionate con uno scanner laser. Sono stati scelti 5 livelli di velocità di avanzamento del filo e tre livelli di velocità di spostamento.

Fattori	Unità	Valore codificato					
ratton	Offita	-2	-1	0	+1	+2	
Velocità di avanzamento del filo (WFS)	[m/min]	4	6	8	10	12	
Velocità di spostamento (TS)	[cm/min]	-	30	65	100	-	

Figura 32: Valori di velocità di avanzamento e spostamento

Questo può portarci a pensare che la velocità di avanzamento del filo possa essere un giusto parametro da fare variare entro un determinato range. Il presente range di valori è tenuto in considerazione per un confronto tra valori riassunti nel capitolo successivo. Dopo la realizzazione dei cordoni, questi sono stati analizzati tenendo conto dell'omogeneità, della continuità, della forma geometrica, della penetrazione e della diluizione. Per determinare la penetrazione e la diluizione sono state analizzate macrografie della faccia trasversale. Per quanto riguarda la forma geometrica, per misurare la larghezza e l'altezza, sono stati utilizzati i risultati del laser scanner ottenendo immagini come in figura sotto.

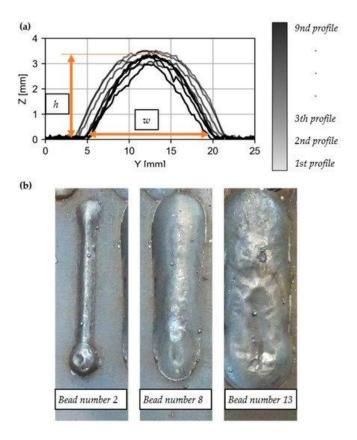


Figura 33: (a) Profili acquisiti con il laser scanner del cordone 7, dove si possono vedere l'altezza (h) e la larghezza (w); (b) Immagini dei cordoni 2, 8 e 13.

La larghezza e l'altezza dei cordoni sono stati calcolati da ciascuno di questi profili e la media di questi valori (wavg e havg) può essere trovata nella tabella sottostante.

Beads Number	WFR	TS	Wavg (mm)	Havg (mm)	GF	Wetting Angle (°)
1	-2	-1	7.30	2.69	12.27	36.37
2	-2	0	4.62	1.69	49.45	36.19
3	-2	+1		Non-co	ontinuous	
4	-1	-1	11.28	2.91	8.23	27.29
5	-1	0	7.96	2.41	18.14	31.15
6	-1	+1	4.43	2.18	34.32	44.59
7	0	-1	15.26	2.98	8.22	21.34
8	0	0	7.88	2.25	63.50	29.73
8 9	0	+1	5.52	1.95	15.65	35.21
10	+1	-1	15.05	3.39	29.40	24.25
11	+1	0	8.73	2.93	11.21	33.89
12	+1	+1	7.69	2.63	25.51	34.39
13	+2	-1	17.21	4.19	6.86	25.94
14	+2	0	10.88	3.24	27,58	30.78
15	+2	+1	8.38	2.60	10.33	31.86

Tabella 4: Risultati della misurazione della geometria dei cordoni

Si può vedere il prodotto dell'inverso delle deviazioni standard di altezza e larghezza. Questo valore inverso è una caratteristica geometrica (GF). Il GF indica il livello di omogeneità e continuità del cordone ed è stato ottenuto seguendo l'Equazione:

$$GF = \frac{\left(\frac{1}{\sigma_w} * \frac{1}{\sigma_h}\right)}{2}$$

Dove

$$\sigma_w = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (w_1 - \overline{w})^2}}{\frac{n}{\sum_{i=1}^n (h_i - \overline{h})^2}}$$

$$\sigma_h = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (h_i - \overline{h})^2}}{\frac{n}{n}}$$

Il valore dell'angolo di bagnatura può essere calcolato come:

Wetting angle =
$$\tan^{-1} \left(\frac{h_{avg}}{w_{avg}/2} \right)$$

Tale angolo è stato riportato poiché influenzerà la resistenza a trazione vista nel capitolo 5. Una formula che ci consente di ricavarne il valore è dunque da ritenersi utile.

Al termine di questa analisi i valori scelti, giudicati ottimali per la parete creata da cordoni sovrapposti e quella per movimento oscillatorio sono:

Process Parameter	Overlapped Wall	Oscillated Wall
Wire feed speed [m/min]	8	8
Deposition rate [kg/h]	4.26	4.26
Torch speed [cm/min]	65	20
Stick-out [mm]	15	15
Shielding gas type	20% CO2-80% Ar	20% CO2-80% Ar
Gas flow [L/min]	17	17

Tabella 5: Valori selezionati per i 2 casi

Da questa tabella si sono notati dei valori di portata di gas e velocità in linea con quelli utilizzati in altre ricerche riassunte nelle tabelle del successivo capitolo.

Si arriva quindi, proseguendo in ordine con l'attività di questa ricerca, alla parte principale oggetto di questo capitolo: ampiezza e velocità durante l'oscillazione.

Nel caso della parete sovrapposta, la velocità di traslazione è costante lungo tutta la traiettoria, determinando una deposizione uniforme. In figura è invece mostrato un ciclo della traiettoria della torcia nella parete ottenuta con oscillazione e la sua distribuzione della velocità di avanzamento. In questo caso la velocità è minore ai lati rispetto alla parte centrale, annullandosi in curva a causa del cambio di direzione. Pertanto, la deposizione di materiale non è uniforme lungo l'intero percorso.

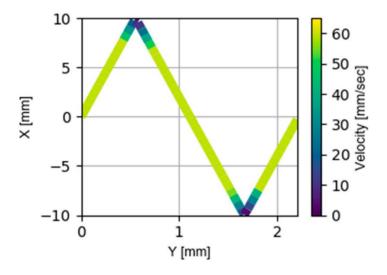


Figura 34: Andamento velocità

Queste immagini e i valori stabiliti nelle tabelle precedenti sono informazioni utili che ci permettono di avere una base su cui poter sviluppare il lavoro preso in esame nonché obiettivo della tesi.

Un'altra ricerca bibliografica utile per la tematica di questo capitolo è la pubblicazione [2]. Questa fa riferimento alla parametrizzazione del percorso che l'arco elettrico deve percorrere. Per quanto riguarda il movimento oscillatorio, i suoi parametri principali sono l'ampiezza di oscillazione, cioè la massima larghezza di apertura in direzione trasversale al movimento di traslazione complessivo dell'arco elettrico e può essere scritto come wtan θ .

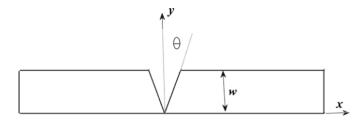


Figura 35: Spessore e angolo ϑ sella piastra

La frequenza di oscillazione f è il numero di cicli di oscillazione completati per unità di tempo. È anche rilevante notare che v si riferisce alla velocità longitudinale dell'arco elettrico.

La Figura 36 presenta un semplice andamento oscillatorio, e per la sua parametrizzazione si osserva che il movimento avviene senza penetrazione, per cui l'intera curva si trova su un piano parallelo al piano delle coordinate xz, posizionato alla coordinata y uguale allo spessore w della lastra. Inoltre, il movimento è limitato a uno schema oscillatorio che può essere descritto da una funzione trigonometrica sinusoidale.

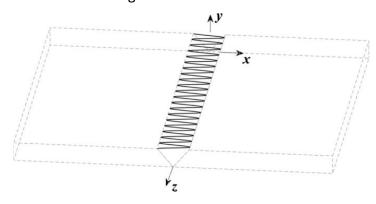


Figura 36: Percorso di oscillazione

Pertanto, la curva che rappresenta il movimento può essere parametrizzata secondo l'Eq. seguente:

$$x_0(t) = w tan(\theta) sin(2\pi f t)$$

$$y_0(t) = w$$

$$z_0(t) = v t$$

Ovviamente questo movimento avviene su un piano diverso dal piano su cui si muoverà la torcia in configurazione Lap-joint, ma i risultati si presuppone che possano valere indipendentemente dal piano.

L'articolo tratta anche il caso di oscillazione con penetrazione lungo lo spessore della lastra, ma poiché si discosta dal nostro caso, non verrà riportato.

Il processo di saldatura utilizzato è GMAW, con una saldatrice automatica che controlla l'avanzamento del filo, la velocità di saldatura e il flusso di gas.

Il materiale delle piastre e del cordone di saldatura è considerato lo stesso, acciaio 10Ni-5Cr-Mo-V, I parametri di saldatura utilizzati dal presente articolo, da loro ottenuti facendo riferimento a [7], sono mostrati nella Tabella 6:

Voltage (V)	23	Efficiency (%)	0.75
Current (A)	180	Weave amplitude (mm)	10
Velocity (mm/s)	2	Weave frequency (Hz)	0.5

Tabella 6: Valori scelti

Dalla tabella si è notato come il valore dell'ampiezza di oscillazione di 10 mm sia lo stesso dell'articolo precedente, per cui può essere sicuramente utilizzato come base di partenza per poter poi effettuare delle saldature di prova successive.

Interessante è anche l'ausilio di un limitatore di ampiezza, poiché la saldatura è stata eseguita manualmente.

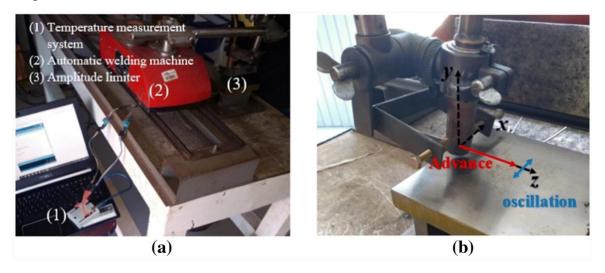


Tabella 7: Saldatrice automatica (a) e limitatori di ampiezza (b)

Una volta effettuata la saldatura i cordoni risultanti per le tre piastre sono mostrati in Figura 37.

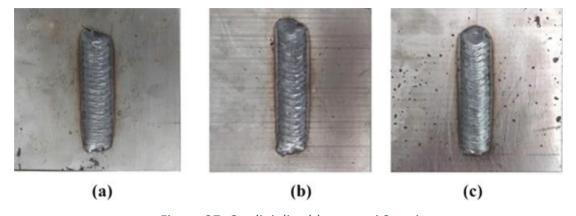


Figura 37: Cordini di saldatura nei 3 casi

Con questo risultato è stato possibile misurare le dimensioni del bagno di saldatura.

Aspetto interessante per la nostra ricerca è che la frequenza di tessitura è stata

determinata, una volta eseguita manualmente, dal numero di strati longitudinali osservati
sul cordone.

Successivamente la ricerca si focalizza sull'andamento della temperatura media in ogni istante di tempo in due punti differenti ad una determinata distanza dalla zona saldata. Tali informazioni esulano dalla finalità di questo capitolo ma sono importanti per farci notare come anche la temperatura subirà un'oscillazione durante la saldatura.

La successiva ricerca svolta da riportare fa riferimento a tre parametri per controllare il movimento di saldatura, vale a dire velocità di marcia lungo una linea guida v_t, ampiezza A e lunghezza di tessitura w_i, come mostrato in Figura 38.

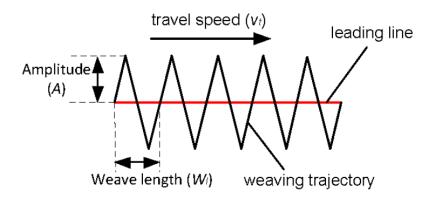


Figura 38: Grandezze dello spostamento

Successivamente vengono riportate una serie di formule atte a calcolare tali valori. Secondo [8] infatti data la velocità di spostamento v_t lungo la linea guida, la velocità di spostamento nominale v lungo la traiettoria di tessitura può essere calcolata come l'equazione:

$$v = \frac{4(A^2 + (\frac{W_l}{4})^2)^{1/2}}{W_l} \cdot v_t$$

Supponiamo che la larghezza del cordone generato con la velocità calcolata v sia w_v , la larghezza del cordone depositato con l'oscillazione è calcolabile tramite:

$$width = 2A + w_v$$

E l'altezza media del cordone può essere calcolata come segue:

$$height = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot v_w}{width \cdot v_t}$$

dove r è il raggio del materiale del filo e v_w è la velocità di avanzamento del filo. Ovviamente, l'ampiezza ha una grande influenza sulla larghezza del cordone di saldatura. In pratica però non è facile ottenere la larghezza del cordone w_v in Figura 39.

