

ANALISI DELLA FORMAZIONE E DEL COMPORTAMENTO MECCANICO DEL GIUNTO SALDATO MEDIANTE ULTRASUONI

M. Annoni^a, M. Carboni^b

^a *Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, via Bonardi 9 – 20133 Milano, e-mail: massimiliano.annoni@polimi.it*

^b *Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, via La Masa 34 – 20156 Milano, e-mail: michele.carboni@polimi.it*

SOMMARIO

La tecnologia a ultrasuoni ad alta potenza viene attualmente applicata in svariati contesti industriali. Il taglio e la fresatura a ultrasuoni, in particolare, trovano utilizzo dall'industria alimentare alla lavorazione di materiali compositi a elevata durezza; per tali applicazioni, inoltre, è disponibile una vasta letteratura. La saldatura a ultrasuoni, invece, vanta poche ma ben avviate applicazioni riguardanti, ad esempio, i connettori elettrici o le tubazioni in rame per impianti di condizionamento; pochi studi sono disponibili in letteratura a riguardo.

La saldatura a ultrasuoni di lamierini di alluminio è stata studiata sperimentalmente in questo lavoro inizialmente da un punto di vista metallurgico, allo scopo di comprendere meglio la natura del giunto ottenibile grazie a diverse condizioni superficiali all'interfaccia e, successivamente, dal punto di vista del comportamento meccanico statico e a fatica, nell'ottica di valutare le possibilità di applicazione di questo processo nel campo automobilistico, dove esso può rappresentare un'alternativa efficace alla saldatura a resistenza per punti, al clinching o alla rivettatura autoproforante.

ABSTRACT

High power ultrasonic technology is nowadays applied in a number of industrial fields. In particular, ultrasonic cutting and milling are used from alimentary industry to manufacturing of high hardness composites; moreover, for such applications a lot of researches are available in the literature. Ultrasonic welding, instead, is applied in a few fields, such as electric connections or copper tubes for air conditioning plants, and very few researches are available in the literature.

In the present paper, the ultrasonic welding of thin aluminium sheets has been studied firstly regarding the metallurgical aspects concerned with the quality of the joint due to the preparations of surfaces and, eventually, regarding the static and fatigue behaviour, in order to evaluate the possibility to adopt this technology in the automotive industry, where it could be a good alternative to spot welding, clinching or self-pierce riveting.

1. INTRODUZIONE

La saldatura ad ultrasuoni di materiali metallici (UltraSonic Metal Welding - USMW) è un processo di saldatura allo stato solido che permette di giuntare a "sovrapposizione" due o più lamiere sottili (fino ad uno spessore massimo pari a 3 mm) prodotte anche in leghe metalliche diverse tra loro (preferibilmente non ferrose). Il processo a ultrasuoni realizza il giunto saldato mediante l'azione di forze tangenziali oscillanti ad elevata frequenza; un carico normale statico viene applicato alle lamine durante il processo sia per esigenze di fissaggio delle parti sia per produrre la deformazione plastica desiderata all'interfaccia [1]. La temperatura cresce nella zona di saldatura a causa dell'attrito: questo fenomeno promuove il flusso plastico che realizza la saldatura stessa. La temperatura raggiunge livelli massimi attorno al 50 % del punto di fusione [2] nonostante alcuni studi meno recenti [3,4] indichino la presenza di microtracce locali di fusione all'interfaccia di saldatura. In ogni caso, tra i vantaggi dell'USMW, si può indicare l'assenza di zone termicamente alterate.

Nella presente memoria è stata studiata sperimentalmente la saldatura a ultrasuoni di lamiere sottili in alluminio. Inizialmente, è stato affrontato l'aspetto metallurgico allo scopo di comprendere meglio la qualità del giunto ottenibile grazie a diverse condizioni superficiali all'interfaccia. Successivamente, è stato analizzato il comportamento a fatica nell'ottica di valutare la possibilità di applicazione di questo processo nel campo automobilistico, dove esso può rappresentare un'alternativa efficace alla saldatura a resistenza per punti [5-6], al clinching [7-9] o alla rivettatura autoperforante [10].

1.2. Architettura del sistema USMW e parametri tecnologici

Una saldatrice a ultrasuoni è composta da un generatore e da una testa di saldatura. Il generatore trasforma il segnale elettrico della rete in un segnale caratterizzato da alta tensione e alta frequenza: 3 kV e 20 kHz nel caso in esame. Questa tensione alimenta un trasduttore piezoelettrico che la converte in una vibrazione meccanica alla medesima frequenza. La vibrazione meccanica attraversa un amplificatore meccanico, chiamato *booster*, e raggiunge l'utensile di saldatura, il *sonotrodo* (Tab. 1). L'estremità del sonotrodo, solitamente zigrinata, trascina il lamierino superiore durante il ciclo di saldatura, mentre il lamierino inferiore è solidale all'*incudine*, anch'essa zigrinata, su cui è premuto grazie alla forza normale. Per mantenere il corretto allineamento dei lamierini si è utilizzata una coppia di guide metalliche (Tab.1) appositamente realizzate.

