

Saldatura in configurazione testa a testa di lamiere in lega 2198 T3 mediante procedimento friction stir welding

A. Astarita, A. Squillace, E. Armentani, S. Ciliberto

Scopo del presente lavoro è lo studio della saldabilità mediante processo friction stir welding (FSW) di lamiere in lega innovativa alluminio-litio AA 2198 T3 in configurazione di testa. In particolare, mediante tecniche statistiche, la velocità d'avanzamento e quella di rotazione sono state messe in relazione con le proprietà meccaniche del giunto ed è stato sviluppato un modello empirico di previsione delle suddette caratteristiche al variare dei parametri di processo. Per lo sviluppo di questo modello, è stato utilizzato un piano fattoriale completo 3^2 avente come risposte osservate la resistenza allo snervamento e la resistenza a rottura dei giunti. Il modello sviluppato può essere utilizzato per prevedere le proprietà meccaniche dei giunti con un livello di confidenza pari al 95%. Inoltre, usando la funzione di desiderabilità (desirability function, DF) sono stati trovati i parametri di processo che massimizzano in maniera bilanciata la resistenza allo snervamento e quella alla trazione. Infine, i giunti ottenuti utilizzando i parametri di processo ottimi sono stati sottoposti a prove di fatica e di tensocorrosione al fine di valutarne il potenziale utilizzo nel settore aeronautico. I risultati ottenuti mostrano che i giunti ottenuti tramite questa tecnologia hanno una buona resistenza alla tensocorrosione ed un'ottima vita a fatica, paragonabile a quella del materiale base e superiore a quella di saldature ottenute con tecniche tradizionali, come TIG e MIG.

Parole chiave:

Alluminio e leghe, prove meccaniche, elettrochimica, saldatura

INTRODUZIONE

Il processo di saldatura friction stir welding è sempre più oggetto di ricerca sia accademica che industriale ed è usato in un numero sempre maggiore d'applicazioni. Pertanto, è interessante studiarne l'applicazione su leghe innovative che permettano di contenere ulteriormente i pesi, senza compromettere le prestazioni richieste ad un componente meccanico. Oggetto del presente studio è la lega innovativa alluminio-rame-litio AA 2198 T3 che, oltre a manifestare elevatissime caratteristiche meccaniche, sembra ben prestarsi all'impiego in campo aeronautico. La storia delle leghe Al-Li comincia circa negli anni 20 del '900 ma il loro sviluppo ha ricevuto un nuovo grande impulso a partire dalla fine degli anni '70. In particolare, nel campo delle applicazioni aeronautiche e aerospaziali dove, in virtù del continuo aumento di costo dei combustibili, è sempre più sentita la necessità di un progressivo alleggerimento delle strutture, con conseguente aumento del carico pagante o maggiore economia di esercizio. Le attuali leghe Al-Li sono una delle possibili risposte a quest'esigenza [1]. Si sono, anzi, rivelate la via più immediata ed economica per raggiungere lo scopo perché, oltre alla riduzione del peso delle strutture, consentono incrementi di rigidità delle stesse e, soprattutto, potendo sostituire direttamente le più tradizionali leghe d'alluminio ad alta resistenza delle serie 2xxx e 7xxx, consentono la sostituzione di componenti strutturali senza la riprogettazione degli stessi. Tale possibilità ha portato,

negli anni '80, ad una sopravvalutazione di questa classe di leghe, fino ad immaginare una completa sostituzione delle leghe d'alluminio tradizionali con esse. Ciò non si è mai avverato, sia a causa del costo delle leghe Al-Li, che è circa il doppio di quelle tradizionali, sia a causa del comportamento difficilmente "interpretabile" di questi materiali, almeno sulla scorta delle conoscenze metallurgiche delle leghe convenzionali. Proprio per questo motivo la ricerca su queste leghe è attualmente molto attiva, in modo da poter meglio conoscere il comportamento meccanico ed elettrochimico delle suddette leghe e da poterle lavorare con tecnologie innovative allo scopo di ottenere componenti con le migliori prestazioni possibili. In breve, il successo delle leghe Al-Li è dovuto a tre fattori. I primi due, bassa densità ed elevata rigidità dovute all'aggiunta di litio (la cui densità è 534 kg/m^3) fino al 4% in peso; ogni punto percentuale d'elemento aggiunto abbassa la densità di circa il 3% ed alza il modulo di Young di circa il 6%. Il terzo fattore di successo è dato dalla possibilità di usare gli stessi processi di fabbricazione delle leghe tradizionali 2xxx e 7xxx. Accanto alla 2198, sono in corso di sviluppo nuove leghe (per esempio la 2096 e la 2097) pensate per applicazioni molto specifiche, a differenza della maggior parte di quelle in commercio (per esempio la 2090 e la 8090), che invece sono state concepite per ampi ventagli applicativi [2, 3].

In questo lavoro si è studiata la saldabilità mediante il processo FSW della lega d'alluminio innovativa AA 2198. Si mostreranno i risultati di una campagna sperimentale condotta su giunti ottenuti variando i principali parametri di processo, al fine di individuare quelli ottimali mediante tecniche statistiche. Sui giunti ottimi così individuati sono poi state compiute prove di stress corrosion cracking (SCC) e prove meccaniche a fatica al fine di

A. Astarita, A. Squillace, E. Armentani, S. Ciliberto
Università di Napoli Federico II
Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e della Produzione
P.le Tecchio 80, 80125, Napoli

TAB. 1

Composizione chimica (wt%) del materiale base AA 2198.

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr	Li	Ag
Min	-	-	2.90	-	0.25	-	-	0.04	0.8	0.10
Max	0.08	0.1	3.50	0.50	0.80	0.05	0.35	0.18	1.10	0.50

Chemical composition (wt.%) of base AA 2198 aluminium alloy.

TAB 2

Proprietà meccaniche della lega AA 2198 T3 misurate perpendicolarmente alla direzione di laminazione.

UTS (MPa)	YS (MPa)	E (GPa)	Allungamento a rottura (%)
370	275	-	15

Mechanical properties of AA 2198 T3 perpendicular to the rolling direction.

fornire indicazioni sul possibile comportamento in opera in strutture aeronautiche.

In particolare, i problemi di corrosione di giunti saldati FSW sono estremamente importati, poiché sono tra le prime cause di cedimento di una saldatura [4]. Per impedire la corrosione di giunti FSW, negli ultimi anni si sono studiate approfonditamente protezioni di tipo passivo. Questo tipo di protezione consiste in un rivestimento per isolare la superficie del giunto dall'ambiente esterno con ad esempio: un film di pittura protettiva [4], manti protettivi a base di polietilene [5-7], prodotti di ossidazione aderenti alla superficie e capaci di passivare il giunto [8, 9].

ATTIVITÀ SPERIMENTALE

Lamiere della lega d'alluminio AA 2198 T3 dello spessore di 3.2 mm sono state tagliate in modo da ottenere delle piastre di 200×100 mm di dimensione. La composizione chimica e le principali proprietà meccaniche del materiale base sono riportate nelle tabelle 1 e 2.