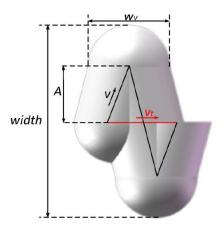


Figura 39: Dimensioni ampiezza cordone

La cosa che più interessa al di là delle formule sono i valori che vengono attribuiti ad ogni parametro:

No.	v _w (m/min)	v _t (m/min)	$W_l(mm)$	A(mm)	width(mm)	height(mm)
1	8	0.3	2	3	12.63	2.39
2	8	0.3	2	6	17.70	1.70
3	8	0.3	3	5	16.35	1.84
4	8	0.3	4	4	15.97	1.89
5	8	0.3	5	4	13.70	1.32
6	8	0.3	5	5	15.18	1.19
7	8	0.5	2	4	13.35	1.36
8	8	0.5	3	3	10.23	1.77
9	8	0.5	3	6	15.77	1.15
10	8	0.5	4	8	18.63	0.97
11	8	0.5	5	5	15.18	1.19
12	7	0.3	2	2	11.46	2.30
13	7	0.3	2	5	14.20	1.86
14	7	0.3	3	7	18.36	1.44
15	7	0.3	4	3	13.95	1.89
16	7	0.3	4	6	16.01	1.65
17	7	0.3	5	5	14.96	1.76
18	7	0.5	2	4	11.84	1.34
19	7	0.5	3	6	12.66	1.25
20	7	0.5	4	2	9.78	1.62
21	7	0.5	4	5	12.34	1.28
22	7	0.5	5	4	11.83	1.34
23	7	0.5	5	8	17.01	0.93
24	6	0.3	2	5	12.55	1.80
25	6	0.3	3	7	17.11	1.32
26	6	0.3	4	3	10.69	2.12
27	6	0.3	5	2	10.22	2.21
38	6	0.3	5	8	18.43	1.23
39	6	0.5	2	5	11.18	1.21
30	6	0.5	3	4	9.87	1.38
31	6	0.5	3	7	13.72	0.99
32	6	0.5	4	6	12.27	1.11
33	6	0.5	5	5	11.14	1.22
34	6	0.5	5	8	15.83	0.86

Figura 40: Valori dei differenti parametri

Si nota qui come la velocità di avanzamento del filo delle prime prove (1-11) sia identica a quella dell'articolo [6].

Focalizzandoci sull' oscillazione, l'ampiezza assume valori da 2 mm ad 8 mm, mentre il passo di oscillazione è nel range 2-5 mm, in linea con le ricerche precedenti. Questo dimostra come tramite un confronto della letteratura, in assenza di informazioni precise da applicare ad attività sperimentali si possa arrivare a stabilire dei valori ben definiti o quanto meno di base da cui partire.

Per un confronto in questo senso è necessario riportare di seguito l'attività [9], in cui sono stati prelevati campioni di giunti saldati di testa utilizzando lastre di acciaio al carbonio ASTM A36 che erano rispettivamente di 250x250x9,5 mm di lunghezza, larghezza e spessore. Le piastre sono state saldate longitudinalmente utilizzando una tecnica GMAW-MIG secondo la specifica della procedura di saldatura (WPS). L'elettrodo utilizzato era un acciaio al carbonio ER70S6 di 1.2 mm di diametro. La miscela di gas inerte era 82% Ar e 18% CO2 e la portata era 15 L/min, il tutto secondo le norme DIN EN 1011-2 e UNE-EN ISO 15609-1. Il processo MIG ha utilizzato il trasferimento di metallo in corto circuito tramite arco pulsato con quattro diversi parametri di saldatura utilizzando un robot fisso Comau a controllo manuale, un braccio C5G a sei assi di movimento, una stazione di lavoro con due piani di lavoro e un alimentatore Fronius modello Transpuls 4000.

Sulla base di precedenti sperimentazioni, tale articolo arriva a riassumere i parametri ottimali scelti in base anche al tipo di movimento della torcia, senza riportare però il modo in cui è arrivato a stabilirli.

Specimen/ condition	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Arc length (%)	Power (%)	Net heat input Q _{net} (kJ/mm)	Torch weaving (Frequency (Hz)/ Amplitude (mm))
1A	201.2	26.8	38.5	-5	63	0.714	Triangular (1.28/3)
2A	201.2	26.8	38.5	-5	63	0.714	Sinusoidal (1.28/3)
3A	201.2	26.8	38.5	-5	63	0.714	Lineal (1.28/3)
4A	201.2	26.8	38.5	-5	63	0.714	Circular (1.28/3)
5B	159.2	23.2	31.5	+5	43	0.599	Lineal (1.05/3)
6B	159.2	23.2	31.5	+5	43	0.599	Triangular (1.05/3)
7B	159.2	23.2	31.5	+5	43	0.599	Sinusoidal (1.05/3)

Tabella 8: Parametri scelti

La tabella sopra ci illustra dei risultati differenti da quelli visti finora. Se infatti è vero che l'ampiezza di oscillazione è dell'ordine dei 3 mm (molto più piccola dei 10 mm sempre visti fino a qui), è anche vero che la frequenza di oscillazione è più del doppio rispetto ai 0,5 Hz riportati precedentemente. Questo significa che il passo è inferiore rispetto a prima e che il pendolamento della torcia sarà più fitto. Per compensare ciò l'ampiezza è stata di conseguenza ridotta.

Tutte le scelte fatte (ad esempio l'ampiezza del movimento torcia) influenzeranno i valori che si ricollegano ad esse (quindi frequenza e passo del pendolamento).

È indispensabile comprendere anche il perché adottare un tipo di movimento piuttosto che un altro. Le conclusioni riportate dalla ricerca [9] ci vengono in aiuto riassumendo quelle che sono le caratteristiche che ogni tipo di movimento torcia provoca:

1. Per la condizione di saldatura A, gli andamenti lineari, sinusoidali e circolari hanno favorito un aumento della larghezza della ZTA, nonché un moderato aumento della resistenza allo snervamento insieme a un maggiore indurimento della ZTA rispetto a quello dei cordoni di saldatura ottenuti con andamento triangolare. Quest'ultimo ha favorito valori di energia d'impatto Charpy più grandi nella ZTA con la larghezza più piccola dovuto a carico di rottura a trazione e durezza Vickers più bassi. Questo comportamento è stato attribuito alla presenza di ferrite a grana grossa rispetto agli altri tipi di oscillazioni.
Pertanto, il percorso triangolare è il migliore in termini di migliori proprietà

meccaniche sotto tensione e impatto, durezza più bassa del metallo di saldatura e

2. Per la condizione A, l'andamento circolare generava il più alto livello di indurimento e la più bassa energia Charpy assorbita nella ZTA a seguito di un aumento del carico di snervamento che era associato alla presenza di fasi microstrutturali dure come la ferrite aciculare sotto forma di aghi sottili. In base a ciò, la suscettibilità alle cricche è favorita dalla zona microstrutturale eterogenea della ZTA. Questo comportamento metallurgico è stato confermato da un'analisi

della ZTA, e generazione di caratteristiche microstrutturali adeguate;

frattografica.

3. Il movimento lineare della torcia ha favorito la maggiore larghezza della ZTA contenente aghi di ferrite aciculari per entrambe le condizioni di saldatura A e B rispetto agli altri tipi di oscillazioni. Ciò era correlato all'accumulo di calore lungo la linea di fusione del giunto. I tipi di movimento circolari, lineari e sinusoidali non sono raccomandati per la saldatura robotizzata poiché hanno generato indurimento, un aumento della resistenza allo snervamento e una maggiore eterogeneità microstrutturale nella ZTA con fasi aghi di ferrite aciculari duri.

In riferimento a questi risultati ci giunge difficile fare una scelta a priori di una oscillazione che sia la migliore di tutte. Piuttosto si procede con la scelta di uno di questo movimenti andandone a studiare le caratteristiche meccaniche che esso porta.

Concludendo la ricerca bibliografica di pubblicazioni che hanno come obiettivo l'individuazione di parametri ottimali per l'esecuzione di saldatura con torcia oscillante, l'unico articolo che utilizza una tecnica di saldatura CMT è [10], sebbene faccia riferimento al campo della fabbricazione additiva.

È stato utilizzato il filo di saldatura Inconel 625 di 1,2 mm di diametro. L'unità mobile consisteva in un robot ABB a sei assi e un binario di guida a un asse rappresentato di seguito

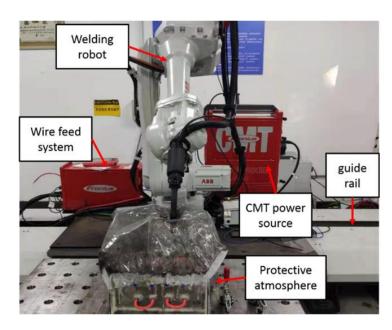


Figura 41: Descrizione postazione di saldatura

I campioni sono stati prodotti con una lunghezza di 160 mm, una larghezza di 14 mm e un'altezza di 85 mm. L'argon è stato utilizzato come gas di protezione e la portata era di 21 l/min.

In questo lavoro sono state utilizzate due diverse modalità di deposizione: passaggio tramite oscillazione (Modalità A) e tecnica multistrato a due passaggi (Modalità B). Le strategie di deposizione sono mostrate nella Figura 42.

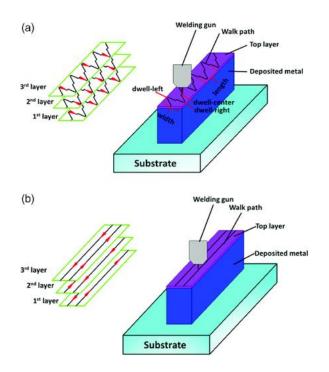


Figura 42: Strategie di deposizione

I parametri dettagliati inseriti nel robot ABB sono riportati nella Tabella 9.

Mode W	Wire feed speed	0 1		Average voltage [V]	Oscillation dimension [mm]				
	[m min ⁻¹] [mn	[mm s ⁻¹]			dwell_center	dwell_right	dwell_left	length	width
Mode A	7.5	8	165	21.3	0.1	0.3	0.3	3	12
Mode B	7.5	8	139	17.8					

Tabella 9: Parametri inseriti nel robot di saldatura

Nella modalità A è stato scelto il tipo di forma a zig-zag con una velocità di spostamento della torcia di 8 mm/s e una velocità di avanzamento del filo di 7,5 m/min. In questo lavoro, la larghezza dell'oscillazione è stata impostata a 12 mm, ancora una volta in linea con i valori ricercati precedentemente. Il modo B era costituito da due singole passate depositate una accanto all'altra e formavano uno strato. In questo modo si può ottenere lo spessore del campione uguale a quello del Modo A. Le velocità qui sono state mantenute uguali.

Il presente capitolo ci permette dunque di stilare una serie di conclusioni atte a definire meglio il movimento della torcia. Si è visto come il movimento sinusoidale e triangolare siano i due più utilizzati e come l'ampiezza e la frequenza di oscillazione siano sempre mantenute attorno ai valori rispettivamente di 8-12 mm e 0,5-1 Hz. Il passo di oscillazione invece tenendo a mente i 2 valori precedenti è sempre poco più di 2 mm. Questi sono

valori di riferimento da cui partire per una attività sperimentale, ciò non toglie che si avesse esigenza di avere una ampiezza di oscillazione maggiore (causa saldatura in lapjoint), la frequenza possa assumere valori inferiori rispetto al range citato in modo da non avere sollecitazioni e vibrazioni eccessive.

Capitolo 5

Attività di preparazione provini

Come già accennato, questo capitolo si preoccupa di definire le basi per poter far nascere una successiva attività sperimentale di laboratorio. Per far ciò è necessario identificare quelli che sono i materiali da cui partire in modo tale che i risultati delle ricerche fatte siano attinenti al materiale.

A differenza del Capitolo 4 che fa riferimento esclusivamente alla parte di oscillazione torcia delle analisi di letteratura, in questo capitolo verranno citate le fonti da cui estrarre informazioni in base ad ogni tematica affrontata.

Poiché si fa riferimento ad un utilizzo in ambito automotive, sono oggetto di questo lavoro di preparazione due lamine di alluminio serie 6xxx (lega progettata specificamente per requisiti di elevata resistenza insieme a un eccellente comportamento agli urti e resistenza alla corrosione) dello spessore di 3 mm. La normativa UNI EN ISO 15614-2 consiglia di partire da lamine di 300x150 mm².