I parametri di lavoro del processo di saldatura ad ultrasuoni sono (Tab. 1):

- l'ampiezza di vibrazione;
- la durata della vibrazione ultrasonora (*tempo di vibrazione*);
- l'energia richiesta in un ciclo di saldatura (*energia di vibrazione*);
- la forza normale statica di serraggio applicata ai lamierini da unire (*forza di serraggio*);
- il tempo che intercorre tra l'applicazione della forza di serraggio e l'inizio della vibrazione (*tempo di pre-impulso*);
- il tempo che intercorre tra il termine della vibrazione e il termine dell'applicazione della forza statica (*tempo di post-impulso*).

Tabella 1 - Sistema di saldatura ad ultrasuoni per metalli lateral drive disponibile presso il Politecnico di Milano (sinistra); data sheet del sistema (destra)

	Saldatrice a ultrasuoni per materiali metallici	STAPLA Ultraschall-Technik GmbH, modello: Albatros 20
	Potenza ultrasonora	3000 W max.
	Caratteristiche elettriche	230 VAC; 50 Hz; 20 A
	Frequenza di vibrazione	20 kHz \pm 10%
	Corsa verticale massima	15 mm
	Ampiezza di vibrazione	20÷40 μ m
	Tempo di vibrazione	0,05÷2,50 s
	Forza normale statica	690÷2680 N
	Pressione dell'aria	2÷6,5 bar (0,2÷0,65 MPa)
	Tempo di pre-impulso	0,01÷0,99 s
	Tempo di post-impulso	0,01÷0,1 s
	Diametro punta sonotrodo	3,5-5,5-7,5-9,5 mm

1.3. Processo di formazione dei giunti saldati mediante ultrasuoni

Durante l'operazione di saldatura, l'interfaccia tra i lamierini subisce profonde alterazioni [2]. In particolare, il processo può essere suddiviso in quattro fasi:

- inizialmente viene applicata la forza statica di serraggio e le protuberanze presenti sulle due superfici vengono in contatto; ossidi e contaminanti rimangono all'interfaccia tra i due lamierini;
- successivamente, attivata la vibrazione ultrasonora, le protuberanze in contatto subiscono una deformazione localizzata. Queste zone di contatto, inizialmente limitate e posizionate in corrispondenza di poche irregolarità, crescono in numero e dimensione durante la vibrazione. Questo processo rompe lo strato di contaminanti e permette il contatto metallo-metallo, producendo l'adesione;
- la deformazione nel materiale produce calore, il quale riduce la resistenza del materiale mentre l'area di saldatura cresce;
- alla fine del ciclo di saldatura, l'area di contatto è completamente coperta da materiale deformato e il contatto metallo-metallo si ha sull'intera interfaccia di saldatura.

La descrizione del fenomeno della saldatura ad ultrasuoni proposta da De Vries [2] è in accordo con Rozenberg [11], il quale offre una spiegazione microstrutturale. Durante la distruzione del sottile film di ossidi e contaminanti, le superfici di contatto appaiono come strati amorfi con un elevato numero di

difetti puntuali e lineari (dislocazioni) che forniscono al materiale elevata energia interna. Il fenomeno di formazione delle giunzioni metalliche è promosso dall'incremento della probabilità di coincidenza delle orientazioni cristallografiche dei grani sulla superficie che deve essere saldata.

Tale descrizione del processo spiega come il flusso plastico possa essere uno dei fattori principali che determina la resistenza in un giunto saldato mediante ultrasuoni. Tuttavia, altri studi in letteratura suggeriscono che la diffusione allo stato solido [1] o il fenomeno di fusione [3,4] giochino un ruolo fondamentale nella saldatura a ultrasuoni. In ogni caso, tutti i precedenti autori concordano nell'attribuire all'attrito il ruolo di fattore principale in grado di generare tutti gli altri fenomeni che avvengono all'interfaccia.