Le piastre ottenute sono state saldate in configurazione di testa producendo dei cordoni di saldatura lunghi 200 mm. La direzione di saldatura è parallela alla direzione di laminazione, vedi figura 1. I giunti sono stati saldati mediante una macchina a controllo numerico a cinque assi: una fresatrice universale DMG CNC con un piano di lavoro di 600×600×600 mm (x/y/z); l'utensile adoperato per la saldatura è realizzato in acciaio al Cr-Mo, con una spalla (shoulder) dal diametro di 12 mm ed un pin tronco-conico dal diametro maggiore di 4 mm ed un diametro minore di 3 mm. L'azione forgiate dell'utensile è stata applicata con un angolo di tilt pari a 2°.

Per studiare la dipendenza delle caratteristiche meccaniche dei giunti dai parametri di processo è stato adottato un piano sperimentale completo a due fattori, ognuno a tre livelli. Il piano degli esperimenti finale è un piano fattoriale completo 3², che richiede un totale di 9 prove. Le variabili di processo d'interesse sono la velocità di rotazione, N (rpm), e la velocità d'avanzamento, V (mm/min) dell'utensile. Le risposte osservate sono la resistenza allo snervamento, YS (MPa), e la resistenza a rottura, UTS (MPa). Una serie di prove preliminari è stata condotta per individuare i valori estremi dei parametri di processo che producevano delle saldature prive di difetti macroscopici. In base a questa campagna di prove preliminari, i valori che sono stati scelti per i parametri di processo sono: 500, 700 e 900 rpm per N; 150, 225 e 300 mm/min per V. La figura 2 riporta il piano fattoriale utilizzato.

Per valutare le proprietà meccaniche dei giunti sono stati ricavati dei provini normati dalle lamiere mediante una sega ed una successiva lavorazione di macchina per riportarli all'interno delle dimensioni previste, figura 1. Da ogni giunto sono stati estratti tre provini secondo la norma ASTM E8M-04. Quindi, 9 × 3 = 27 provini sono stati ottenuti e testati. Le prove di trazione sono state eseguite ad una velocità di deformazione di 10⁻⁴ s⁻¹

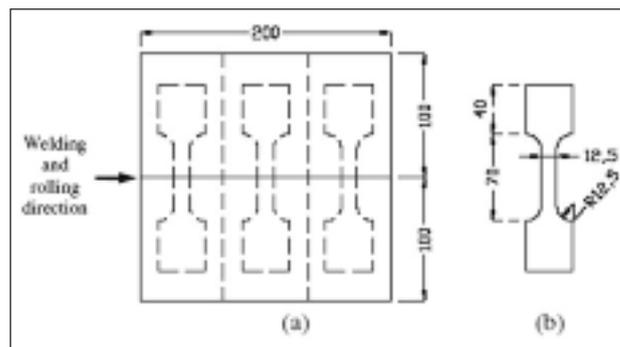


FIG. 1 (a) posizione dei provini rispetto alla direzione di saldatura e laminazione; (b) dimensione dei provini secondo ASTM E8M-04 (tutte le dimensioni sono in 'mm').

(a) Scheme of welding with respect to the rolling direction and extraction of tensile specimens and (b) dimensions of tensile specimen according ASTM E8M-04 (all dimensions are in 'mm').

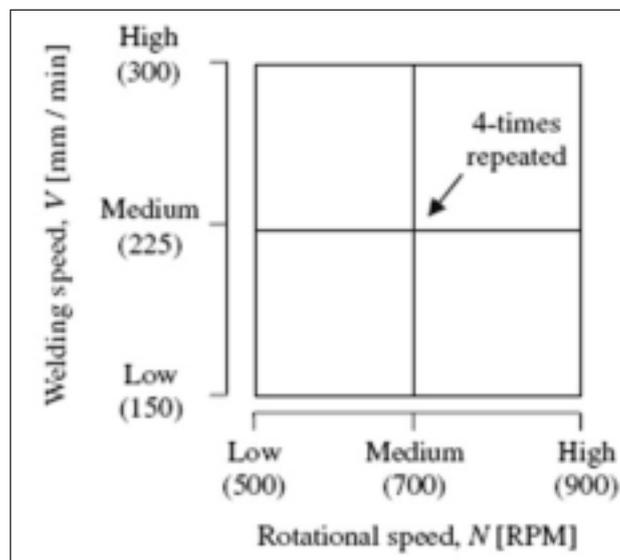


FIG. 2 Piano fattoriale 3² utilizzato nella campagna sperimentale.

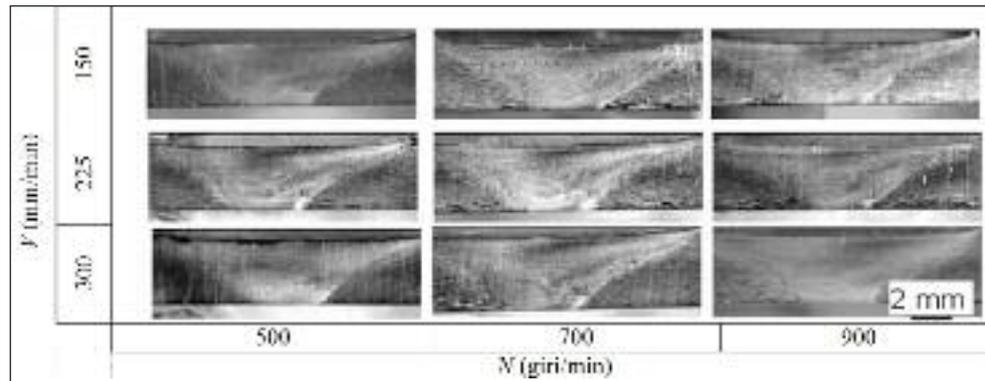
Treatment combination in the 3² experimental design.

usando una macchina universale servo-idraulica MTS. In ogni prova sono state calcolate sia la resistenza allo snervamento YS (associata ad una deformazione plastica irreversibile del 0.2%) che la resistenza a trazione UTS. Tutti i test sono stati condotti in ordine casuale.

FIG. 3

Macrografie delle sezioni trasversali delle saldature ottenute alle diverse condizioni di processo.

Macrographs of the cross section of the welds for the different welding parameters.



Sebbene i provini siano stati ottenuti in posizioni differenti rispetto al punto d'inizio della saldatura, nelle analisi di questo lavoro questa variabile non è stata considerata. Infatti, per mezzo di una termocamera Nec TH 7800 si è visto che il flusso termico raggiungeva quasi subito, dopo l'inizio della saldatura, una condizione stazionaria. In particolare, si è accertato che differenti punti lungo la linea di saldatura avessero subito la stessa storia termica. Di conseguenza, considerando che la quantità di calore introdotta nella lamiera durante la saldatura determina la microstruttura del giunto, le tensioni residue e la resistenza meccanica, si può concludere che la saldatura presenterà le stesse proprietà meccaniche lungo tutta la sua lunghezza. Pertanto, i tre provini estratti per ogni condizione di saldatura rappresentano tre repliche del punto considerato.

Oltre alle prestazioni meccaniche, si sono valutate anche le caratteristiche morfologiche dei giunti mediante indagine metallografica. Le sezioni osservate sono state preparate secondo le norme ASTM [10]. Le osservazioni metallografiche, sono state condotte con uno stereo-microscopio Olympus SC-35, a bassi ingrandimenti, e con un microscopio metallografico Leitz MM6 per gli alti ingrandimenti.

Il set di provini ottenuti da lamiere saldate utilizzando i parametri di processo individuati come ottimali, nel senso della loro capacità di massimizzare in maniera combinata sia la resistenza allo snervamento che quella a trazione, sono stati sottoposti a prove di tenso-corrosione e di fatica al fine di valutare la risposta delle giunzioni all'azione di carichi variabili nel tempo e all'azione accoppiata di un carico statico e di un ambiente corrosivo.