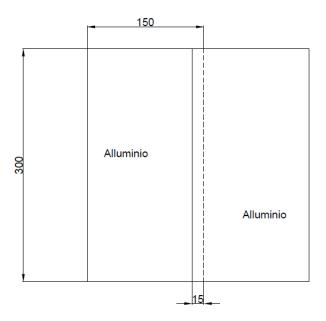


Figura 43: Dimensioni lastre

Come anticipato la saldatura CMT presa in esame dovrà essere applicata con posizionamento delle lastre in sovrapposizione, per questo motivo un primo problema

che può sorgere è sulla dimensione di tale sovrapposizione. La scelta può essere fatta a valle di un confronto tra le varie ricerche riassunte in

Tabella 10 che permette anche un rapido confronto di dimensioni:

Letteratura	Giunto	Lega d'alluminio	Dissimili	Dimensione saldata	Sovrapposizione
[11]	Sovrapposizione	-	lamiera di	80x140x2/2.3	10 mm
			acciaio		
			laminata a		
			caldo		
[12]	Sovrapposizione	-	6061	100x100x2	10 mm
			T6+AZ31B		
[13]	Di testa	AA6061	-	180x75x2	-
[14]	Di testa	AA5052	-	150x50x2	-
[15]	Nessun giunto (MIG)	AA6082	-	150x100x8	-
[16]	Sovrapposizione		alluminio	300x150x3/2	15 mm
	(MIG)		5754 e		
			acciaio		
			zincato		
[17]	Sovrapposizione	AA1050	-	250x100x2	Non riportato
[18]	Di testa	-	Alluminio	150x330x6	-
			5083-		
			H111 e		
			6082-		
			T651		
[19]	Sovrapposizione	-	Acciaio	300x150x2,3	25 mm
	(GMAW)		GA 590 FB		
[20]	Sovrapposizione	-	AA6061-	250x50x1	10 mm
			T6 +		
			Acciaio al		
			Boro		
			zincato		
[21]	Di testa	AA7075	-	150x50x6	-
[22]	Di testa	AA7075	-	250x100x2	-
		tb6			
[23]	Sovrapposizione	-	AA6061 e	Non	15 mm
			acciaio	specificato	
			zincato		
[24]	Di testa	-	AA6061-	100x60x3,18/2	-
			T6 e		
			AA6082-		
			Т6		

[25]	Di testa	-	AA5182-O	250x100x2	-
			e 6082-T4		
[26]	Di testa	-	EN AW	350x150x2	-
			6082 e EN		
			AW		
			2017A		
[27]	Sovrapposizione	-	Titanio	100x50x1	10 mm
			TA2 e		
			Rame T2		
[28]	Sovrapposizione	-	Alluminio	200x100x1/1.2	18 mm
			Novelist		
			AC 170 PX		
			e acciaio		
			zincato		
			ST06 Z		

Tabella 10: Confronto dimensioni

Un giusto valore di sovrapposizione delle lamine può essere 15 mm, rappresentato in Figura 44.

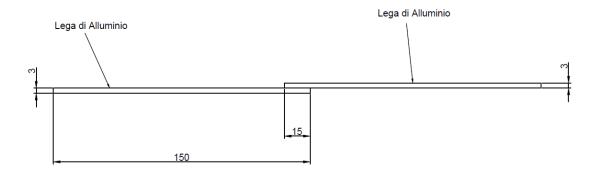


Figura 44: Posizionamento lastre

Tuttavia è necessaria una prova iniziare da effettuarsi su 2 lamiere di dimensioni inferiori per la valutazione dell'influenza del passo del pendolamento.

Si può procedere variando il passo ad esempio ogni 5 cm di saldatura eseguita, ma ai fini dell'ispezione visiva occorrerà uno spazio di transizione di qualche centimetro tra una saldatura con un dato passo e la successiva con passo differente per consentire la corretta transizione tra le fasi.

Il gap tra le due lamine in teoria si preferisce essere diverso da zero (circa 0,5 mm utilizzato in [17]) poiché necessario per consentire la rimozione dei vapori formati.

Con gap nullo infatti si genererebbero difetti di saldatura come schizzi e pori; tuttavia le due lastre non possono essere fuse insieme quando questo è troppo elevato e superiore ad un valore limite che comporterebbe una zona con mancanza di fusione.

Il filo d'apporto adeguato su cui ci si può far riferimento è un ER5356 (AlMn₅) con diametro 1,2 mm la cui composizione è riportata in Tabella 11.

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Others	Al
ER5356	0.25	0.4	0.1	0.05	4.5	0.05	0.1	0.06	0.06	Bal.

Tabella 11: Composizione filo d'apporto

Secondo l'articolo [25], ER5356 e ER4043 sono i due più comuni e costituiscono la maggior parte delle applicazioni di metallo d'apporto in alluminio. Possono essere utilizzati con i più diffusi metalli base in lega di alluminio. A causa dell'alto contenuto di silicio in ER4043 questa lega ha un punto di fusione inferiore e una maggiore fluidità rispetto a ER5356. Pertanto, i giunti saldati con metallo d'apporto ER5356 hanno molti meno schizzi rispetto ai giunti saldati con metallo d'apporto ER4043.

In letteratura si è visto che per giunzioni di fogli di alluminio 6xxx la migliore combinazione di proprietà meccaniche è stata ottenuta utilizzando il materiale ER5356 poiché la composizione del metallo saldato conteneva meno elementi di lega rispetto al giunto saldato con ER4043, che migliora la duttilità dei giunti oltre a mantenere la resistenza a un livello ottimale. Le analisi EDX hanno rivelato concentrazioni inferiori di Si e Mg nei giunti saldati con metallo d'apporto ER5356 rispetto ai giunti saldati con ER4043.

L'elevata quantità di silicio e magnesio presente in corrispondenza della linea di saldatura e di fusione di entrambi i lati del substrato tende a formare un composto intermetallico fragile (Mg₂Si). Di conseguenza, può verificarsi la frattura del giunto.

L' unico aspetto negativo è che a causa del maggiore apporto di calore richiesto per il metallo d'apporto ER5356 questi giunti subiscono una velocità di raffreddamento più

lenta rispetto ai giunti di metallo d'apporto ER4043 e quindi causano una microstruttura del WM a grana più grossa.

Per una visione più completa nella scelta del materiale d'apporto da utilizzare si può fare riferimento alla normative normativa AWS A5.10/A5.10M:2012 riportata di seguito.

		Guide to the	Choice of Fi	Table A.1 ller Metal fo	r General P	urpose Weld	ding		
Base Metal	201.0 206.0 224.0	319.0, 333.0, 354.0, 355.0, C355.0	356.0, A356.0 357.0, A357.0 413.0, 443.0, A444.0	511.0, 512.0, 513.0, 514.0, 535.0	7004, 7005, 7039, 710.0, 712.0	6009 6010 6070	6005, 6061, 6063, 6101, 6151, 6201, 6351, 6951	5456	5454
1060, 1070, 1080, 1350 1010, 3003, AF 3003 2014, 2036 2219 1004, AF 3004 5005, 5050 1005, 5050 1008	ER4145 ER4145 ER4145° ER2319° — — — —	ER4145 ER4145 ER4145 ER4145¢ ER4145¢ ER4043 ^b ER4043 ^b ER4043 ^b — — — — — — — — — — — — — — — — — —	ER4043 ^{a. b} ER4043 ^{a. b} ER4145 ER4145 ^{b. c} ER4043 ^b ER4043 ^f	ER5356 ^{c, d} ER5356 ^{c, d} ER5356 ^c d ER5356 ^f ER5356 ^f ER5356 ^d ER5356 ^d ER5356 ^d ER5356 ^f ER5356 ^f ER5356 ^f	ER5356 ^{c, d} ER5356 ^{c, d} ER5356 ^c ER5356 ^f ER5356 ^f ER5356 ^d ER5356 ^d ER5356 ^d ER5356 ^f ER5356 ^f ER5356 ^f	ER4043 ^{a, b} ER4043 ^{a, b} ER4145 ER4043 ^{a, b} ER4043 ^b ER4043 ^b ER4043 ^b — — — — — — — — — — — — — — — — — —	ER4043 ^b ER4043 ^b ER4145 ER4043 ^{a,b} ER4043 ^{b,f} ER5356 ^{c,f} ER5356 ^d ER5356 ^d ER5356 ^f ER5356 ^f ER5356 ^f	ER5356 ^d ER5556 ^d ER5556 ^d	ER4043b. ER4043b ER5356f ER5356f ER5356d ER5356d ER5356d ER5356d ER5356d
005, 6061, 6063 0101, 6151, 6201 0351, 6951	ER4145	ER4145 ^{b, c}	ER4043 ^{b, f, 8}	ER5356 ^f	ER5356 ^{c,f}	ER4043 ^{a, b, g}	ER4043 ^{b,f,g}	ZNO550	
5009, 6010, 6070	ER4145	ER4145b, c	$ER4043^{a, b, g}$	ER4043	ER4043	ER4043a, b, g			
7004, 7005, 7039 710.0, 712.0	_	ER4043 ^b	$ER4043^{b,f}$	ER5356 ^f	ER5356 ^d				
511.0, 512.0, 513.0 514.0, 535.0	-	-	ER4043 ^f	ER5356 ^f					
856.0, A356.0, 357.0 A357.0, 413.0 443.0, A444.0	ER4145	ER4145 ^{b, c}	ER4043 ^{b, h}						
319.0, 333.0 54.0, 355.0 2355.0	ER4145 ^c	ER4145b, c, h							
201.0, 206.0, 224.0	ER2319a, h								

Table A.1 (Continued) Guide to the Choice of Filler Metal for General Purpose Welding										
Base Metal	5154 5254 ⁱ	5086	5083	5052 5652 ⁱ	5005 5050	3004 Alc. 3004	2219	2014 2036	1100 3003 Alc. 3003	1060 1070 1080 1350
1060, 1070, 1080, 1350 1100, 3003, AF 3003 2014, 2036 2219 3004, AF 3004 5005, 5050 5052, 5652! 5083 5086 5154, 5254!	ER5356c-d ER5356c-d ER4043 ER5356f ER5356f ER5356d ER5356d ER5356d ER5356d	ER5356 ^d	ER5356 ^d ER5356 ^d ER5356 ^d ER5356 ^d ER5356 ^d ER5356 ^d	ER4043b,d ER4043b,d ER4043b ER5356c,f ER5356c,d ER5654c,f,i	ER1100 ^{b, c} ER1100 ^{b, c} ER4145 ER4043 ^{a, b} ER5356 ^{c, f} ER5356 ^{c, f}	ER4043b.d ER4043b.d ER4145 ER4043a.b ER5356c.f	ER4145 ^{b, c} ER4145 ^{b, c} ER4145 ^e ER2319 ^a	ER4145 ER4145 ER4145°	ER1100 ^{b, c} ER1100 ^{b, c}	ER1188 ^{b. c. h.}

Note: ISO Classifications different from AWS Classifications have not been added to this table.

Tabella 12: Normativa per la scelta del filo d'apporto in funzione del metallo base

Il gas di protezione consigliato in questi casi è un gas Argon al 100% con velocità di efflusso di 18 l/min (pressione 18 psi) attivato 3 s prima dell'innesco dell'arco, [22] [14] [25].

Più precisamente per la scelta al gas inerte si può far riferimento alle normative DIN EN 1011-2 e UNE-EN ISO 15609-1, tuttavia un confronto tra vari articoli ci permette di verificare come il gas Argon sia decisamente il più utilizzato in questi casi.

Letteratura	Giunto	Gas	Efflusso
[29]	Testa	Argon	20 l/min
[10]	WAAM Fabbricazione	Argon	21 l/min
	additiva		
[14]	Di testa	Argon	15 lmin
[13]	Di testa	Argon	15 l/min
[30]	Di testa	Argon	18 l/min
[19]	Sovrapposizione (GMAW)	90%Ar + 10% CO ₂	20 l/min
[20]	Sovrapposizione	Argon	15 l/min
[27]	Sovrapposizione	Argon	15 l/min
[22]	Di testa	Argon	15 l/min
[31]	Di testa (TIG-CMT hybrid)	Argon	20 l/min
[23]	Sovrapposizione	Argon	15 l/min

^a ER4145 may be used for some applications.
^b ER4047 may be used for some applications.

ER4047 may be used for some applications.

ER4143 may be used for some applications.

ER5185, ER5356, or ER5556 may be used.

ER61818, ER5356, or ER5556 may be used.

ER61818, ER5356, or ER5556 may be used.

ER61819 may be used for some applications. It can supply high strength when the weldment is postweld solution heat-treated and aged.

ER61818, ER5556, ER5556, ER5556, ER5556, ER5556 may be used. In some cases, they provide: (1) improved color match after anodizing treatment, (2) highest weld ductility, and (3) higher weld strength.

ER5554 is suitable for sustained elevated temperature service.

ER4643 and ER4943 will provide higher strength than ER4043 in 1/2 in [12 mm] and thicker groove welds in 6XXX base alloys when postweld solution heat-treated and aged. They will also provide higher strength filler welds than ER4043 in the as welded, postweld aged, or postweld heat-treated and aged conditions.

Filler metal with the same analysis as the base metal is sometimes used. The following wrought filler metals possess the same chemical composition limits as cast filler alloys: ER4009 and R4000 as R-C355.0; ER4010 and R4010 as R-A3560; and R4011 as R-A3570.

Base metal alloys 5254 and 5652 are used for hydrogen peroxide service. ER5654 filler metal is used for welding both alloys for service temperatures below 150°F [66°C].

ER100 may be used for some applications.