2. INFLUENZA DELLE CONDIZIONI SUPERFICIALI SULLA FORMAZIONE E SULLE PERFORMANCE STATICHE DEL GIUNTO

Vista l'importanza dei fenomeni di attrito nella formazione del giunto, particolare attenzione è stata posta nell'indagare su quale condizione superficiale iniziale sia in grado di produrre le migliori performance statiche. In questa fase, il piano sperimentale può essere suddiviso in due parti: la caratterizzazione statica dei giunti ottenuti per diverse condizioni superficiali dei provini e l'analisi della loro struttura morfologica e microstrutturale. I provini da saldare sono stati ottenuti da lamierini in lega di alluminio AA6022-T4 dello spessore di 1,2 mm (Tab. 2) sovrapposte per 15 mm (condizioni tipiche nell'industria automobilistica). Le prove sono state realizzate su lamierini preparati in modo da presentare diverse condizioni all'interfaccia:

- lamierini sgrassati con acetone (*degreased*);
- lamierini non trattati (*untreated*);
- lamierini lubrificati con olio minerale (*oil lubricated*);
- lamierini lubrificati con Teflon spray (*Teflon® lubricated*).

Tabella 2 - Layout dei provini e parametri di saldatura costanti selezionati

	Ampiezza di vibrazione (μm)	40
	Tempo di vibrazione (s)	1,2
	Forza normale statica (N)	1130
	Tempo di pre-impulso (s)	0,45
	Tempo di post-impulso (s)	0,05
	Diametro della punta del sonotrodo (mm)	5,5
	Direzione di vibrazione	trasversale
	Corsa verticale del sonotrodo (mm)	2,8
	Numero di ripetizioni	5

I giunti sono stati ottenuti nella configurazione di saldatura trasversale, ovvero la condizione in cui l'asse dei lamierini è perpendicolare alla direzione di vibrazione. La scelta dei parametri di saldatura costanti per tutte le prove eseguite (Tab. 2), è stata effettuata in base alle condizioni che hanno permesso di realizzare giunti dalle buone caratteristiche meccaniche in base a esperimenti preliminari. L'unico parametro variabile nella sperimentazione effettuata è stata la condizione superficiale all'interfaccia tra i lamierini da saldare.

Il carico di rottura dei giunti saldati è stato determinato in accordo con le norme ISO 14273:2003 [12] e ISO 14329:2003 [13] riguardanti le prove distruttive su saldature per punti in provini di acciaio. La scelta è stata dettata dal fatto che non è stato possibile individuare alcuna normativa utile riguardo alla saldatura a ultrasuoni dell'alluminio.

Sono state eseguite cinque prove di trazione a taglio, per ogni configurazione superficiale considerata, mediante una macchina di prova servo-idraulica mono-assiale MTS (carico massimo nominale 100 kN) utilizzata in controllo di spostamento (1 mm/min). Le osservazioni metallografiche sono state effettuate sulla sezione trasversale mediana in corrispondenza di ogni punto di saldatura.

In riferimento alla Fig. 1, si riportano i risultati delle prove sperimentali:

- il tipo di giunto ottenuto utilizzando lamierini di alluminio sgrassati con acetone, osservato al microscopio dopo attacco Barkel in luce polarizzata, non presenta più in modo evidente l'interfaccia di separazione. L'osservazione micrografica mostra come la microstruttura rimanga sostanzialmente invariata per bassi ingrandimenti (100x) rispetto alla struttura base della lega (Fig. 2): non risulta alcuna zona termicamente alterata e non c'è evidenza di

fusione. Ad ingrandimenti maggiori (500x) è possibile stimare come lo spessore della zona saldata, cioè la zona interessata dal flusso plastico, sia dell'ordine di 30 μm e abbia principalmente coinvolto la superficie dei provini senza modificare né la forma né la dimensione dei grani. Nella prova a taglio si è ricavato un valore medio di carico di rottura pari a 2145 N con una deviazione standard di 122 N. La frattografia conferma come soltanto la superficie sia stata coinvolta nella saldatura;