Le prove di tenso-corrosione sono state eseguite in accordo alle norme ASTM G44, G47 e G47 [11 - 13]. In particolare, la prova ha previsto l'immersione periodica dei provini in una soluzione al 3.5% in peso di NaCl in acqua distillata. Durante la prova di SCC, i provini sono stati assoggettati ad un carico statico assiale pari al 60% del valore della loro UTS media; per poter valutare l'effetto della presenza della tensione applicata altri provini scarichi sono stati assoggettati allo stesso ciclo d'immersione. La prova dura 30 giorni, durante i quali i provini sono ciclicamente immersi nella soluzione per 10 min e tenuti al di sopra del pelo libero per 50 min.

Le prove di fatica sono state condotte imponendo un carico alternato dallo zero e tre livelli di σ_{max} pari, rispettivamente, al 40%, 60% e l'80% del carico di rottura. Per ciascuna condizione di carico, sono stati adoperati cinque provini estratti in maniera casuale dalle giunzioni ottenute con i parametri ottimi. Sulla base dei dati ottenuti si è costruita la curva di Wöhler.

DISCUSSIONE DEI RISULTI

In figura 3 si riportano le macrografie dei giunti; per rendere uniformi le osservazioni le immagini sono state scattate ponendo l'advancing side sempre sul lato destro. Le immagini di figura

sono disposte secondo lo schema del piano sperimentale riportato in figura 2.

La scelta di un ingrandimento così basso ha permesso di visualizzare l'intero giunto nella stessa macrografia e di poter confrontare immediatamente le caratteristiche morfologiche dei giunti.

Dall'osservazione delle macrografie dei giunti è possibile affermare quanto segue:

- nessuna combinazione dei parametri si è rivelata inadeguata per l'ottenimento di una buona saldatura;
 - in ognuna delle macrografie è possibile distinguere chiaramente tutte le zone caratteristiche di un giunto saldato FSW: zona termicamente alterata, zona termo-meccanicamente alterata e nugget zone;
 - nessuna combinazione dei parametri adoperati ha portato alla nascita di difetti all'interno dei giunti, segno di una buona robustezza del processo;
 - non vi sono evidenti influenze dei parametri del processo sulla geometria e sull'estensione dell'area coinvolta nella saldatura.
- La figura 4 riporta il tipico andamento delle curve tensione-deformazione ingegneristiche osservate durante le prove di trazione. Tutti i provini si sono rotti nella zona termo-meccanicamente alterata, che è noto essere una zona di debolezza della saldatura; d'altronde l'assenza di cedimenti nel cordone testimonia la bontà della saldatura e l'assenza di difetti macroscopici.

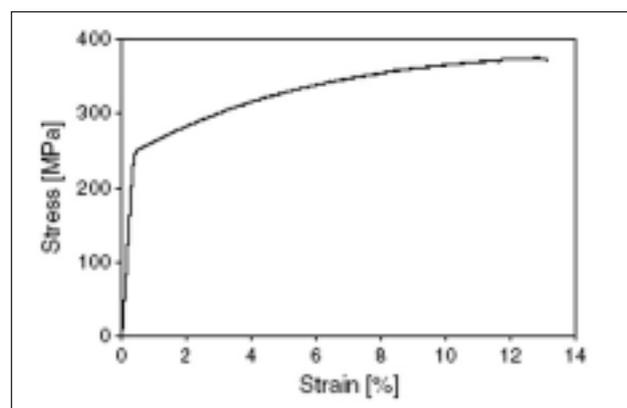


FIG. 4 *Curva tensione-deformazione ingegneristica.*

Engineering stress-strain curve.

Un'analisi classica delle proprietà meccaniche dei giunti in esame mostra che la resistenza allo snervamento, YS , e la resistenza a rottura, UTS , tendono ad assumere valori elevati in condizioni di giunto freddo, vale a dire quando la saldatura è ottenuta con un alto rapporto del weld-pitch; ricordiamo che per weld-pitch si intende il rapporto tra la velocità di avanzamento

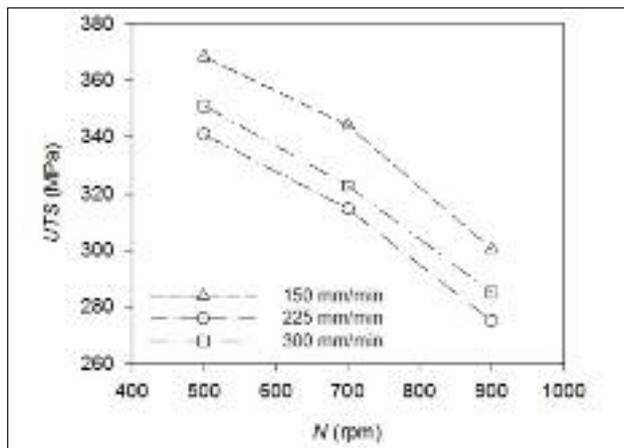


FIG. 5 L'andamento della UTS media al variare della velocità di rotazione per diversi valori della velocità di avanzamento.

Mean UTS as a function of the rotational speed for different values of the travelling speed.

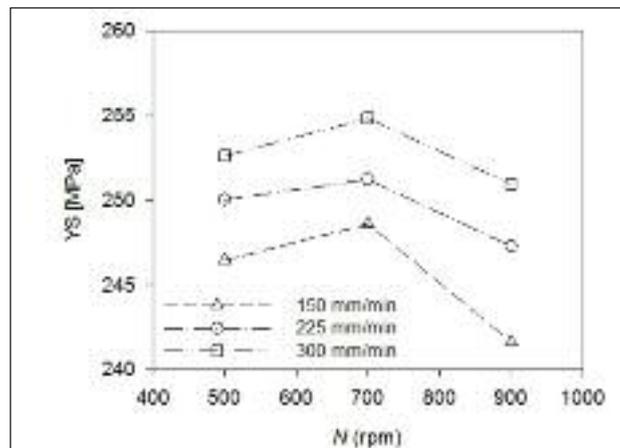


FIG. 6 Valore della YS media al variare della velocità di rotazione per diversi valori della velocità di avanzamento.

Mean YS as a function of the rotational speed for different values of the travelling speed.

e quella di rotazione. In tali condizioni si riescono ad ottenere giunti che presentano caratteristiche meccaniche, sia YS che UTS, pari se non superiori al 90% di quelle del materiale base, vedi figure 5 e 6.

Invece, per la lega in esame è evidente la complessa influenza dei parametri di processo sulle proprietà meccaniche finali dei giunti. La figura 5 mostra come sia N che V abbiano influenza sull'UTS dei giunti; l'UTS raggiunge un massimo in corrispondenza di N = 500 rpm e V = 150 mm/min; quando l'apporto termico unito all'azione di rimescolamento dell'utensile sono sufficienti per avere continuità metallurgica senza alterare eccessivamente le zone adiacenti al cordone di saldatura o creare micro-difetti che inficino le proprietà meccaniche finali.

Per quanto riguarda la resistenza allo snervamento, essa presenta il massimo in corrispondenza di N = 700 rpm, V = 300 mm/min, vedi figura 6.