Notes:

1. ER4047, ER4643, or ER4943 may be used in some applications when alloy ER4043 is specified.

2. Service conditions such as immersion in fresh or salt water, exposure to specific chemicals, or a sustained high temperature (over 150°F [66°C]) may limit the choice of filler metals. Filler metals ER5183, ER5356, and ER55356 are not recommended for sustained elevated temperature service.

3. Recommendations in this table apply to gas shielded are welding processes. For oxyline Jas welding, only ER1188, ER1100, ER4043, ER4047, and ER4145 filler metals are ordinarily used.

4. Where no filler metal is listed, the base metal combination is not recommended for welding.

[24]	Di testa	Argon	15 l/min
[25]	Di testa	Argon	15 l/min
[32]	Di testa	Argon	15 l/min
[26]	Di testa	Argon	12 l/min
[28]	Sovrapposizione	Argon	20 l/min

Tabella 13: Confronto su utilizzo del gas di protezione

I campioni devono essere spazzolati con una spazzola in acciaio inossidabile (o carta vetrata) applicando una leggera pressione per evitare la generazione di calore indesiderato sulla superficie metallica, e puliti con acetone per la rimozione di sporco, residui di olio, umidità e ossidi [28].

Per le piastre di supporto solitamente viene utilizzato acciaio a basso tenore di carbonio (possono essere attaccate a entrambe le estremità del campione utilizzando del nastro adesivo), mentre per lo staffaggio vengono utilizzati dei morsetti posti alle estremità delle lamine raffigurati in Figura 45, come fatto in [16].

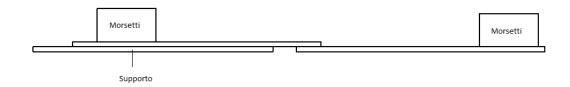


Figura 45: Bloccaggio lamine

I morsetti vanno rimossi immediatamente dopo la saldatura per consentire alla piastra di deformarsi liberamente [33].

Brevi considerazioni sul pendolamento

Gli aspetti riguardanti il pendolamento sono stati discussi nel capitolo precedente citando gli articoli più interessanti per avere un'idea precisa sui valori corretti che possono utilizzarsi.

Per quanto riguarda invece un aspetto generale che chiarisca la dipendenza del passo di oscillazione dal pendolamento si può far riferimento ad un valore di media della velocità usato in articoli scientifici di 88 cm/min, e un passo di 1 cm. Per percorrere tale lunghezza

occorreranno circa 0.68 secondi, con una frequenza di oscillazione di 1/0.68=1.47 Hz, dato molto vicino a quelli visti tramite ricerche bibliografiche.

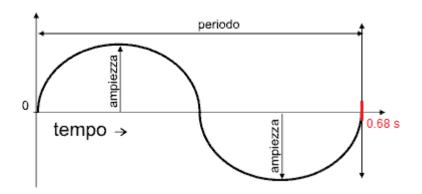


Figura 46: Singola oscillazione

Una configurazione che può essere adottata per realizzare la saldatura oscillante in lapjoint è illustrata in Figura 47.

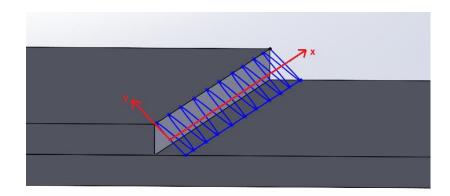


Figura 47: Movimento della torcia in Lap-joint

Il robot, in assenza del pendolamento (linea rossa), si muoverà dal punto A al punto B con velocità impostata.

Affinché il robot possa muoversi dal punto A al punto B con la stessa velocità di avanzamento di prima ma in presenza di pendolamento (percorso verde), la velocità del robot dovrà essere maggiore del caso precedente. Inoltre, quest'ultima sarà crescente all'aumentare dell'ampiezza d'oscillazione e al diminuire del passo.



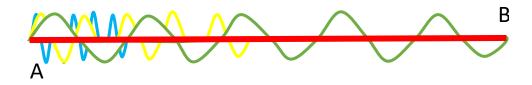


Figura 48: Oscillazioni più fitte al diminuire del passo

L'esempio mira a far comprendere senza far riferimenti precisi alla letteratura come una riduzione del passo del pendolamento dal percorso verde a quello azzurro provoca un aumento nel numero delle oscillazioni.

Un metodo che può essere utilizzato è una ispezione visiva post saldatura che permetta di individuare gli estremi del range di validità del giunto. Questo perché per ampi valori del passo (poche oscillazioni) l'effetto del pendolamento sarà ininfluente, per piccoli valori del passo (elevato numero di oscillazioni) per rispettare la velocità di avanzamento impostata il robot dovrà muoversi più rapidamente, inoltre, dovrà accelerare e decelerare più frequentemente e in spazi più stretti, il ché genererà vibrazioni della struttura tali da peggiorare la qualità del giunto. Andrebbe valutata, quindi, l'influenza della velocità di avanzamento e del numero di oscillazioni sulla qualità del giunto.

Questo si potrebbe fare saldando diversi provini con passo variabile a fissata velocità di avanzamento:

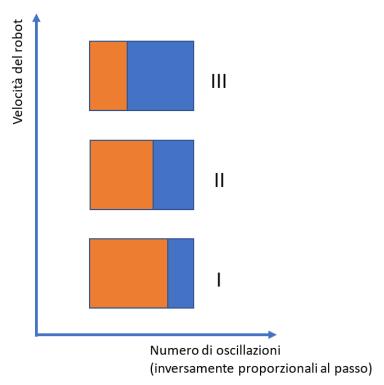


Figura 49: Probabile restrizione del range con l'aumentare della velocità del robot

L'intervallo di validità è individuato dal rettangolo arancione. Mantenendo costanti tutti i parametri, tranne la velocità del robot, ci si può espettare che tale intervallo di validità del giunto si riduca al crescere della velocità e si sposti nelle zone in cui il passo del pendolamento sia maggiore (minori oscillazioni).

Provini pre-saldatura

I provini per i test di trazione devono essere utilizzati dopo aver eseguito tutti i test non distruttivi, andando a selezionare quelli che hanno appunto superato tali test.

É importante ricavare i provini da zone specifiche evitando le aree che presentano imperfezioni come illustrato in Figura 50 che fa riferimento alla normativa EN ISO 15614-2.

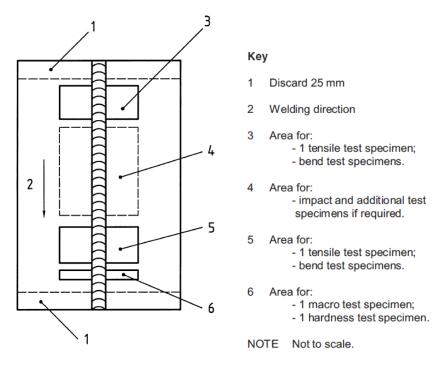


Figura 50: Zone delle lamine saldate

Per quanto riguarda la dimensione dei provini (nell'articolo [34] ricavati con elettroerosione a filo) si può far riferimento alla normativa DIN 50125 per le lastre di spessore compreso tra 0,1 e 3 mm, Figura 51.

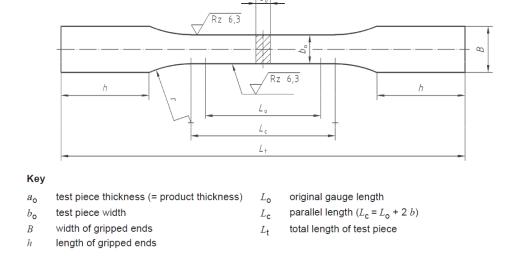


Figura 51: Dimensioni provini secondo normativa DIN 50125

I valori di riferimento sono riportati in Tabella 14.

b _о ± 1	L_{o}	В	r	<i>h</i> min.	L_{c}	L _t min.
12,5	50	20	20	35	75	165
20	80	30	20	50	120	250

Tabella 14: I valori secondo normativa

I provini di trazione devono essere contrassegnati in modo tale che, dopo la prova, sia ancora possibile determinare da quale campione sono stati presi i provini, nonché la loro posizione e direzione nel campione, se necessario. La marcatura deve essere applicata sulla faccia o sul lato di un'estremità o su entrambe le estremità, se necessario.

Parametri di saldatura

Essendoci un collegamento diretto tra corrente, tensione, velocità di saldatura e velocità di avanzamento del filo sono da prendere in considerazione dei valori "bassi" dei valori "medi" e dei valori "alti" di questi 4 parametri. Tali valori possono essere estratti tramite applicazione Weld Connect di Fronius.

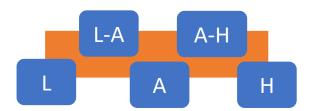


Figura 52: I livelli

PARAMETRI	BASSO	MEDIO	ALTO	DEFAULT
Corrente (I)	18 A	86 A	190 A	35 A
Tensione (V)	10.8 V	13 V	16 V	11 V
Velocità (S)	15 cm/min	75 cm/min	139 cm/min	30 cm/min
Velocità filo (WFS)	1.2 m/min	6.2 m/min	11.5 m/min	2.5 m/min
Apporto di calore	0.6 kJ/cm	0.7 kJ/cm	1 kJ/cm	0.6 kJ/cm
(Q)				

Tabella 15: Parametri e valori

I parametri utilizzati in letteratura invece sono rappresentati dalla tabella sottostante:

Letter atura	Saldatura	Giunto	Lega Allum inio	Dissimili	Corre nte [A]	Tensio ne [V]	Velocità di avanzame nto	Velocit à estrazi one filo	Apport o di calore [J/mm]
[10]	WAAM	-	-	-	165	21.3	8 mm/s	7.5 m/mi n	-
[11]	CMT	Sovrapp osizione	1	lamier a di acciaio lamina ta a caldo	170	15	10 mm/s	Non citata	400
[17]	CMT	Sovrapp osizione	AA1 050	-	107	17.5	Non citata	Non citata	75
[30]	CMT	Nessun giunto	AA6 061	-	60- 70	12-14	8-10 mm/s	5 mm/ min	56- 100
[18]	CMT	Di testa	•	Allumi nio 5083- H111 e 6082- T651	194	19.5	0.4 m/min	11 m/mi n	-
[19]	GMAW	Sovrapp osizione (GMAW	-	Acciaio GA 590 FB	237	22.7	80 cm/min	7 m/mi n	-
[20]	CMT	Sovrapp osizione	-	AA606 1-T6 + Acciaio al Boro zincato	50	9.4	6 mm/s	3 m/mi n	-
[27]	CMT	Sovrapp osizione	1	Titanio TA2 e Rame T2	112- 170	11-16	6 mm/s	5-7.5 m/mi n	-
[21]	CMT	Di testa	AA7 075		120- 180	15-20	600 mm/min	6-8 m/mi n	-
[22]	CMT	Di testa	AA7 075 tb6		93	15	15 mm/s	5.5 m/mi n	84.2
[23]	CMT	Sovrapp osizione	-	AA606 1 e acciaio zincato	70	12.7	350 mm/min	3.9 m/mi n	-

[24]	CMT	Di testa	-	AA606	72	11.5	5.5	5.1	120.4
				1-T6 e			mm/s	m/mi	
				AA608				n	
				2-T6					
[25]	CMT	Di testa	-	AA518	70-	15	10-20	4-6	70-90
				2-0 e	100		mm/s	m/mi	
				6082-				n	
				T4					
[32]	CMT	Di testa	AA7	-	120	15.2	900	1100	-
			5075				mm/min	mm/	
			-T6					min	
[26]	CMT	Di testa		EN AW	80-	9.5-	50/70	5-9	-
				6082 e	110	12.5	cm/min	cm/mi	
				EN AW				n	
				2017A					
[34]	CMT	Di testa	AA7	-	90	12.5	275	-	-
			075				mm/min		
[28]	CMT	Lap	-	Allumi	55-	7.6-	2.5-4.3	70	-
		joint		nio	75	8.4	m/min	cm/mi	
				Noveli				n	
				st AC					
				170 PX					
				е					
				acciaio					
				zincato					
				ST06 Z					

Tabella 16: Parametri e valori riassunti da ricerche in letteratura

Dall'esito di questo confronto i seguenti valori sarebbero i più coerenti con l'attività che si andrebbe a svolgere:

PARAMETRI	MEDIO-ALTO	MEDIO-BASSO
Corrente (I)	170 A	70 A
Tensione (V)	15.8 V	12.2 V
Velocità (S)	125 cm/min	64 cm/min
Velocità filo (WFS)	10.3 m/min	5.3 m/min
Apporto di calore (Q)	1 kJ/cm	0.6 kJ/cm

Tabella 17: Valori per i due range

L'apporto di calore può essere calcolato tramite la seguente formula:

$$Q = \eta * \frac{V * I * 60}{S * 1000} \left[\frac{kJ}{mm} \right]$$

L'efficienza η è nota come velocità di trasferimento del calore al pezzo da lavorare ed è data 0,90 per la saldatura MIG/MAG [17].