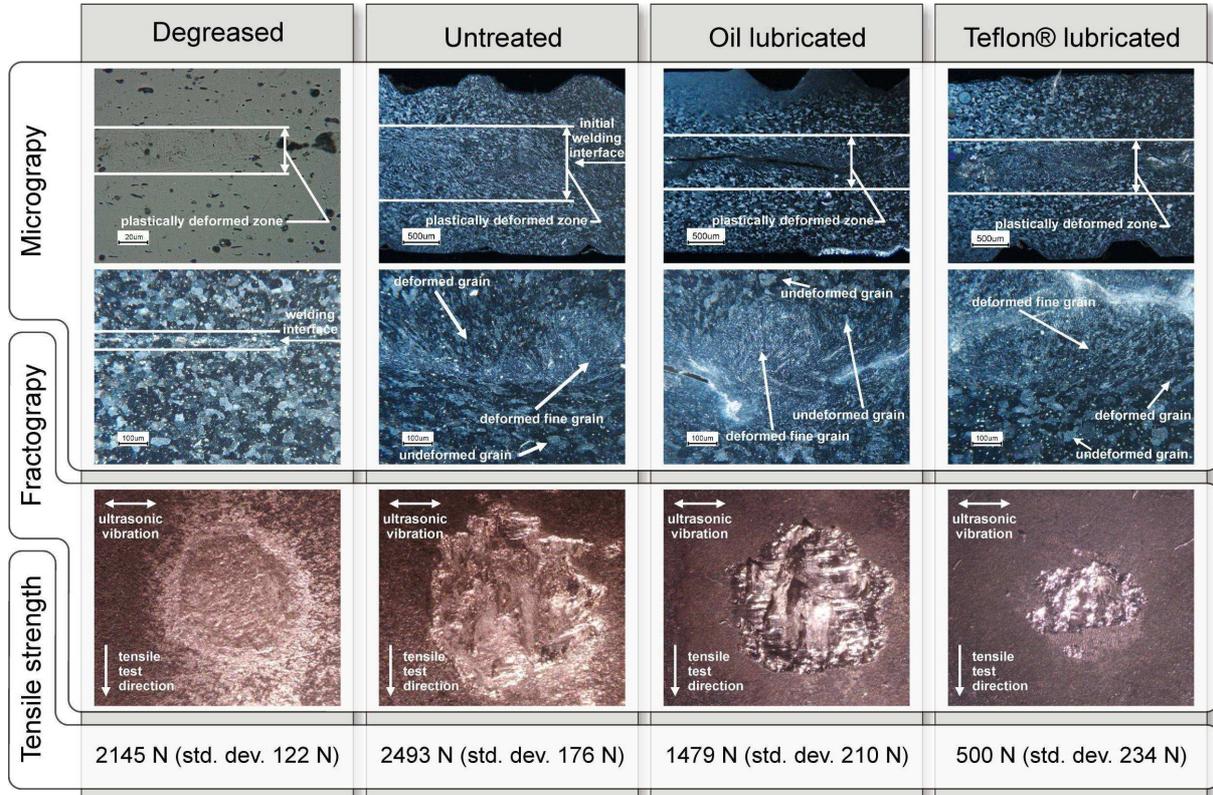


Fig. 1 - Risultati della saldatura. Prima riga: interfaccia di saldatura dopo attacco Barkel (luce polarizzata) (degreased: 500x; altri: 25x). Seconda riga: interfaccia di saldatura (100x) dopo attacco Barkel (luce polarizzata). Terza riga: frattografie dopo la prova a taglio (6x)

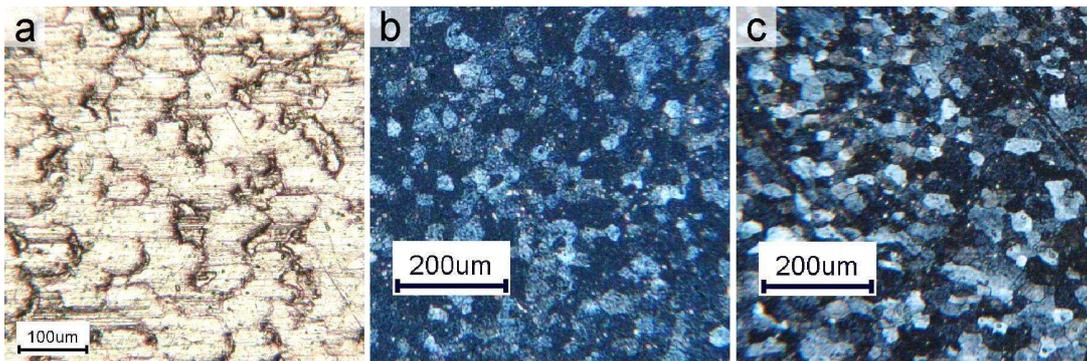


Fig. 2 - Lamierini nello stato di fornitura: a) superficie non trattata (100x); b) superficie lucidata (50x); c) sezione trasversale lucidata (50x)

- nel caso dei giunti di saldatura ottenuti da lamierini non trattati, si può supporre la presenza iniziale di un sottile strato di contaminanti all'interfaccia. Dalle micrografie si osserva che non è visibile chiaramente alcuna interfaccia di separazione, ma è evidente la continuità tra i due lamierini saldati. E' possibile notare le alterazioni occorse alla microstruttura durante il processo di saldatura rispetto alle condizioni di fornitura: è visibile una vasta zona deformata plasticamente (spessore: 240 μm) all'interfaccia tra i due lamierini; la dimensione del grano cristallino si è ridotta notevolmente, al punto da non essere visibile anche a 500 ingrandimenti. La deformazione plastica appare anche in zone 500 μm lontane dalla posizione nominale

dell'interfaccia di saldatura. L'importanza del flusso plastico nella formazione del giunto è palese; questa tesi è avvalorata dall'aspetto dell'interfaccia fra i campioni, considerando la sua probabile posizione dopo la saldatura: essa appare considerevolmente corrugata attorno a dei punti di nucleazione. Anche ad elevati ingrandimenti non si ha alcuna evidenza di fusione e, in ogni caso, anche per questa condizione sperimentale tale fenomeno non sembra essere responsabile della formazione del giunto. Il carico di rottura assume un valore medio di 2493 N con una deviazione standard di 176 N;