Si nota dalle figure 5 e 6 che mentre il valore della YS rimane pressoché costante al variare dei parametri di processo, l'UTS varia sensibilmente con gli stessi. Comunque, si osserva che l'UTS ed la YS non raggiungono il massimo valore nelle stesse condizioni.

Per correlare i parametri di processo alle prestazioni statiche dei giunti, in termini di UTS e YS, si propone un modello di regressione multipla analizzando a priori la bontà dei modelli di regressione scelti. Come criterio per la scelta dei migliori predittori (variabili indipendenti) è stato adottato il Mallows' CP unitamente al coefficiente di determinazione R^2 , il coefficiente di determinazione corretto $R^2(\text{adj.})$ e l'errore standard di regressione (o errore quadratico medio). Come è noto, un modello con un elevato valore di R^2 ed un ridotto numero di predittori può essere una buona scelta, in quanto un valore elevato del parametro R^2 implica una buona affidabilità dei valori stimati, mentre, in generale, un ridotto numero di predittori riduce i costi computazionali. In particolare nel presente lavoro, il coefficiente di determinazione è adottato per una valutazione preliminare del modello. Comunque, il coefficiente di determinazione è affetto da una debolezza intrinseca, infatti R^2 aumenta all'aumentare dei regressori presenti nel modello, portando a condizioni di overfitting (eccessivo adattamento). Viceversa il Cp tende ad essere meno dipendente dal numero di regressori rispetto al coefficiente di correlazione e, dunque, tende ad individuare il migliore insieme di regressori che includa solo i predittori

importanti delle rispettive variabili dipendenti [14, 15]. La procedura generale per trovare un modello adeguato a mezzo dell'analisi basata sul Cp consiste nel calcolare il valore di tale parametro per ogni possibile combinazione di variabili e riportare in un grafico il valore del Cp in funzione di p, numero di regressori, inclusi i termini costanti [16]. Il modello che presenta il valore di Cp più basso ed approssimativamente uguale a p è il più "adeguato". Un altro criterio utile per individuare il miglior modello possibile è basato sull'errore standard di regressione, S; secondo questo criterio il modello che fornisce il valore più basso del parametro S con il minor numero di predittori può essere considerato un modello sensibile. In quest'articolo, tutti i metodi presentati sono adoperati in modo sinergico per individuare il miglior insieme di predittori.

Per ottenere la migliore interpolazione possibile dei dati, si è adoperato un modello polinomiale del secondo ordine sia per la YS che per la UTS come funzioni di N e di V. La lista completa delle cinque variabili di regressione adoperate è la seguente: N, V, N^2 , V^2 , $N \times V$; dato che il numero di variabili è pari a 5 vi sono $2^{\text{predittori}} = 2^5 = 32$ possibili modelli di regressione. I modelli sono divisi in sei diversi sottogruppi in base al numero di variabili di regressione presenti, da zero a cinque; il numero di modelli di regressione appartenenti a ciascun gruppo è dato dal coefficiente binomiale:

$$\binom{\text{regressori}}{\text{numero di variabili presenti nel modello}}$$

Posto pari a zero il numero di variabili presenti nel modello, i modelli possibili sono

$$\binom{5}{0} = 1 \text{ modello,}$$

cioè il modello $UTS = \alpha_0 + \epsilon$ (espressione equivalente si sarebbe trovata per YS), i modelli con un solo parametro sono invece 5, e così via.

La tabella 3 contiene i parametri statistici adoperati nella scelta del migliore modello di regressione dei dati sperimentali rispettivamente per l'UTS e l'YS; per ogni sottoinsieme di modelli si è riportato soltanto il modello con il valore di R^2 più alto o, dove possibile, i due modelli con il valore di R^2 più elevato.

TAB. 3

Determinazione del miglior modello di regressione per UTS ed YS; il modello migliore è evidenziato in grassetto.

Determination of the best subsets regression for UTS and YS. The best predictor models for UTS are highlighted in bold.

N. di Variabili	R ²	R ² (adj)	C _p	S	N	V	N ²	V ²	N-V
La risposta è UTS									
1	42.7	41.0	13.5	3.13		X			
1	38.0	36.2	17.2	3.26				X	
2	52.9	50.1	7.4	2.88			X		X
2	50.3	47.3	9.4	2.96		X		X	
3	58.5	54.6	4.9	2.75	X		X		X
3	58.3	54.3	5.1	2.75	X	X	X		
4	61.5	56.5	4.6	2.69	X	X	X	X	
4	59.1	53.8	6.5	2.77		X	X	X	X
5	62.2	55.9	6.0	2.71	X	X	X	X	X
La risposta è YS									
1	53.6	52.2	8.7	22.23	X				
1	53.1	51.7	9.1	22.35			X		
2	58.7	56.2	6.1	21.28				X	X
2	57.5	54.9	7.2	21.59	X				X
3	65.5	62.3	2.2	19.75		X	X	X	
3	64.6	61.3	3.0	20.00	X	X		X	
4	65.6	61.2	4.1	20.04		X	X	X	X
4	65.6	61.1	4.2	20.05	X	X	X	X	
5	65.8	60.0	6.0	20.33	X	X	X	X	X

TAB. 4

Analisi della varianza dei due modelli di regressione scelti per le proprietà meccaniche dei giunti.

Analysis of variance of the two selected subsets for the mechanical properties of the welds.

Predittore	Coefficiente	Coefficiente SE	T	P	
Analisi di regressione: YS rispetto a V, N², N-V					
Costante	224.69	11.02	20.38	0.000	
V	0.0672	0.03238	2.08	0.046	
N ²	-0.00006389	0.00002293	-2.79	0.009	
N-V	0.00006925	0.00001203	5.76	0.000	
Fonte	DF	SS	MS	F	P
Regressione	3	341.63	113.88	15.04	0.000
Errore residuo	32	242.26	7.57		
Totale	35	583.89			
Analisi di regressione: UTS rispetto a V, N², V²					
Costante	564.89	58.71	9.62	0.000	
V	-1.6131	0.5308	-3.04	0.005	
N ²	-0.00011768	0.00001656	-7.11	0.000	
V ²	0.003328	0.001172	2.84	0.008	
Fonte	DF	SS	MS	F	P
Regressione	3	23721.0	7907.0	20.25	0.000
Errore residuo	32	12493.2	390.4		
Totale	35	36214.1			

Per la YS il miglior sottoinsieme di regressori è risultato essere {N, N², N×V}; il sottoinsieme {N, V, N², V²}, sebbene mostri un minor valore del parametro C_p è scartato a causa del maggior numero di variabili di regressione; è inutile adoperare un modello più complesso rispetto ad un modello a tre variabili a fronte di un piccolo guadagno in termini di precisione, in particolare il valore del parametro S si riduce solo del 2%. A supporto della scelta effettuata, l'insieme di regressori scelti presenta un buon valore del parametro C_p e un ottimo valore del parametro R²(adj) rispetto agli altri modelli. Per quanto riguarda l'UTS il modello scelto è quello con i regressori {V, N², V²} in quanto è la combinazione che massimizza il parametro R²(adj) e minimizza il parametro S, risultando, dunque, il miglior sottoinsieme possibile di regressori con un ridotto numero di variabili e, quindi, un

minor pericolo di avere informazioni ridondanti.