È ovvio che maggiore è l'apporto di calore per unità di lunghezza, maggiore è la diluizione. Quest'ultima si riduce all'aumentare della velocità di saldatura (si desidera una diluizione inferiore che aumenterà la durezza della saldatura) [30].

Un basso apporto di calore permette una velocità di solidificazione più rapida ed evita che eventuali pori si allarghino. Velocità di saldatura inferiori forniscono un maggiore apporto di calore per area che porta a una zona di fusione più ampia. Come risultato della minore velocità di solidificazione, diminuisce la distribuzione della porosità.

Quando la velocità di avanzamento del filo è molto bassa invece la saldatura potrebbe apparire peggiore a causa del basso apporto di calore.

Per quanto riguarda gli angoli occorre distinguere il Travel angle, ovvero l'angolo di inclinazione della torcia nel piano che passa per la direzione di saldatura, dal Push angle ovvero l'angolo nel piano perpendicolare al precedente. Le Figura 53 e Figura 54 illustrano meglio quanto detto.

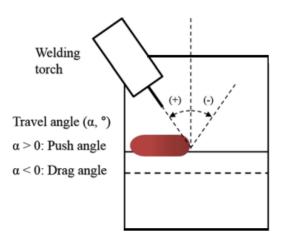


Figura 53: Travel angle e Push angle

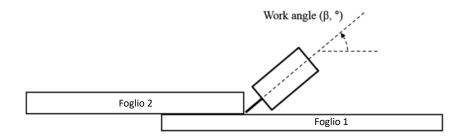


Figura 54: Work angle

Maggiore è il work angle e maggiormente la torcia si avvicinerà al foglio 2. É utile anche introdurre differenti zone delle lastre, Figura 55:

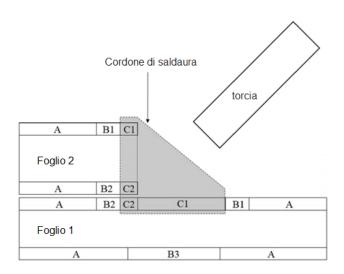


Figura 55: Differenziazione zone

Per se seguenti considerazioni i riferimenti sono stati [14] e [11].

Le regioni B1, B2, C1 e C2 sono impegnati nella formazione della porosità della saldatura; la regione B2, che si trova sulle superfici di accoppiamento tra i fogli superiore e inferiore, è la regione più critica per la formazione delle porosità della saldatura. I vapori formati in C1 e C2 sono facilmente vaporizzati e rilasciati dal bagno di saldatura perché queste regioni sono a diretto contatto con l'arco e fondono. D'altra parte, la regione B2 non è né a diretto contatto con l'arco né si scioglie, per cui a causa dell'apporto di calore si formano i vapori ad alta pressione si forma nella configurazione a sovrapposizione con zero gap.

Per valutare l'ampiezza di tali angoli dalle suddette ricerche in letteratura è emerso che:

 con un Push angle di +35° la forma del cordone di saldatura potrebbe mostrare un profilo più ampio e liscio con una buona bagnabilità sul bordo del cordone. La Leg lenght e il Toe angle aumentano e la penetrazione e la larghezza del rinforzo saldato diminuiscono. La porosità della saldatura può stata osservata nella macrosezione della saldatura con un angolo di corsa di - 35°. Quindi con un angolo di corsa di + 35° l'arco, l'apporto di calore e la forza dell'arco sono concentrati sia sul metallo di base che davanti al bagno di saldatura. Al contrario, con un angolo di corsa di - 35° l'arco, l'apporto di calore e la forza dell'arco sono concentrati solo sul bagno di saldatura. D'altra parte, sotto un angolo di corsa di - 35°, la quantità di vaporizzazione (nella regione B2) diminuisce e così anche la larghezza del bagno di fusione (regioni C1 e C2). Il piccolo rapporto dell'area di porosità al basso angolo di corsa (Travel angle) è spiegato dalla piccola area vaporizzata nella regione B2 poiché l'arco e l'apporto di calore sono concentrati solo sul bagno di saldatura. Il comunque piccolo ma maggiore al precedente rapporto dell'area di porosità per l'angolo di corsa elevato (Travel angle) è dovuto alla forza dell'arco concentrata e all'apporto di calore nella regione B2, e la piccola altezza del bagno di saldatura nella regione B2 promuove anche l'emissione di vapori di zinco.

La seguente tabella riassume i Drag angle utilizzati in letteratura:

Letteratura	Giunto	Lega	Dissimili	Travel angle		Work
		d'alluminio		Push	Drag	Angle
[25]	Di testa	-	AA5182-O e 6082-	-	10°	0°
			T4			
[14]	Di testa	AA5052	-	ı	10°	0°
[11]	Sovrapposizione	-	lamiera di acciaio	-	35°	40°
			laminata a caldo			
[35]	Sovrapposizione	-	AA6061 e Acciaio	-	20°	20°
			inossidabile			
[28]	Sovrapposizione	-	Alluminio Novelist	-	45°	0°
			AC 170 PX e			
			acciaio zincato			
			ST06 Z			

Tabella 18: Drag e Work angle utilizzati in letteratura

Dall'esito del confronto emerge che un drag angle di 20° è un buon valore da utilizzare nelle prove.

 ad un basso Work angle (40°) la forma del cordone di saldatura mostra un più ampio e liscio profilo con buona bagnabilità ai bordi, e come visto in letteratura, il rapporto dell'area di porosità è inferiore a quello ad un alto angolo di lavoro (70°). Porosità di saldatura sono state osservate nelle macrosezioni ad angoli di lavoro sia alti che bassi.

Quando l'angolo di lavoro è di 70° l'arco, l'apporto di calore e la forza dell'arco sono più concentrati sul foglio 2 rispetto a quando viene utilizzato un angolo di lavoro basso (40°). Pertanto, l'area totale delle regioni C2 e B2 aumenta (con 70°) e la quantità di vaporizzazione dello zinco nelle regioni C2 e B2 aumenta eccessivamente.

Con un angolo di lavoro elevato (70°) è stata osservata una maggiore emissione di vapori e schizzi rispetto a quella con un angolo di lavoro basso, per cui un basso angolo è preferibile per avere minori porosità.

In conclusione è preferibile un Work angle minore di 45°.

• In una posizione di puntamento della torcia di + 2 mm la forma del cordone di saldatura mostra un profilo più ampio e liscio con una buona bagnabilità sul bordo. Il movimento della posizione di puntamento della torcia in direzione negativa fa aumentare l'area totale delle regioni C2 e B2, che sono criticamente impegnate nella formazione della porosità della saldatura. In una posizione di puntamento della torcia bassa (-2 mm) l'arco, l'apporto di calore e la forza dell'arco erano concentrati sul foglio 2 così che le quantità di vaporizzazione nelle regioni C2 e B2 aumentano eccessivamente. La posizione di puntamento di +2 mm permette di ottenere minori porosità. Il problema che si verifica è che con un Work angle stabilito a 45°, se la torcia è posizionata lungo la bisettrice dell'angolo formato dalle due lamine in lap-joint, la posizione di puntamento inevitabilmente ricade sulla lamina superiore (tra 0 e -2) che non è la migliore. In questo caso occorrerà un compromesso tra migliore angolo e migliore posizione di puntamento.

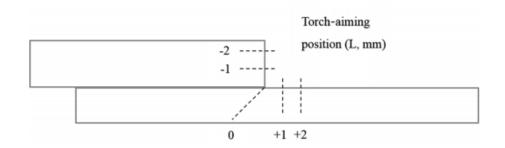


Figura 56: Rappresentazione posizione puntamento torcia

Altro parametro importante da valutare è la distanza del filo dal vertice del giunto di sovrapposizione, Figura 57.

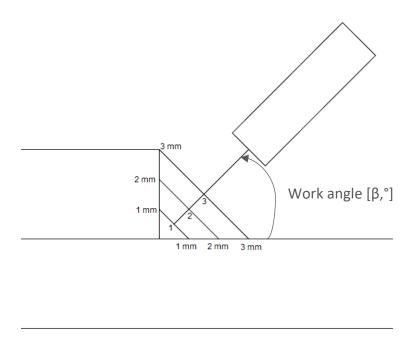


Figura 57: Distanza del filo dal vertice

L'influenza della posizione della torcia (1,2 o 3) sulla resistenza e qualità del giunto è un aspetto da tenere in considerazione. Poiché l'estremità del filo dovrà necessariamente trovarsi sulla bisettrice dell'angolo formato dai due fogli per garantire una oscillazione simmetrica, il Work angle determinerà a sua volta la posizione di puntamento, ovvero l'intersezione tra il lato di uno dei fogli e l'asse del filo.

Discusso tutti i precedenti aspetti, un metodo di studio successivo potrebbe essere quello di stabilire tutti i fattori più importanti, raggruppando insieme i fattori che sono dipendenti tra loro (ad esempio corrente, tensione e velocità). Nel nostro caso, dopo aver effettuato delle prime saldature per stabilire la giusta velocità di oscillazione in relazione all'ampiezza (che ci permettono di conoscere la frequenza), si potrà procedere stabilendo tali fattori da far variare:

- Corrente, tensione, velocità filo, velocità torcia
- Travel angle
- Work angle
- Passo
- Distanza punta dal vertice che definisce l'ampiezza di oscillazione

Dopodichè si procede con l'identificazione dei livelli di variazione dei fattori. Nelle pagine precedenti sono stati definiti due livelli (medio-basso e medio-alto) di corrente, tensione e velocità.

Fatto questo il numero di prove da realizzare si ottiene tramite:

$$n.prove = livelli^{fattori}$$

Per cui considerando i 2 livelli medio-alto e medio-basso sui 5 fattori elencati di arriverebbe a dover realizzare 32 prove utili per valutare l'influenza della variazione dei parametri sulla qualità del giunto. Occorre considerare che il numero di livelli e fattori che si deciderà di adottare deve tener conto del numero di prove da realizzare che non può essere troppo elevato.

Analisi metallografica

Dopo avere eseguito la saldatura ai vari parametri stabiliti, occorre identificare le ispezioni da eseguire prima di effettuare test distruttivi mediante Microscopio elettronico a scansione SEM (a luce polarizzata e non), spettroscopia EDX (o EDS), microscopio ottico LOM e analizzatori XRD previa molatura, lucidatura e pulizia con acetone.

Un primo controllo importante è sulle dimensioni e forma del cordone quali:

- larghezza del cordone e della zona termicamente alterata (che aumentano all'aumentare della velocità di avanzamento del filo e all'aumentare della corrente)
- aspetto del cordone liscio o con increspature (le increspature consistenti, strette e uniformi indicano una saldatura forte, priva di contaminazioni o crepe)
- angolo di bagnatura (diminuisce all'aumentare della velocità di avanzamento del filo)
- lunghezza della linea di unione
- dimensione della gola della saldatura (Con l'aumento di S, le profondità di saldatura diminuiscono a causa di apporti di calore inferiori; con l'aumento della corrente invece ci si aspetta una profondità di penetrazione maggiore).
- Altezza del rinforzo (diminuisce con l'aumento della corrente a causa della maggiore area di espansione e della forza di penetrazione del bagno di metallo fuso, che viene anche leggermente diminuita con l'aumento delle velocità di saldatura).
- la levigatezza della superficie del cordone
- la quantità degli schizzi (che aumentano con la corrente).

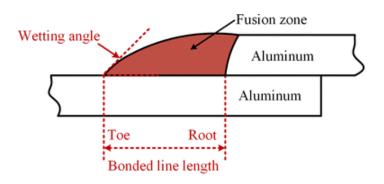


Figura 58: Angolo di bagnatura

Da questa figura è possibile notare come all'aumentare dell'angolo di bagnatura la linea di unione diventa sempre più piccola, questo porterà a una diminuzione della resistenza alla trazione. Tramite [11] si è visto come di norma l'angolo di bagnatura diminuisce con l'aumento della corrente di saldatura, mentre la lunghezza della linea incollata del giunto

aumenta con l'aumento della corrente di saldatura. Questo fenomeno si verifica perché la fluidità del filo d'apporto migliora all'aumentare dell'apporto di calore.

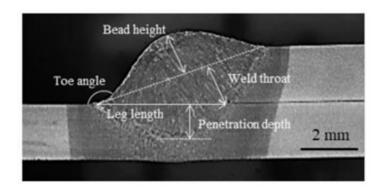


Figura 59: Dimensioni utili del cordone considerate in [19]

L'irregolarità del cordone è stata valutata in [10] tramite un confronto con rapporto tra l'area del rettangolo con la somma della porzione non riempita e della porzione in eccesso nell'immagine di esempio seguente:

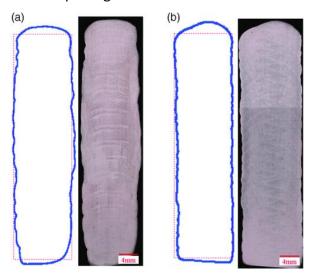


Figura 60: Rappresentazione delle irregolarità superficiali

Le indagini macrostrutturali andrebbero eseguite tramite un microscopio per osservare la porosità del metallo di saldatura e le zone interessate dal calore.