- Il giunto prodotto usando lamierini lubrificati mediante olio minerale, presenta una morfologia leggermente differente: la continuità metallica tra i due lamierini è visibile soltanto in una zona molto limitata. La presenza di olio lubrificante durante il ciclo di saldatura ha ridotto i punti di contatto metallo-metallo: in questo modo la saldatura è avvenuta solo in una piccola area. La figura mostra come, sebbene l'area saldata sia molto piccola, l'intera zona al di sotto del sonotrodo sia caratterizzata da uno strato a elevato spessore (250 μm) dove i grani appaiono considerevolmente distorti e raffinati. Anche in questo caso non vi è evidenza di fusione. Il carico di rottura assume un valore pari di 1479 N con una deviazione standard di 210 N. La frattografia di uno di questi giunti evidenzia una profonda ma concentrata penetrazione della saldatura;
- i risultati ottenuti per i giunti saldati partendo da lamierini lubrificati mediante Teflon spray sono molto simili ai precedenti: la continuità metallica è presente solo in una piccola zona dove la deformazione plastica è molto evidente. Il carico di rottura ha registrato un valore medio di 500 N e una deviazione standard di 234 N; l'elevata penetrazione in un'area limitata non si è dimostrata sufficiente per conferire buone caratteristiche meccaniche al giunto, affette anche da un'elevata variabilità dovuta alla creazione di pochi punti di contatto tra i due lamierini.

In generale, le curve carico-allungamento hanno evidenziato come i giunti ottenuti per la condizione *untreated* manifestino comportamento duttile, sintomo della buona e omogenea penetrazione della saldatura nel materiale base; al contrario, i giunti *degreased* si comportano come previsto per una saldatura di scarsa penetrazione o per adesione.

3. COMPORTAMENTO A FATICA

Il comportamento a fatica del giunto USMW è stato analizzato considerando, viste le migliori performance, la condizione *untreated* di formazione del giunto. Le prove sono state eseguite mediante la macchina di prova servo-idraulica mono-assiale INSTRON 8501 (carico nominale massimo pari a 100 kN) in controllo di forza, a rapporto di ciclo pari a 0,1 e ad una frequenza di 50 Hz. Nell'ottica di comprendere l'influenza della configurazione geometrica della saldatura, sono stati considerati quattordici provini saldati su singolo punto e quattordici su doppio punto (Fig. 3). Nel caso del punto singolo, le dimensioni e la sovrapposizione dei lamierini è stata mantenuta uguale a quanto riportato in Tab. 2, mentre nel caso del punto doppio è stata aumentata la lunghezza di sovrapposizione (e di conseguenza quella dei lamierini, allo scopo di mantenere la lunghezza totale del provino uguale a 250 mm) in modo da poter realizzare i punti ad una distanza di 22 mm. E' poi necessario aggiungere che i parametri tecnologici adottati per realizzare entrambe le tipologie di giunto sono gli stessi riportati in Tab. 2.

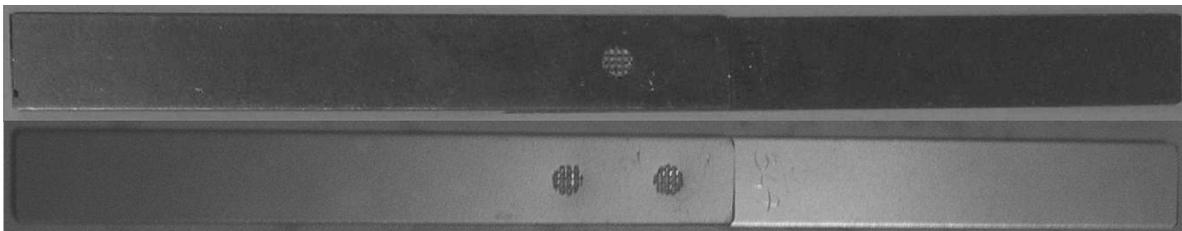


Fig. 3 – Configurazioni geometriche considerate nelle prove di fatica: punto singolo (sopra), punto doppio (sotto)