L'analisi della varianza dei modelli considerati, riportata in tabella 4, conferma la correttezza della scelta effettuata. L'analisi mostra che i modelli sono molto significativi, presentando un valore di P < 0.001 con una F = 15.04 e P < 0.001 con F = 20.25 per regressioni riguardanti YS e UTS, rispettivamente [F_{0.001}(3, 32) = 6.93]. Tutti i coefficienti adoperati hanno superato il test t di Student per la verifica d'ipotesi sul valor medio al 95%. I coefficienti ed i relativi valori del parametro P sono riportati in tabella 4.

I modelli empirici scelti per la previsione di UTS e YS sono dunque:

$$YS = 224.69 + 0.0672 \cdot N - 0.000064 \cdot N^2 + 0.000069 \cdot N \cdot V,$$

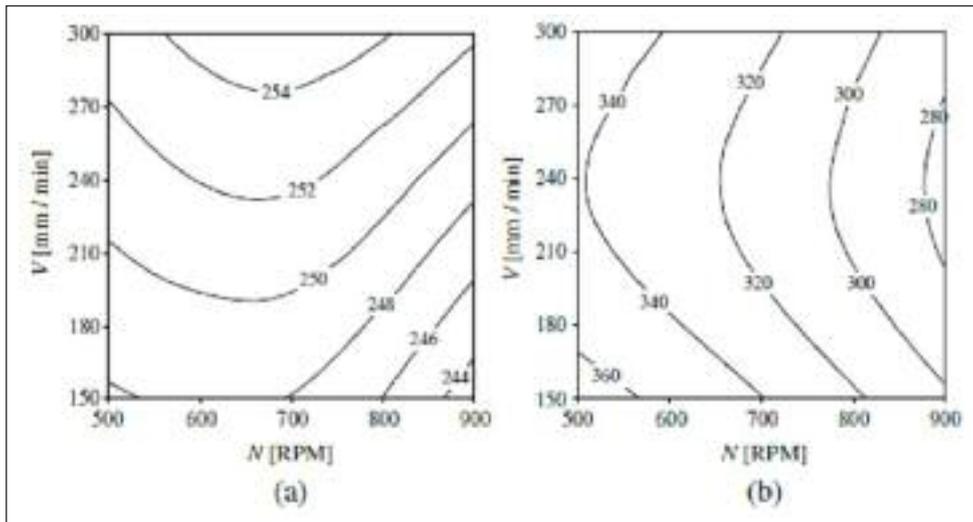
e

$$UTS = 564.89 - 1.6131 \cdot V - 0.00011768 \cdot N^2 + 0.003328 \cdot V^2.$$

FIG. 7

Contour plot per (a) YS e (b) UTS.

Contour plot of (a) YS and (b) UTS.



YS dipende sia da N che da N^2 ; è presente anche una dipendenza dall'interazione tra N e V, come mostrato dalle isocline ellittiche in figura 7(a). Sulla base dei grafici di figura 7(a) è possibile affermare che YS è meno sensibile alle variazioni di velocità d'avanzamento rispetto che alle variazioni di velocità di rotazione; l'UTS, invece, è funzione di V e V^2 oltre che di N^2 . A causa della dipendenza di UTS da V, V^2 ed N^2 , le isocline di figura 7(b) risultano molto più circolari rispetto ai diagrammi relativi all'YS, segno che l'UTS risente molto di più degli effetti dei fattori V ed N; infine, si può affermare che l'UTS risente in misura maggiore delle variazioni della velocità di rotazione che non delle variazioni della velocità di avanzamento.

La figura 7 chiaramente che l'ottimo per la YS è posto all'incirca a metà del campo di velocità indagato, circa 680/700 rpm, e alti valori della velocità d'avanzamento, circa 300 mm/min, mentre l'UTS presenta un valore massimo a valori della velocità di avanzamento più bassi, circa 240 mm/min, e ad alti valori della velocità di rotazione, circa 900 rpm.

Per massimizzare le proprietà meccaniche dei giunti saldati, cioè massimizzare contemporaneamente YS e UTS, sui quali si basa la qualità della saldatura, è essenziale scegliere e controllare accuratamente i parametri di processo N e V. Comunque, l'analisi precedente ha mostrato che la velocità di avanzamento e quella di rotazione che massimizzano l'UTS non corrispondono a quelle che massimizzano la YS. Ne nasce un tipico problema d'ottimizzazione multi-risposta che coinvolge esigenze in conflitto tra loro. In questo lavoro, una tecnica d'ottimizzazione simultanea basata sulla funzione di desiderabilità (DF) [16] è stata utilizzata per massimizzare contemporaneamente le due risposte: YS e UTS. In particolare, l'approccio basato sulla DF è stato usato per trovare un compromesso tra le due risposte basandosi sulle equazioni empiriche trovate in precedenza. La DF trasforma una risposta stimata (e.g. la *i*th risposta stimata \hat{y}_i) in un valore adimensionale, chiamata funzione desiderabilità, indicata come d_i per \hat{y}_i , $d_i(\hat{y}_i)$. Esso è un valore compreso tra 0 e 1, all'aumentare della desiderabilità della corrispondente risposta. Se la risposta deve essere massimizzata, come in questo caso, la desiderabilità individuale è definita come:

$$d_i(\hat{y}_i) = \begin{cases} 0 & \text{se } \hat{y}_i < L_i \\ \frac{\hat{y}_i - L_i}{U_i - L_i} & \text{se } L_i < \hat{y}_i < U_i \\ 1 & \text{se } \hat{y}_i > U_i \end{cases}$$

dove L_i e U_i sono i valori minimo e massimo della risposta \hat{y}_i . La DF totale, che varia ancora tra 0 e 1, è definita come la media

geometrica pesata delle desiderabilità individuali (i.e. d_i 's):

$$DF = d_1^{w_1} \times d_2^{w_2} \times d_3^{w_3} \dots, \quad 0 < w_i < 1 \quad \text{e} \quad w_1 + w_2 + w_3 + \dots = 1$$

dove w_i è l'importanza relativa assegnata alla risposta *i*-esima. L'importanza relativa è una scala comparativa usata per pesare ogni singola d_i all'interno della DF totale. Si noti che D dipende dai valori w_i che, quindi, offrono una certa flessibilità nella definizione della funzione DF. Le risposte ottimali sono determinate mediante la massimizzazione di DF, che evidentemente aumenterà quando il bilancio delle singole desiderabilità diventerà più favorevole.

In questo studio, le risposte YS e UTS sono state trasformate nelle seguenti funzioni desiderabilità:

$$d_1 = \begin{cases} 0 & \text{se } YS < YS_{min} \\ \frac{YS - YS_{min}}{YS_{max} - YS_{min}} & \text{se } YS_{min} \leq YS \leq YS_{max} \\ 1 & \text{se } YS > YS_{max} \end{cases}$$

$$d_2 = \begin{cases} 0 & \text{se } UTS < UTS_{min} \\ \frac{UTS - UTS_{min}}{UTS_{max} - UTS_{min}} & \text{se } UTS_{min} \leq UTS \leq UTS_{max} \\ 1 & \text{se } UTS > UTS_{max} \end{cases}$$

Chiaramente d_1 e d_2 aumentano all'aumentare di YS e UTS. La DF totale adoperata è:

$DF = d_1 \times d_2$, perché la stessa importanza è stata attribuita alle due risposte, cioè $w_1 = w_2 = 1$.