La porosità delle saldature può essere ottenuta misurando l'area dei pori tramite analisi radiografica e sostituendo i parametri della forma del cordone di saldatura nell'equazione:

Porosity (%) = (Area of pores
$$(mm^2)/L \times W (mm^2) \times 100\%$$

Infine, i campioni di fatica possono essere classificati tramite l'ispezione visiva delle saldature e l'analisi radiografica RX in tre tipi, in cui Il tipo I si riferisce alle saldature che non hanno pori

(la resistenza alla trazione non viene ridotta fino a quando il livello di porosità non aumenta oltre l'1%).

Prima di fare ciò i campioni tagliati e stampati è corretto che vengano lucidati e incisi con il reagente di Keller per 20 s (o in alternativa reagente Barker [5 ml di HBF₄ (48%) in 200 ml di acqua, oppure reagente HF ovvero acido fluoridrico al 2%) secondo la pratica metallografica standard ASTM E3-11.

Le aree del metallo possono essere distinte in: metallo base (BM), zona termicamente alterata (ZTA), zona parzialmente (ZPF) fusa e zona saldata (WM),

I precipitati dispersi piccoli e finemente uniformi nel metallo di base possono essere osservati tramite EDS a seguito di un trattamento come ad esempio l'invecchiamento.

Le indagini macrostrutturali potranno allora rivelare la formazione di pori nel metallo saldato. Secondo i risultati di [17], i motivi della porosità nel metallo di saldatura delle leghe di alluminio sono l'intrappolamento del gas di protezione nel bagno fuso e l'idrogeno, che ha un'elevata solubilità nell'alluminio fuso ma una solubilità molto bassa nel solido. La porosità nella saldatura dell'alluminio proviene dai gas intrappolati all'interno del bagno di saldatura. I contaminanti nel gas di protezione, nell'aria e nell'acqua, nonché i contaminanti nei metalli di base o di riempimento, possono essere l'origine di questi gas.

La velocità di raffreddamento della saldatura influisce sostanzialmente sul volume di porosità trattenuto in una saldatura contaminata da gas. A velocità di raffreddamento elevate, il livello di porosità dovrebbe risultare basso poiché la nucleazione e la crescita delle bolle nel liquido sono gravemente soppresse. Allo stesso modo, a velocità di raffreddamento molto basse, la porosità dovrebbe essere minima perché le bolle hanno tutto il tempo per fondersi, galleggiare e fuoriuscire dal bagno di saldatura. A velocità di raffreddamento intermedie, si osserva il massimo volume di porosità in una saldatura poiché le condizioni sono ottimali sia per la formazione che per l'intrappolamento di praticamente tutti i gas sviluppati nella saldatura.

L'apporto di calore inoltre potrebbe influenzare il posizionamento dei pori nella sezione del cordone, per cui per apporti di calore più elevati i pori potrebbero manifestarsi vicino la superficie del cordone, e al contrario, nella zona centrale con un apporto di calore minimo.

È facile rimuovere i pori quando il rinforzo della saldatura viene pulito.

La zona di saldatura dei campioni dovrà essere osservata per valutarne la dimensione dei grani (grani equiassiali probabilmente al centro della saldatura se ad una velocità di raffreddamento maggiore, mentre a bassa velocità di raffreddamento i grani hanno abbastanza tempo per crescere, con conseguente fragilità). La ricristallizzazione nella ZTA porta solitamente alla crescita del grano mentre il metallo di base avrà una struttura a grana fine.

Il bordo della saldatura inoltre può avere più dendriti colonnari rispetto ai dendriti che si trovano al centro della saldatura.

Le analisi sul giunto saldato possono essere effettuate nelle tre zone riportate in Figura sotto:

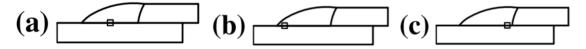


Figura 61: Posizioni in cui effettuare analisi del giunto

Il giunto saldato è formato dal metallo d'apporto e da una zona di interfaccia con il metallo base (IMC) composta da una lega o da un composto intermetallico formato tra il metallo base e quello d'apporto (lega di transizione). Lo spessore di questo, come visto in [16], cambia al variare della velocità di avanzamento del filo. La variazione di spessore

improvvisa dello strato IMC porta alla creazione di tipi fragili di strati IMC e di conseguenza la resistenza alla trazione del giunto ne risentirà. L'analisi EDX permette di rilevare le differenti fasi nello strato di IMC.

Con l'aumento della corrente di saldatura, gli IMC aghiformi si allungano e si diffondono ulteriormente nella saldatura, il che ridurrà la resistenza al taglio a trazione del giunto.

Un altro difetto che può essere rilevato nei provini saldati con metallo d'apporto è la mancanza di fusione (LOF) riportata in [16]. Ciò è dovuto all'angolo dell'ugello di saldatura e alla zona LOF fuori dal flusso diretto del metallo fuso mostrato in Figura 62.

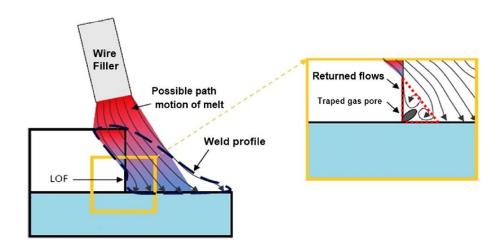


Figura 62: Rappresentazione del fenomeno della mancanza di fusione

Sempre secondo l'articolo [11] diminuendo lo spessore del foglio di alluminio, si riduce la possibilità di formazione di questo difetto. Tuttavia, questo problema si manifesta maggiormente quando il GAP tra le due lamine è consistente, cosa che nel nostro caso non è rilevante.

Microdurezza

Il test di durezza Vickers va applicato secondo ASTM: E-384-11 con un carico di 200g con un tempo di permanenza di 10 s, [18].

La linea rossa nella Figura 63 indica la posizione in cui è utile misurare la microdurezza del campione di saldatura secondo [19].

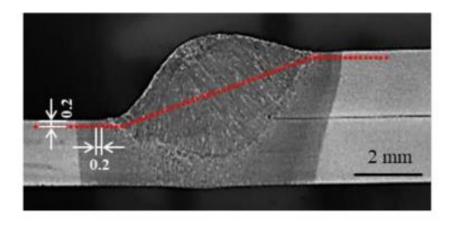


Figura 63: Linea che identifica i punti su cui ricavare i valori di microdurezza

Spesso si incontra una perdita di resistenza nella zona termicamente alterata (ZTA) delle saldature a causa della crescita del grano durante la saldatura; la massima durezza del metallo di saldatura solitamente è attribuita al provino con minore apporto di calore. In altri casi la durezza minore si può riscontrare nella zona saldata. I fattori principali sono gli elementi leganti in soluzione solida, la frazione volumetrica, morfologia e dimensione del precipitato e granulometria. Durante la saldatura, gli elementi nel metallo saldato sono una combinazione del metallo d'apporto e della diluizione dal materiale di base. L'aumento degli elementi leganti e dei precipitati fa aumentare proporzionalmente la durezza, gli elementi di rinforzo Zn e Mg però diminuiscono drasticamente nel WM perché questi elementi sono inclini all'evaporazione durante la saldatura. Se però nonostante il grande apporto di calore che porta alla crescita di cristalli a grana grossa, a causa della maggiore velocità di raffreddamento, c'è un grande gradiente di temperatura, il grano si cristallizza quando non è ancora troppo grande e forma un piccolo cristallo granulare. Una perdita di durezza di solito si verifica nella regione di saldatura delle leghe di Alluminio indurite per invecchiamento e saldate per fusione. Quando questa lega è esposta al calore dopo l'invecchiamento, come la saldatura, la dissoluzione dei precipitati, l'evoluzione di una struttura dendritica e l'ingrossamento dei precipitati di rinforzo avvengono nella Fusion zone e ZTA, con conseguente perdita di durezza in entrambe le regioni.

A causa del maggiore apporto di calore richiesto per il metallo d'apporto ER5356, si può anche concludere che questi giunti subiscono una velocità di raffreddamento più lenta

rispetto ad altri giunti con metallo d'apporto ad esempio ER4043, e quindi hanno una microstruttura della zona saldata a grana più grossa.

Secondo [24] lo sviluppo di composti intermetallici (IMC) come Mg₂Si, che è fragile in natura, nella zona di fusione, stimola una crescita della microdurezza specificamente nelle leghe di alluminio.

Inoltre può essere stabilita una relazione tra microdurezza e microstruttura per comprendere meglio l'effetto della microdurezza attribuibile alla dimensione del grano. Quindi, la durezza delle varie zone e la corrispondente granulometria dei giunti acquisita dalle sperimentazioni potranno essere messe in relazione. Solitamente l'andamento sarà quello di Figura 64, ricercato in [34].

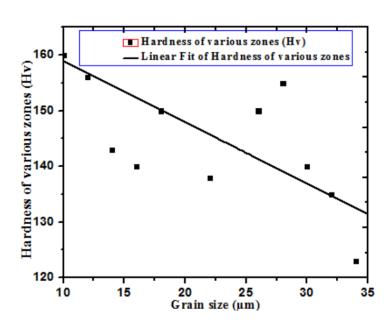


Figura 64: Durezza in funzione della dimensione del grano

Utilizzando una linea retta, sono stati adattati i punti dati sperimentali che erano governati dalla corrispondente equazione di regressione.

la pendenza è negativa, il che indica che se la dimensione del grano aumenta, la durezza della zona completamente deformata diminuisce.

Prova di trazione

La prova di trazione è consigliabile eseguirla a temperatura ambiente utilizzando una macchina di prova ad una velocità di 1 mm/min al 60% di umidità secondo la norma ASTM E8 – 04 e secondo quanto fatto da [21].

Per realizzare i provini di trazione invece si può utilizzare la normativa EN ISO 4136 prevista per i giunti saldati, oppure la normativa DIN 50125 già vista precedentemente e prevista per provini metallici generici non saldati ma che è comunque stata utilizzata anche in [22] per giunti saldati.

Letteratura	Giunto -Processo	Lega d'alluminio	Dissimili	Normativa
[34]	Di testa - CMT	AA7075	-	DIN 50125
[25]	Di testa - CMT	-	AA5182-O e	DIN 50125
			6082-T4	
[17]	Sovrapposizione	AA1050	-	ISO 4136
	- CMT			
[18]	Di testa - CMT	-	Alluminio 5083-	ISO 4136
			H111 e 6082-	
			T651	
[27]	Sovrapposizione	-	Titanio TA2 e	ISO 4136
	- CMT		Rame T2	
[36]	Di testa - CMT	AW 7075	-	ISO 4136

Tabella 19: Normative utilizzate nei vari articoli

Dimensioni da norma EN ISO 4136

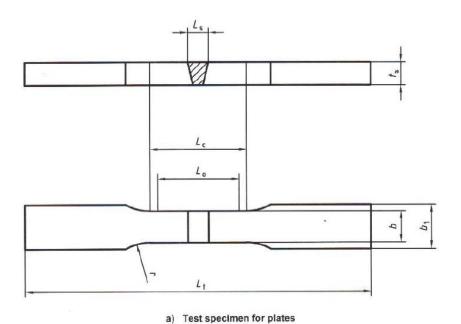


Figura 65: Dimensioni provino secondo EN ISO 4136

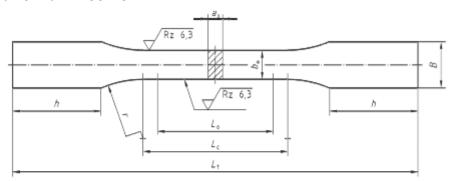
Dimensions in millimetres

Denomination	1	Symbol	Dimensions to suit particular testing machine		
Total length of the test specime	en	L_{t}			
Width of shoulder		<i>b</i> ₁	b + 12		
		ь	12 for $t_{\rm S} \leqslant 2$		
	plates		25 for $t_{\rm S} > 2$		
Width of the parallel length	pipes	Ь	6 for <i>D</i> ≤ 50		
			12 for 50 < D ≤ 168,3		
			25 for D > 168,3		
Parallel length ^{a b}		L_{c}	≥ L _s + 60		
Radius at shoulder		r	≥ 25		

^a For pressure welding and beam welding (process groups 2, 4, 51 and 52 in accordance with ISO 4063:1998), $L_{\rm S}=0$.

Tabella 20: Valori dati da normativa

Dimensioni da norma DIN 50125



Key

- a₀ test piece thickness (= product thickness)
- L₀ original gauge length

bo test piece width

- L_c parallel length ($L_c = L_0 + 2 b$)
- B width of gripped ends
 h length of gripped ends
- L_t total length of test piece

Figura 66: Dimensioni provino secondo normativa DIN 50125

∂ ₀ ± 1	L ₀	В	r	<i>h</i> min.	L _c	<i>L</i> _t min.
12,5	50	20	20	35	75	165
20	80	30	20	50	120	250

Tabella 21: Valori secondo normativa

I risultati del test rivelano se l'area saldata è la regione più debole quando tirata in condizioni di carico.