Per meglio caratterizzare il lotto di provini su cui sono state eseguite le prove di fatica, alcuni campioni (quattro per il punto singolo e tre per il punto doppio) sono stati rotti a trazione (Fig. 4). Nel caso del singolo punto, è possibile notare la differenza dei risultati ottenuti tra le differenti prove, che si concretizza in una media del carico di rottura pari a 2800 N con una deviazione standard pari a 340 N. Questi dati, confrontati con quelli riportati in Fig. 1, evidenziano ulteriormente la natura statistica delle prestazioni del giunto a ultrasuoni. Nel caso del punto doppio, invece, i risultati sembrano essere più ripetibili e sono caratterizzati da un carico medio di rottura pari a 4389 N e una deviazione standard

pari a 198 N. E' interessante notare come il doppio punto non presenti caratteristiche di resistenza doppie rispetto al punto singolo. Evidentemente non vale una semplice sovrapposizione degli effetti. I valori medi del carico di rottura sono quindi stati utilizzati per fissare i livelli del carico massimo da applicare durante le prove di fatica (in termini percentuali). Il numero di cicli per decretare la prova "run-out" è stato fissato a 5×10^6 . La Fig. 5 mostra i risultati ottenuti per le due tipologie di giunto.

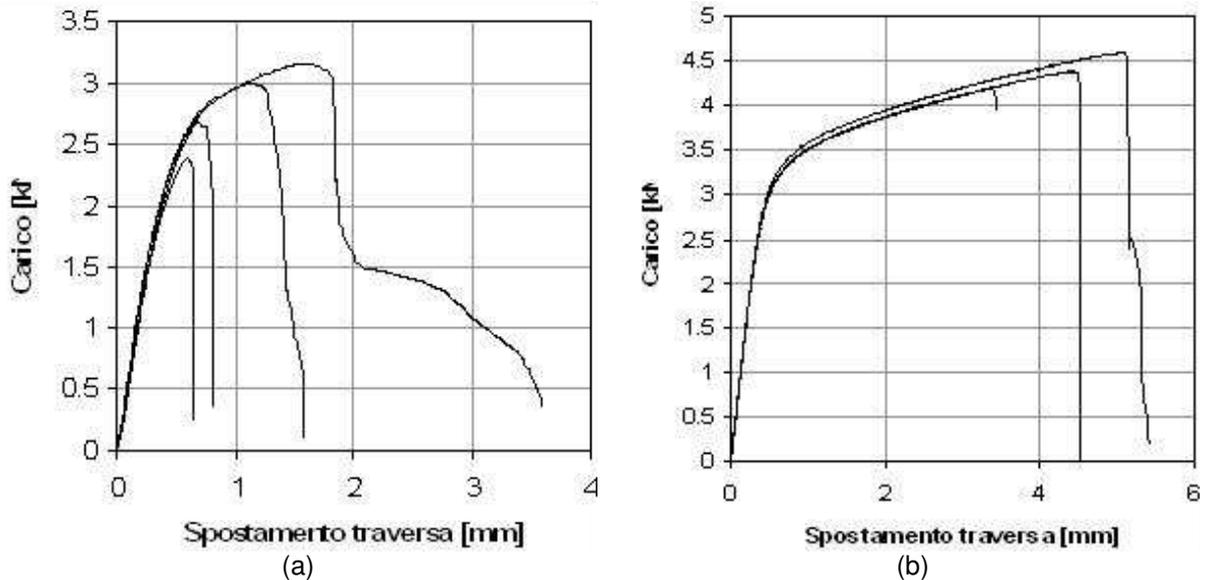


Fig. 4 – Risultati delle prove di trazione eseguite sul lotto di provini da testare a fatica: a) punto singolo; b) punto doppio