I risultati del processo d'ottimizzazione sono riportati nella tabella 5 dove il massimo globale della funzione desiderabilità ($DF = 0.8404$), le migliori risposte, YS e UTS, ed i valori ottimali dei parametri di processo sono anche riportati. Inoltre, il processo di ottimizzazione è stato illustrato mediante i contour plot di DF in figura 8.

Valore ottimo = 0.8404				
Fattore	Risposta	Basso	alto	Ottimo
N		500	900	531
V		150	300	300
	UTS			348
	YS			253

TAB. 5 Risultati dell'ottimizzazione multi-risposta.

Result of the multiresponse optimization.

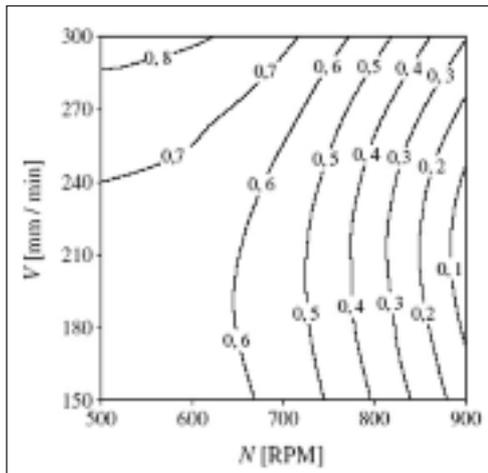


FIG. 8
Contour plot della DF in funzione di N e V.
Contour plot of the overall DF as function of N and V.

Il valore ottimale delle proprietà meccaniche è stato ottenuto a $N = 531$ rpm e $V = 300$ mm/min, che corrisponde a $UTS = 348$ MPa e $YS = 253$ MPa.

Utilizzando i parametri di processo ottimi trovati mediante la precedente analisi, nuove saldature sono state effettuate e nuovi campioni sono stati preparati secondo le procedure prima elencate. Dalle prove statiche compiute su questa nuova serie di provini è emerso che le prestazioni attese sono state rispettate entro i margini dell'approssimazione sperimentale e dell'approssimazione statistica dei modelli empirici sviluppati in precedenza. Infatti, si è trovato un valore medio di $YS = 248$ MPa e di $UTS = 352$ MPa.

Questi giunti, caratterizzati come ottimi dal punto di vista delle proprietà meccaniche statiche, sono stati, quindi, sottoposti a prove di tensocorrosione e di fatica per valutare le loro performance in condizioni d'ambiente aggressivo accoppiato ad un carico statico e di carico variabile. Queste nuove prove hanno il fine di verificare il potenziale utilizzo dei giunti oggetto di questo studio nel settore aeronautico.

I risultati delle prove di SCC sono riportati nelle figure da 9 a 12. Dopo i 30 giorni della prova, i giunti risultano tutti integri, nel senso che non si sono avute rotture. Dopo le usuali operazioni di pulizia e preparazione, i giunti sono stati esaminati per valutarne il livello di danno subito. Parte dei provini risulta fortemente danneggiata da fenomeni di corrosione molto avanzati. In particolare, il materiale base presenta sulla superficie un'estesa corrosione localizzata per vaiolatura (pitting); le cavità sono poche ma di grosse dimensioni, fino raggiungere i 2 mm di diametro, vedi figura 10. Questo vuol dire che lo strato passivante d'ossidi insolubili presente sulla superficie della lega



FIG. 9 **Un giunto dopo la prova di SCC.**
A joint after the SCC test.

è stato rotto localmente per effetto degli elettroliti della soluzione, determinando l'attivazione del processo di corrosione. Al contrario del materiale base, il cordone mostra una modesta suscettibilità alla corrosione, figure 9 e 10.

I pit presenti sul materiale base hanno diametro tanto grande che si è dovuto ricorrere ad ingrandimenti molto bassi per poterli visualizzare nella loro interezza. Tali pit formano delle cavità molto ampie che tendono anche ad esfoliarsi, figura 11. Al confronto col materiale base, come già detto, il cordone di saldatura presenta lievi tracce di corrosione con completa assenza di pit o cavità. Solo una piccola zona in prossimità del nugget mostra un inizio di corrosione intergranulare localizzato alla superficie del provino, figura 11.

Evidentemente questa differenza di resistenza alla corrosione è da ricercarsi nella diversa microstruttura che caratterizza il materiale base ed il cordone di saldatura. Il laminato di partenza, infatti, presenta una marcata anisotropia, dovuta alla lavorazione per deformazione plastica, con grani notevolmente allungati nella direzione di laminazione, coincidente, nella fattispecie, con la direzione d'applicazione del carico. Al contrario, i grani del cordone di saldatura hanno subito un affinamento indotto dall'utensile, con conseguente diminuzione delle dimensioni ed acquisizione di equiassialità da parte della grana cristallina [3, 4]. Ne risulta una risposta all'ambiente aggressivo in presenza di carico statico completamente diverso: il materiale base subisce un pitting violento mentre il cordone di saldatura è completamente immune dal pitting anche se presenta corrosione superficiale intergranulare.

Molto importante per valutare la risposta della materiale e dei giunti alla SCC, è confrontare il comportamento dei provini sottoposti a tensocorrosione con quello d'altri provini sottoposti agli stessi cicli d'immersione, ma a cui non è stato applicata nessuna tensione. Ovviamente, si nota, osservando la figura 12, che la risposta sia del materiale base che dei cordoni è migliore nel caso



FIG. 10 **Macrografie (a) del materiale base, (b) il cordone di saldatura e (c) una vista laterale del cordone di saldatura dopo il test di SCC.**

Macrographs of (a) the base material, (b) the bead and (c) the bead cross section after the SCC test.