For some other metallic materials (e.g. aluminium, copper and their alloys) $L_{\rm c} \geqslant L_{\rm S}$ + 100 may be necessary.

È importante eseguire più prove (di solito almeno 3) per ogni parametro di saldatura variato (ad esempio in base alla variazione della classe di porosità) in modo tale da osservare la ripetibilità dei risultati ottenuti e calcolare i valori medi di resistenza, tenendo conto che la presenza di un'elevata maggiore fluttuazione nella resistenza al taglio a trazione nei provini saldati porta al cambiamento della posizione di frattura dei giunti.

La Figura 67 illustra lo schema dei percorsi di propagazione delle cricche e della frattura finale nei provini di brasatura con saldatura MIG sotto carico di trazione, fonte [16] .

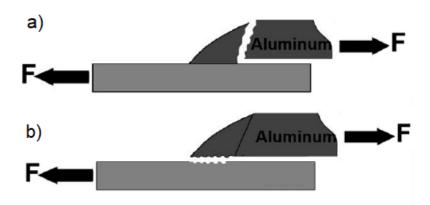


Figura 67: Modalità propagazione cricche

Come si è visto, la fessura può iniziare dall'interfaccia delle lamiere superiore (AI) e inferiore e poi proseguire nella zona di fusione nella ZTA dell'alluminio in Figura 67 a. In alternativa la frattura si verifica nello strato IMC nella parte inferiore del giunto, Figura 67 b.

La modalità di rottura è una funzione della velocità di alimentazione del filo. In particolare, quando la velocità di avanzamento del filo è adeguata, a causa del miglioramento della bagnabilità del filo di apporto e della minimizzazione dello spessore dello strato IMC, la frattura finale si verifica solitamente nella ZTA dell'alluminio (parte superiore).

Per valutare l'influenza della velocità di alimentazione del filo sulla tipologia di frattura si è letto [23], per cui con una velocità di alimentazione del filo ridotta, il diagramma schematico della frattura da trazione può risultare quello in Figura 68.

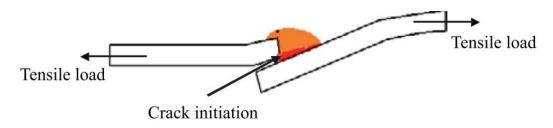


Figura 68: Possibile scenario di frattura con velocità di alimentazione filo ridotta

Con una grande velocità di avanzamento del filo le crepe potranno apparire principalmente nella zona termicamente alterata della lega di alluminio.



Figura 69: Possibile scenario di frattura con velocità di alimentazione filo elevata

Si verificherà in seguito se la resistenza alla trazione del materiale di base in fogli di alluminio è riscontrata maggiore di quella delle strutture saldate tramite il tracciamento di curve sforzo-deformazione, e tramite i rilevamenti dei valori di carico di snervamento, rottura e allungamento percentuale.

L'apporto di calore deve essere ridotto al minimo per fornire un raffreddamento rapido e una maggiore resistenza della saldatura.

Un maggiore apporto di calore produce una regione di addolcimento (softening) più ampia, una forte diminuzione degli elementi di rinforzo e delle particelle precipitate.

Difatti mentre CMT utilizza un input di calore inferiore o vicino a 0,1 kJ/mm, altri processi

MIG convenzionali o gas inerte di tungsteno (TIG) utilizzano 1-4 kJ/mm, [22].

Di conseguenza, la perdita di elementi di lega e/o precipitati è chiaramente ridotta in caso di utilizzo del processo CMT. Pertanto, i risultati ottenuti utilizzando il processo CMT sono molto migliori dei risultati comparabili utilizzando la saldatura MIG o TIG per la stessa lega.

Le prestazioni dei giunti saldati vanno calcolate come una certa percentuale della resistenza massima media dei metalli di base. Una maggiore efficienza del giunto si traduce nella migliore qualità di saldatura.

Resistenza alla trazione (%) = (Resistenza alla trazione del giunto saldato / Resistenza alla trazione della piastra di base) x 100

Per ulteriori analisi della microstruttura, la superficie fratturata dei campioni di prova di fatica deve essere esaminata mediante SEM.

In [25] il cedimento del provino in caso di prova di trazione si può osservare nella regione di saldatura che era ricca di alluminio e contenuto di ossigeno. Quindi dal report EDS e dal report elementare di EDAX, si può concludere principalmente che gli ossidi formati durante la saldatura causano l'indebolimento dell'area di saldatura.

L'elevata quantità di contenuto di Silicio e Magnesio presente in corrispondenza della linea di saldatura e di fusione tende a formare un composto intermetallico fragile (Mg₂Si). Di conseguenza, può verificarsi la frattura del giunto.

L'articolo [24] utilizza PULSTEC micro-X360n Full 2D basato sulla tecnica di diffrazione dei raggi X ad alta risoluzione per calcolare le tensioni residue con il metodo $\cos\alpha$.

Poiché esistono molte tecniche non distruttive per determinare lo stress residuo, la diffrazione dei raggi X è adatta per le lastre sottili poiché la sua penetrazione è di circa 10 μ m con un intervallo da 10 μ m a 1 mm di risoluzione spaziale. Lo stress residuo è lo stress che viene sopportato all'interno di un materiale in mancanza di forze esterne o gradienti termici dopo la produzione e la lavorazione del materiale.

Solitamente la sollecitazione residua di compressione è massima sul cordone rispetto alla FZ (zona di fusione) e BM (metallo base) a causa della maggiore velocità di raffreddamento, ma in linea generale il CMT mostra uno stress residuo minore rispetto agli altri processi di saldatura (MIG pulse synergic e MIG manual).

La presenza di pori dilatati influenza la modalità di rottura determinando il percorso di crescita delle crepe. La fessura si propaga saltando da un poro all'altro all'interno della FZ, rendendo così fragile il cedimento.

Capitolo 6

I trattamenti termici

Di solito, la microstruttura e le proprietà meccaniche di una lega di alluminio cambieranno dopo la saldatura a causa della fusione del materiale di base durante il processo di saldatura. Ciò contribuisce alla sua mancanza di resistenza. Per ovviare a questo problema, viene eseguito un trattamento termico sulla parte saldata per ottenere le proprietà meccaniche desiderate e per alleviare le tensioni residue sulla parte. Le proprietà di varie leghe di alluminio possono essere alterate da trattamenti termici appositamente progettati. I trattamenti termici per le leghe di alluminio 6xxx sono generalmente eseguiti mediante trattamenti termici in soluzione, seguiti da tempra in acqua e invecchiamento a una certa temperatura o da invecchiamento naturale in aria. Numerosi lavori di ricerca hanno studiato l'applicazione del trattamento termico postsaldatura (PWHT) ai giunti di saldatura utilizzando diversi processi di saldatura. Ad esempio, uno studio, sull'effetto del trattamento termico pre/post T6 sulle proprietà meccaniche della lega di alluminio fuso A356 semisolida saldata al laser, ha dimostrato che un trattamento termico post-T6 aumenta la resistenza alla trazione e la durezza, rispetto a giunti di trattamento termico e pre-saldatura T6. Dalla revisione della letteratura, si comprende che fino ad oggi sono state pubblicate pochissime ricerche sulla saldatura utilizzando il metodo GMAW CMT e che non sono state riportate ricerche sull'effetto di un PWHT sui giunti AA6061 saldati con il metodo GMAW CMT. Un'indagine è stata eseguita su una lega di alluminio 6061 con uno spessore di 10 mm. In particolare l'articolo [37] usa questo materiale tagliato in più pezzi con larghezze di 100 mm secondo la lunghezza standard di ASTM E8M 04 [23], il tipo di riempitivo utilizzato per il processo di saldatura era ER 4043 con un diametro di 1,2 mm. I PWHT utilizzati erano il trattamento termico in soluzione, la tempra in acqua e l'invecchiamento artificiale. I campioni sono stati solubilizzati nel forno ad induzione a 530 °C per 1 ora. I campioni sono stati quindi raffreddati rapidamente mediante immersione in bagnomaria, poi induriti per invecchiamento a una temperatura di 160 °C per 20 ore. La prova di trazione è stata eseguita a 100 kN e una velocità di 1 mm/min utilizzando una macchina di prova universale e si è ottenuto un incremento del 3,8% di resistenza a trazione media quando si implementa il PWHT sui giunti saldati.

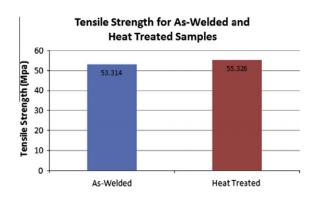


Figura 70: Resistenza a trazione con e senza trattamento termico

È stato eseguito un test di microdurezza Vickers in tre diverse posizioni: nelle sezioni superiore, centrale e inferiore della regione di saldatura superficiale, con un carico di 0,2 kg.

Implementando il PWHT per AA6061 saldato, il valore di durezza medio è stato aumentato del 25,6% rispetto al campione saldato senza trattamenti.

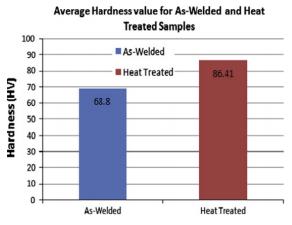


Fig. 8. Average hardness value for both samples.

Figura 71: Durezza con e senza trattamento termico

Per quanto riguarda l'allungamento, il PWHT applicato ai campioni ha aumentato la percentuale di allungamento del 21,5%.

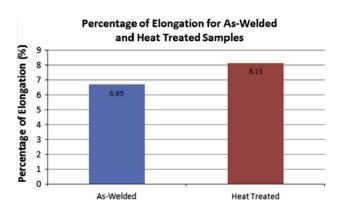


Figura 72: Allungamento con e senza trattamento termico

Questo aumento della duttilità è principalmente dovuto al materiale che viene mantenuto a una temperatura elevata per un tempo sufficiente a portare tutti i componenti nella soluzione solida, producendo un'unica fase.

Questi alti valori di durezza, resistenza alla trazione e allungamento potrebbero essere spiegati dalla distribuzione fine e uniforme dei precipitati ai giunti di saldatura che si ottengono applicando il trattamento termico dopo saldatura, insieme a buone caratteristiche del metodo GMAW CMT, come la saldatura senza spruzzi e basso apporto di calore.

L'aumento della resistenza dei giunti saldati con PWHT AA6061 è dovuto a un meccanismo a diffusione assistita che provoca un aumento della densità delle zone GP, distorsione dei piani reticolari e ostacolo al movimento di dislocazione da parte degli atomi di impurità. Le zone GP sono coerenti con la matrice in alluminio, con ordinamento interno di Al/Mg sul reticolo della matrice.

L'effetto rinforzante può anche essere il risultato dell'interferenza con il movimento della dislocazione a causa della formazione di precipitati. Ad esempio, un alto coefficiente di diffusione per Mg in una matrice di alluminio è stato osservato per il PWHT di un giunto saldato in lega di alluminio AA6061. In un giunto invecchiato artificialmente (AG) i precipitati sono molto fini e sembrano essere distribuiti uniformemente in tutta la matrice. Ciò porta ad un aumento della densità di dislocazione, che si traduce in un miglioramento della durezza e migliori proprietà di trazione. Dai risultati EDAX, questo studio ha identificato MgSi₂ come il precipitato predominante in tutte le variazioni dei giunti.

Tutti i campioni di trazione si sono rotti nella ZTA, il che suggerisce che la ZTA ha ancora una capacità di deformazione plastica inferiore rispetto al resto della lega di base.

Tuttavia, poiché la saldatura ha un livello di resistenza più elevato a causa dell'applicazione del PWHT, l'allungamento o la deformazione non sono più concentrati nella ZTA. Una struttura saldata ha quindi una capacità di deformazione relativamente buona. Pertanto, la limitata capacità di allungamento del provino di trazione per un giunto saldato era dovuta al fatto che l'allungamento totale del provino durante il test era concentrato nella ZTA, che è la parte più debole del provino.

Le superfici di frattura dei provini di trazione sono state caratterizzate utilizzando SEM per comprendere i modelli di rottura.

La distanza tra i grani era indicativa della duttilità del giunto saldato. Nel giunto saldato, i grani erano grandi e la distanza tra i grani era elevata rispetto ai campioni trattati termicamente, in cui la granulometria era costante e abbastanza piccola e i grani erano situati vicini l'uno all'altro.

Come è chiaro dai test meccanici, la resistenza della lega dopo il PWHT è stata generalmente migliorata, ma la regione della ZTA era ancora l'area più debole e il materiale generalmente si è rotto in quel punto.