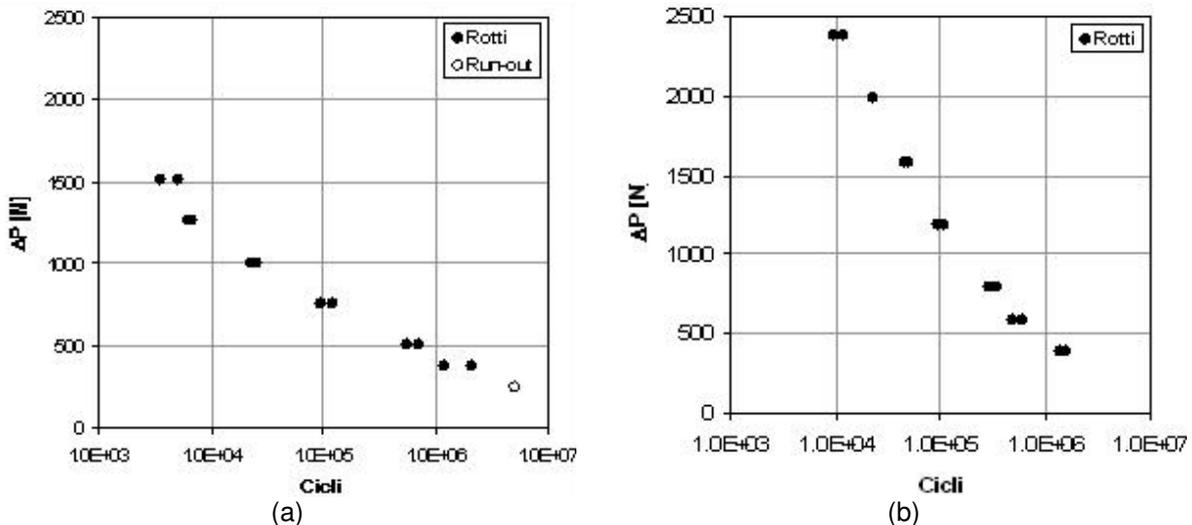


Fig. 5 – Risultati delle prove a fatica: a) punto singolo; b) punto doppio

Dall'osservazione dei diagrammi S-N riportati in Fig. 5 si può innanzitutto notare che, come atteso, il giunto a doppio punto presenta vita a fatica più lunga a pari carico applicato rispetto al giunto a singolo punto. Quest'ultimo, di contro, presenta due provini run-out per un livello di carico P_{max} uguale a 280 N (10% del carico di rottura), mentre il giunto a punto doppio per P_{max} pari a 440 N (10% del carico di rottura) presenta rotture a numero di cicli ancora lontani dal run-out. Ciò significa che per trovare il run-out nei giunti a doppio punto si dovrebbe diminuire ulteriormente il carico applicato, già basso rispetto alle prestazioni di altre tipologie di saldature per punti quali lo spot welding (per il quale il run-out a $R=0,1$ si osserva al 30% del carico di rottura [5-6]) o clinching (per il quale il run-out a $R=0,1$ si osserva al 50% del carico di rottura [9]). Si potrebbe quindi concludere che le performance a fatica del giunto in alluminio saldato ad ultrasuoni siano evidentemente limitate, almeno rispetto ad altre tecnologie.

Analizzando macroscopicamente le rotture ottenute sui giunti a punto singolo, è stato possibile individuare due tipologie fondamentali per i processi di danneggiamento e cedimento. Il primo tipo di danneggiamento (Fig. 6) è stato osservato prevalentemente nei giunti testati ad alti livelli di carico e

consiste nel cedimento per scorrimento e distacco dei lamierini. Può avvenire per lacerazione di uno dei due lamierini con conseguente formazione di un foro (detto "plug", Fig. 6a) oppure per semplice scorrimento (Fig. 6b). Si ritiene che l'osservazione di una modalità o dell'altra dipenda dalla qualità del giunto considerato: per giunti appartenenti alla coda alta della distribuzione della resistenza, è il materiale attorno al punto a lacerarsi a causa del forte effetto di intaglio dovuto alle impronte del punzone e della matrice; quando invece il giunto proviene dalla coda bassa della resistenza è la saldatura stessa a scorrere e a cedere.

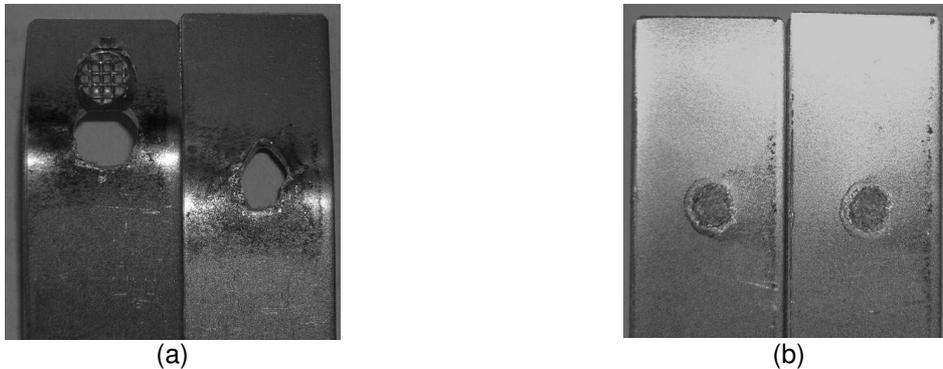


Fig. 6 – Cedimento del punto singolo per lacerazione (a) o scorrimento (b)

Il secondo tipo di cedimento, osservato per bassi carichi applicati, consiste nella nucleazione e nella propagazione di cricche al bordo del punto di saldatura (Fig. 7). La separazione tra i lamierini avviene o non avviene dipendentemente dall'entità del carico applicato: bassi carichi non separano il giunto perché interviene preventivamente la grande deformazione, mentre bassissimi carichi permettono alla cricca di propagare sino ai bordi del giunto. La nucleazione avviene al bordo del punto di saldatura a causa dell'effetto di intaglio delle impronte di matrice (incudine) e punzone (sonotrodo). Ciò è perfettamente in accordo con quanto si trova in letteratura considerando altre tecnologie di saldatura per punti (spot welding e clinching) che vedono la nucleazione di cricche esattamente nella stessa posizione se soggette a carichi di fatica. Le cricche nucleano sia dal lato matrice sia dal lato punzone, però è interessante notare che il lamierino che vede la separazione è sempre quello sul lato matrice (incudine), quasi a suggerire che l'effetto di intaglio da questo lato sia più gravoso.