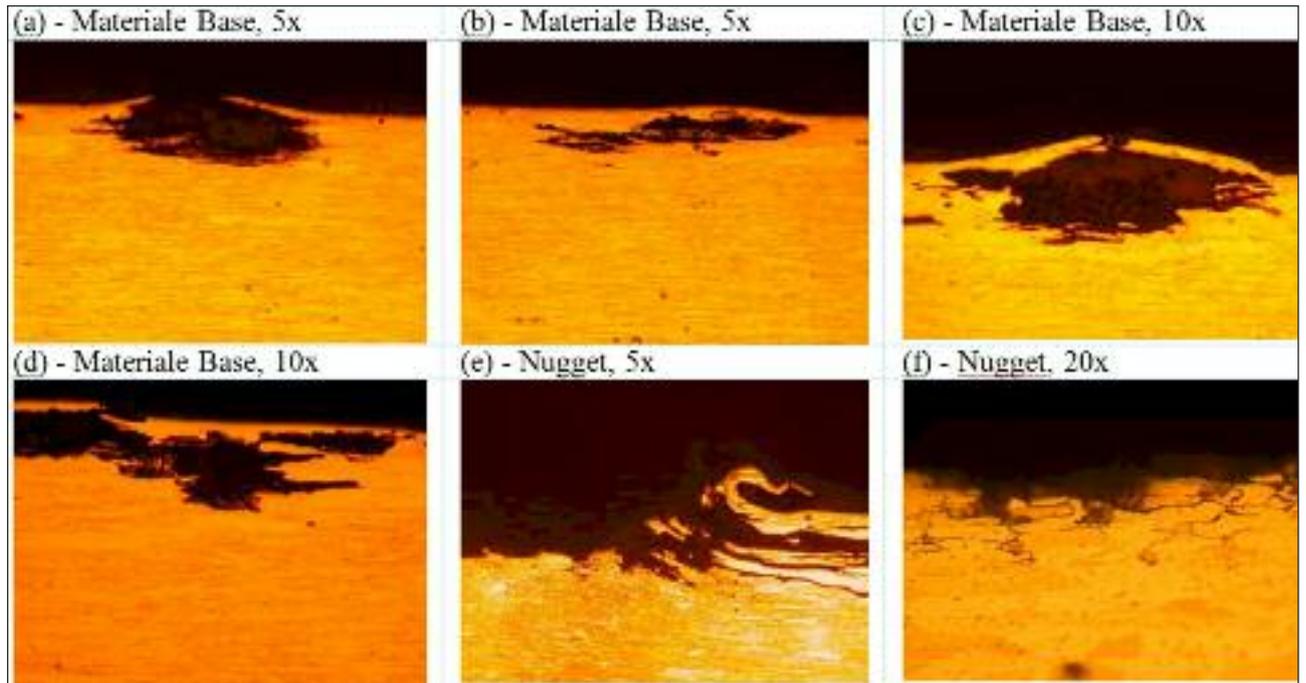


FIG. 11 *Micrografie di differenti zone del provino dopo la prova di SCC.*
Micrographs of different zones of the specimen after the SCC test.

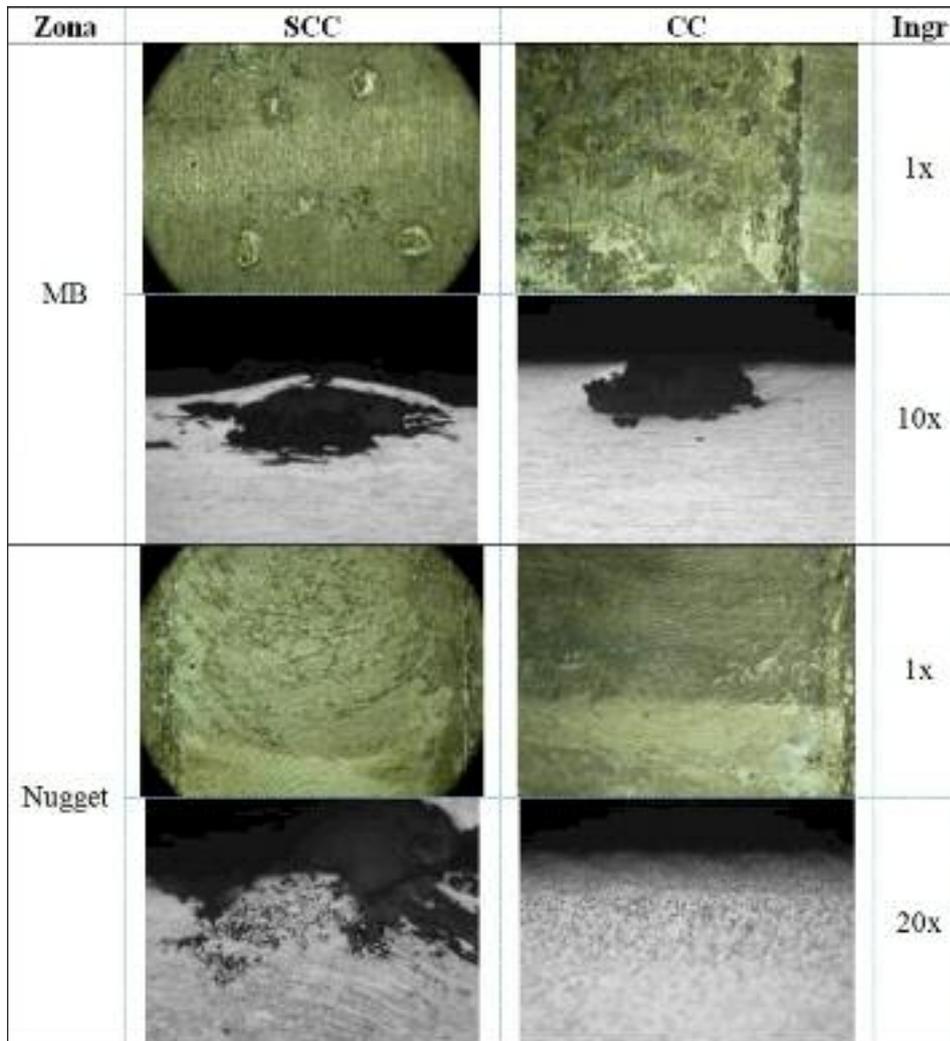


FIG. 12 *Macrografie di confronto tra un provino sottoposto a SCC ad uno sottoposto alla sola prova di corrosione.*
Macrographs of comparison between a specimen after SCC and a specimen after CC.

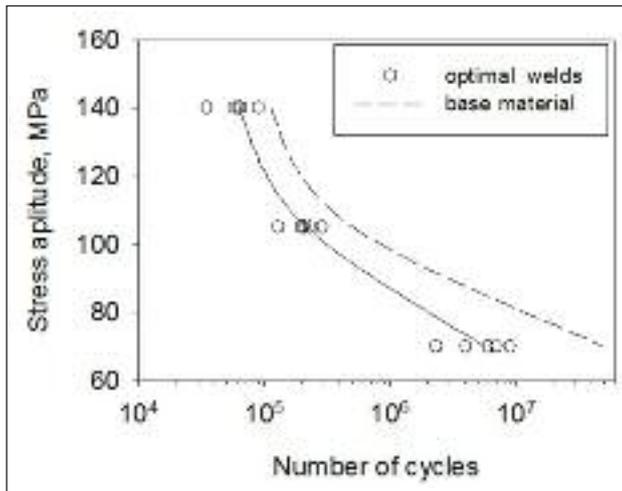


FIG. 13 *Curva di Wöhler dei giunti ottenuti utilizzando i parametri di processo ottimali.*

Wöhler curve of the joints welded using the optimal process parameters.

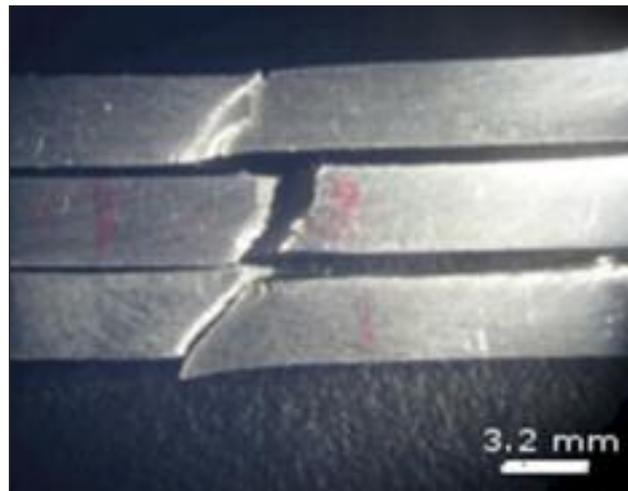


FIG. 14 *Rottura di tre provini sottoposti a prova di fatica all'80% dell'UTS.*

Fracture of three specimens after fatigue test at 80% of UTS.

di semplice corrosione. Infatti, in questo caso, il materiale base presenta dei pit aperti che non mostrano più alcuna tendenza all'esfoliazione, mentre il cordone si presenta completamente integro, tanto che è possibile ancora osservare la presenza delle orme dell'utensile adoperato per la saldatura, vedi la figura 12. La figura 13 riporta la curva di Wöhler dei giunti ottenuti utilizzando i parametri di processo ottimali precedentemente menzionati; questi giunti sono indicati come "optimal welds" in figura. I dati sperimentali sono interpolati da una curva che unisce le vite medie a fatica ad ogni livello di carico. Per confronto, una curva simile, ma riguardante, però, il materiale base è stata aggiunta alla figura. È possibile notare che i campioni esibiscono un'ottima resistenza a fatica, con durate che sono molto vicine a quelle medie del materiale base, al netto dell'effetto di appiattimento causato dalla scala semilogaritmica. Naturalmente, le due curve di Wöhler si allontanano a bassi valori del carico, a causa dell'effetto critico di micro-difetti che, in ogni caso, sono presenti nelle saldature. Comunque, la vita a fatica è ottima e sempre superiore a quella che mostrano saldature di tipo TIG o MIG, com'è noto dai dati presenti nella letteratura scientifica [1, 17].