Le cavità sulle superfici di frattura del provino saldato erano più grandi di quelle sui provini trattati termicamente, in cui queste erano molto sottili. Si può osservare che le fossette dominavano le superfici della frattura, riflettendo il fatto che la maggior parte del cedimento era il risultato di una frattura duttile.

Conclusioni

Il presente lavoro di tesi mi ha permesso di definire un metodo e una strategia da portare avanti per poter eseguire una attività successiva di tipo sperimentale.

La fase di ricerca iniziale si è dimostrata indispensabile e fondamentale per estrapolare dati utili da poter poi riformulare secondo il contesto in cui applicati. In aggiunta la lettura di tali articoli ha permesso di identificare le varie fasi da seguire per portare avanti una attività così innovativa.

Anche la sola scelta delle analisi di qualità del giunto più utili da attuare, quali microdurezza, prove di trazione e ispezioni visive, è stata frutto di studio tramite bibliografia.

Si è osservata la sensibilità dell'ampiezza di oscillazione alle variazioni di passo e velocità e si sono definiti i loro valori da poter utilizzarsi anche in caso di variazioni di frequenza.

Tutto questo è stato affrontato nel Capitolo 4 tramite una riorganizzazione dei dati in tabelle e tramite delle immagini atte a seguire l'andamento delle velocità lungo il percorso di oscillazione.

Nel Capitolo 5 tutti i dati raccolti hanno permesso di poter effettuare una serie di scelte riguardanti la preparazione e la struttura di una attività da laboratorio tra cui:

- Ampiezza della sovrapposizione ideale delle lamine e il metodo di bloccaggio da adottare
- Identificazione delle dimensioni del materiale di base e provini secondo normativa
- Scelta del materiale d'apporto ER5356 piuttosto che ER4043
- Utilizzo del gas Argon con relativo valore di portata ottimale
- Valori di ampiezza coerenti con la velocità e passo di oscillazione
- Scelta di Travel angle negativo e Work angle minore di 45°
- Metodo di calcolo del numero di prove in base ai livelli e ai fattori scelti
- Metodi di valutazione qualità del giunto da adottare quali ispezioni visive,
 mediante microscopio, analisi di durezza e trazione
- Caratteristiche conferite dal trattamento termico in soluzione, tempra in acqua e
 l'invecchiamento artificiale post saldatura

Lo stabilirsi dei precedenti punti e la scelta su quali parametri far variare e quali rendere fissi si è rivelata una procedura molto laboriosa, questo perchè occorre fare i conti con

l'aspetto economico di realizzazione prove (non è pensabile che si possano eseguire un numero eccessivo di saldature di prova), per cui un metodo di riduzione parametri e livelli tramite letteratura a quelli strettamente necessari si è rivelato indispensabile.

Bibliografia

- [1] H. Zhao, D. R. White, e T. DebRoy, «Current issues and problems in laser welding of automotive aluminium alloys», *International Materials Reviews*, vol. 44, n. 6, pagg. 238–266, giu. 1999, doi: 10.1179/095066099101528298.
- [2] H. A. da Silva Pereira, M. C. Rodrigues, e J. V. L. de Carvalho Firmino, «Implementation of weave patterns by path parameterization in the simulation of welding processes by the finite element method», *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 104, n. 1, pagg. 477–487, set. 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03861-5.
- [3] www.weldguru.com.
- [4] www.theweldings.com.
- [5] www.helvilite.com.
- [6] E. Aldalur, F. Veiga, A. Suárez, J. Bilbao, e A. Lamikiz, «Analysis of the Wall Geometry with Different Strategies for High Deposition Wire Arc Additive Manufacturing of Mild Steel», *Metals*, vol. 10, n. 7, Art. n. 7, lug. 2020, doi: 10.3390/met10070892.
- [7] J.-F. Hu, J.-G. Yang, H.-Y. Fang, G.-M. Li, e Y. Zhang, «Numerical simulation on temperature and stress fields of welding with weaving», *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 11, n. 3, pagg. 358–365, mag. 2006, doi: 10.1179/174329306X124189.
- [8] G. Ma, G. Zhao, Z. Li, e W. Xiao, «A Path Planning Method for Robotic Wire and Arc Additive Manufacturing of Thin-Walled Structures with Varying Thickness», IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., vol. 470, pag. 012018, gen. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/470/1/012018.
- [9] I. Guzmán-Flores, B. Vargas-Arista, J. J. Gasca-Dominguez, C. E. Cruz-González, M. A. González-Albarrán, e J. del Prado-Villasana, «Effect of Torch Weaving on the Microstructure, Tensile and Impact Resistances, and Fracture of the HAZ and Weld Bead by Robotic GMAW Process on ASTM A36 Steel», 2017, doi: 10.1590/0104-9224/SI2201.08.
- [10] Q. Jiang *et al.*, «Microstructure and Mechanical Properties of Thick-Walled Inconel 625 Alloy Manufactured by Wire Arc Additive Manufacture with Different Torch Paths», *Advanced Engineering Materials*, vol. 23, n. 1, pag. 2000728, 2021, doi: https://doi.org/10.1002/adem.202000728.
- [11] J. Yu e D. Kim, «Effects of welding current and torch position parameters on minimizing the weld porosity of zinc-coated steel», *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 95, n. 1–4, pagg. 551–567, mar. 2018, doi: 10.1007/s00170-017-1180-6.
- [12] Y. B. Liu *et al.*, «Optimization of magnetic oscillation system and microstructural characteristics in arc welding of Al/Mg alloys», *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 39, pagg. 69–78, mar. 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.02.008.
- [13] S. Chen, Y. Chi, P. Zhang, e Y. Shi, «Mechanism to Reduce the Porosity during Argon Arc Welding of Aluminum Alloys by Changing the Arc Angle», *Metals*, vol. 10, n. 9, Art. n. 9, set. 2020, doi: 10.3390/met10091121.
- [14] B. Girinath, N. Siva Shanmugam, e K. Sankaranarayanasamy, «Investigation on the Effect of Torch Angle on the Formability of AA5052 CMT Weldments», *Trans Indian Inst Met*, vol. 72, n. 6, pagg. 1551–1555, giu. 2019, doi: 10.1007/s12666-019-01633-z.
- [15] L. Wang, Y. Liu, C. Yang, e M. Gao, «Study of porosity suppression in oscillating laser-MIG hybrid welding of AA6082 aluminum alloy», *Journal of Materials Processing*

- *Technology*, vol. 292, pag. 117053, giu. 2021, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117053.
- [16] A. M. Milani, M. Paidar, A. Khodabandeh, e S. Nategh, «Influence of filler wire and wire feed speed on metallurgical and mechanical properties of MIG welding—brazing of automotive galvanized steel/5754 aluminum alloy in a lap joint configuration», *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 82, n. 9, pagg. 1495–1506, feb. 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7505-4.
- [17] A. O. İrizalp, H. Durmuş, N. Yüksel, e İ. Türkmen, «Cold metal transfer welding of AA1050 aluminum thin sheets», *Matéria (Rio J.)*, vol. 21, pagg. 615–622, set. 2016, doi: 10.1590/S1517-707620160003.0059.
- [18] B. Gungor, E. Kaluc, E. Taban, e A. Sik şş, «Mechanical and microstructural properties of robotic Cold Metal Transfer (CMT) welded 5083-H111 and 6082-T651 aluminum alloys», *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 54, pagg. 207–211, feb. 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.08.018.
- [19] D.-Y. Kim *et al.*, «Effect of Porosity on the Fatigue Behavior of Gas Metal Arc Welding Lap Fillet Joint in GA 590 MPa Steel Sheets», *Metals*, vol. 8, n. 4, Art. n. 4, apr. 2018, doi: 10.3390/met8040241.
- [20] R. Cao, J. H. Sun, J. H. Chen, e P.-C. Wang, «Cold Metal Transfer Joining of Aluminum AA6061-T6-to-Galvanized Boron Steel», J. Manuf. Sci. Eng, vol. 136, n. 5, ott. 2014, doi: 10.1115/1.4028012.
- [21] C. Gandhi et al., «Characterization of AA7075 Weldment using CMT Process», Materials Today: Proceedings, vol. 5, n. 11, Part 3, pagg. 24024–24032, gen. 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.10.195.
- [22] A. Elrefaey, «Effectiveness of cold metal transfer process for welding 7075 aluminium alloys», *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 20, n. 4, pagg. 280–285, mag. 2015, doi: 10.1179/1362171815Y.0000000017.
- [23] Q. Zhang *et al.*, «Microstructure and Properties of an Al 6061/Galvanized Plate Fabricated by CMT Welding», *J. Wuhan Univ. Technol.-Mat. Sci. Edit.*, vol. 35, n. 5, pagg. 937–945, ott. 2020, doi: 10.1007/s11595-020-2340-3.
- [24] Y. Koli, N. Yuvaraj, S. Aravindan, e Vipin, «CMT Joining of AA6061-T6 and AA6082-T6 and Examining Mechanical Properties and Microstructural Characterization», *Trans Indian Inst Met*, vol. 74, n. 2, pagg. 313–329, feb. 2021, doi: 10.1007/s12666-020-02134-0.
- [25] A. Elrefaey e N. G. Ross, «Microstructure and Mechanical Properties of Cold Metal Transfer Welding Similar and Dissimilar Aluminum Alloys», *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)*, vol. 28, n. 6, pagg. 715–724, giu. 2015, doi: 10.1007/s40195-015-0252-6.
- [26] J. Rykała, «Robotic welding of thin wall components made of 6xxx and 2xxx series aluminium alloys using low-energy methods», *Welding International*, vol. 28, n. 5, pagg. 333–338, mag. 2014, doi: 10.1080/09507116.2012.708486.
- [27] R. Cao, Z. Feng, e J. H. Chen, «Microstructures and properties of titanium—copper lap welded joints by cold metal transfer technology», *Materials & Design*, vol. 53, pagg. 192–201, gen. 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.06.030.
- [28] S. Niu *et al.*, «Microstructure and Properties of Lap Joint Between Aluminum Alloy and Galvanized Steel by CMT», *J. of Materi Eng and Perform*, vol. 25, n. 5, pagg. 1839–1847, mag. 2016, doi: 10.1007/s11665-016-2035-2.
- [29] S. Wu, Z. Li, E. Qi, X. Cui, S. Zhang, e X. Han, «Impact of Nb on microstructure and properties of oscillating laser-CMT hybrid welding joints of A7204P-T4 aluminium

- alloy sheets», *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 26, n. 4, pagg. 273–278, mag. 2021, doi: 10.1080/13621718.2021.1894764.
- [30] N. Pavan Kumar, S. Arungalai Vendan, e N. Siva Shanmugam, «Investigations on the parametric effects of cold metal transfer process on the microstructural aspects in AA6061», *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 658, pagg. 255–264, feb. 2016, doi: 10.1016/j.jallcom.2015.10.166.
- [31] Y. Liang, S. Hu, J. Shen, H. Zhang, e P. Wang, «Geometrical and microstructural characteristics of the TIG-CMT hybrid welding in 6061 aluminum alloy cladding», *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 239, pagg. 18–30, gen. 2017, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.08.005.
- [32] G. İpekoğlu e G. Çam, «Formation of weld defects in cold metal transfer arc welded 7075-T6 plates and its effect on joint performance», *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 629, pag. 012007, ott. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/629/1/012007.
- [33] J. Feng, H. Zhang, e P. He, «The CMT short-circuiting metal transfer process and its use in thin aluminium sheets welding», *Materials & Design*, vol. 30, n. 5, pagg. 1850–1852, mag. 2009, doi: 10.1016/j.matdes.2008.07.015.
- [34] S. T. Selvamani, P. Govindarajan, M. Ajaymohan, S. J. Hariharan, e M. Vigneshwar, «Correlation between Micro hardness and Microstructure of CMT Welded AA 7075 Al Alloy», *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 390, pag. 012058, lug. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/390/1/012058.
- [35] J. Li, H. Li, H. Wei, e Y. Gao, «Effect of torch position and angle on welding quality and welding process stability in Pulse on Pulse MIG welding—brazing of aluminum alloy to stainless steel», *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 84, n. 1–4, pagg. 705–716, apr. 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7734-6.
- [36] «Welding EN AW 7075 Aluminium Alloy Sheets Low-energy Versus Pulsed Current | Semantic Scholar». https://www.semanticscholar.org/paper/Welding-EN-AW-7075-Aluminium-Alloy-Sheets-%E2%80%93-Versus-Pfeifer-Rykala/f8e51f7a8450583b0038752b2f6fb232aa7fdceb (consultato giu. 05, 2021).
- [37] R. Ahmad e M. A. Bakar, «Effect of a post-weld heat treatment on the mechanical and microstructure properties of AA6061 joints welded by the gas metal arc welding cold metal transfer method», *Materials & Design*, vol. 32, n. 10, pagg. 5120–5126, dic. 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2011.06.007.