In modo da poter studiare le modalità del cedimento a fatica, la figura 14 riporta a mo' d'esempio delle macrografie delle superfici di rottura ottenute ai livelli di carico pari al 80% dell'UTS. I provini testati si sono rotti in maniera classica: la cricca che ha causato il cedimento nasce nel cordone di saldatura, evidentemente innescata da microscopici difetti lì presenti. La sua propagazione procede nel cordone di saldatura o a cavallo della zona termo-meccanicamente alterata, seguendo un percorso segnato da punti di debolezza dovuti sempre a difetti causati dalla saldatura. Infine, quando la sezione resistente si è ridotta del necessario, si è registrato il classico cedimento duttile con strizione e linea di frattura inclinata a 45 gradi rispetto all'asse del carico.

CONCLUSIONI

La saldatura FSW della lega d'alluminio 2198 è stata studiata. In particolare, basandosi su analisi statistiche, si è sviluppato un modello empirico capace di prevedere il valore della resistenza allo snervamento, YS, e a rottura, UTS, dei giunti saldati mediante FSW in funzione della velocità di rotazione e d'avanzamento dell'utensile. Dal modello proposto, si evince che YS e UTS raggiungono i valori massimi per differenti valori dei pa-

rametri di processo analizzati. È possibile ottenere dei giunti che massimizzano in maniera bilanciata YS e UTS, ma per far ciò è necessario procedere ad un'ottimizzazione multi-risposta del processo FSW basandosi sul modello empirico trovato. Questa ottimizzazione fornisce i valori d'avanzamento e velocità di rotazione che producono le saldature dotate delle migliori proprietà meccaniche. Infine, queste saldature ottimizzate sono state testate a tensocorrosione ed a fatica al fine di verificarne il potenziale utilizzo nel settore aeronautico. Le prove hanno dimostrato che i giunti ottimizzati, al contrario del materiale base, sono immuni da pitting se soggetti a tensione in ambiente corrosivo e presentano, dopo trenta giorni di prova al 60% del loro UTS, solo una modesta corrosione intergranulare di superficie. Inoltre, la loro resistenza a fatica è paragonabile a quella del materiale base, anche se sempre inferiore a quella di quest'ultimo, ma, comunque, sempre superiore a quella di giunti ottenuti con tecniche di saldatura tradizionale come la TIG o la MIG.

BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Doglione, *Metallurgia Italiana*, 2 (2005), 39 - 50.
- [2] P. Cavaliere, A. De Santis, F. Panella, A. Squillace, *Eng. Fail. Anal.* 16 (2009) 1856-1865.
- [3] C. Bitondo, U. Prisco, A. Squillace, G. Giorleo, P. Buonadonna, G. Dionoro, G. Campanile, *International Journal of Material Forming* 3 (2010) 1079 - 1082.
- [4] C. Padovani, A.J. Davenport, B.J. Connolly, S.W. Williams, A. Groso, M. Stampanoni, F. Bellucci, *Metallurgia Italiana*, 100 (2008), 29 - 42.
- [5] C. Meola, G. Giorleo, U. Prisco, *Materials and Manufacturing Processes*, 18 (2003), 135-144.
- [6] C. Meola, G.M. Carlomagno, U. Prisco, A. Vitiello, *Research in Non-destructive Evaluation*, 15 (2004) 55-63.
- [7] W. Polini, U. Prisco, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 22 (2003) 465-474.
- [8] A.J. Davenport, M. Jariyaboon, C. Padovani, N. Tareelap, B.J. Connolly, S. Williams, E. Siggs, *Journal Materials Science Forum* 519 - 521 (2006), 699 - 704.
- [9] J.B. Lumsden, M.W. Mahoney, C.G. Rhodes, G.A. Pollock, *Corrosion* 59 (2003) 212-219.
- [10] ASTM E 3 - Standard guide for Preparations of Metallographics Specimens.
- [11] ASTM G 44 - Standard Practice for exposure of Metals and alloys by alternate immersion in neutral 3.5% sodium chloride solution.
- [12] ASTM G 47 - Standard test method for determining susceptibility to

- stress corrosion cracking of 2xxx and 7xxx aluminium alloys products.
- [13] ASTM G 49 - Standard practice for preparation and use of direct tension stress corrosion test specimens.
- [14] R.R. Hocking, R.N. Leslie, *Technometrics* 9 (1967) 531-540.
- [15] C.L. Mallows, *Technometrics* 15 (1973) 661-675.
- [16] D.C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, Wiley, New York (2001).
- [17] A. Prisco, F. Acerra, A. Squillace, G. Giorleo, C. Pirozzi, U. Prisco, F. Bellucci, *Advanced Materials Research*, 38 (2008) 306-319.

Abstract

Friction stir welding of AA 2198 T3 rolled sheets in butt configuration

Keywords: Aluminum and alloys, mechanical characterization, electrochemical characterization, welding

Friction-stir welding (FSW) is a solid-state joining process where, in contrast to the fusion welding, the material to be welded does not reach the melting point. Due to its interesting features, a lot of research activities have been carried out on FSW of different materials. In particular, FSW of AA 2198 aluminium alloy has gained wide interest for the fabrication of lightweight structures requiring a high strength-to-weight ratio and a good corrosion resistance.

In this study, rolled plates of AA 2198 T3 aluminium alloy are friction-stir welded in butt configuration varying two fundamental process parameters: rotational and welding speeds. An empirical model based on regression analysis is developed to predict the mechanical strength, in particular yield and tensile strength, of the joints as function of the process parameters under investigation. For the development of the empirical model, a 3^2 full factorial designs with the yield and tensile strength as observed responses is used. Statistical tools such as analysis of variance, F tests, Mallows' CP, coefficient of determination etc. are used to build and to validate the developed models. By using the desirability function approach, the optimum process parameters to simultaneously obtain maximum possible yield and tensile strength are found within the investigated range. The developed models can be effectively used to predict the stationary forces and the mechanical proprieties of the joints at 95% confidence level. Finally, to validate the possible use of FSW of 2198 in the in the aerospace industry, joints welded using the optimum process parameters before identified are tested under stress corrosion cracking and fatigue. Results show that, unlike the base material, the optimized joints are not attacked by pitting if subjected to a tensile stress in a corrosive environment; furthermore, their fatigue life is comparable to that of the base material and longer than that showed by joints welded using traditional techniques, as MIG or TIG.