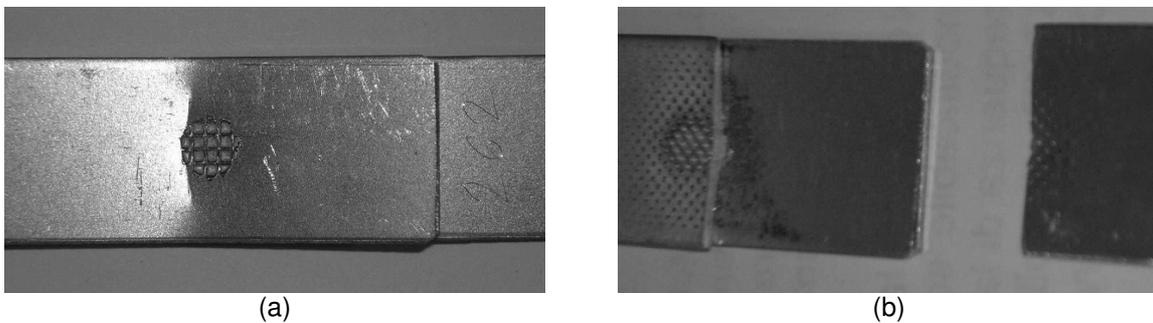


Fig. 7 – Cedimento del punto singolo per nucleazione e propagazione: a) lato punzone; b) lato matrice

Considerando invece il caso del giunto a doppio punto, è stato possibile osservare, a qualsiasi livello di carico applicato, solo il cedimento per nucleazione e propagazione (Fig. 8) nelle due versioni con e senza distacco. Anche in questo caso tutte le separazioni sono state osservate dal lato matrice in corrispondenza del punto di saldatura più vicino all'applicazione del carico.

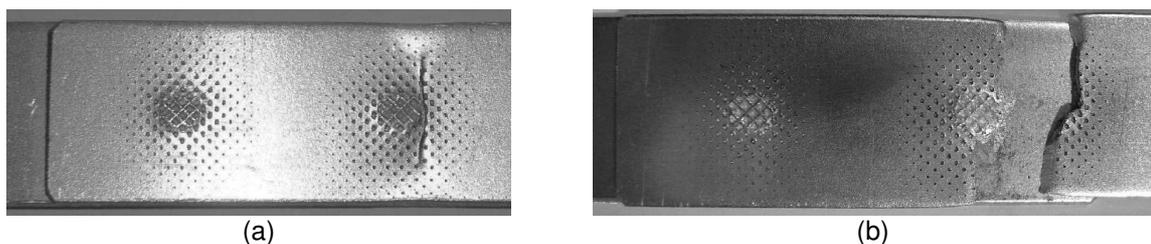


Fig. 8 – Cedimento del punto doppio per nucleazione e propagazione

4. CONCLUSIONI

Questo lavoro si è focalizzato sulla spiegazione dei fenomeni alla base della formazione del giunto e del comportamento statico e a fatica per la saldatura a ultrasuoni di leghe d'alluminio.

Le prove sperimentali di trazione su lamierini caratterizzati da differenti condizioni superficiali hanno dimostrato come l'attrito sia il fenomeno iniziale più importante, in grado di innescare il flusso plastico e di generare la saldatura. In funzione delle condizioni all'interfaccia, l'attrito produce il contatto metallo-metallo e la deformazione in un numero variabile di piccole zone: quando si hanno poche aree di contatto, come nel caso di interfaccia lubrificata con olio o con Teflon spray, la penetrazione della saldatura è molto profonda in questi punti ma non sufficiente per ottenere dei carichi di rottura elevati; oltretutto risulta molto elevata la variabilità di questo parametro. Quando le condizioni all'interfaccia sono più omogenee, come nel caso delle superfici sgrassate o non trattate, la saldatura ha luogo su aree più estese. In particolare, la saldatura di lamierini non trattati ha registrato le migliori caratteristiche: questo fatto potrebbe dimostrare come non sia richiesto alcun trattamento particolare delle lamiere per migliorare le caratteristiche della saldatura. In ogni caso la saldatura sembra avvenire grazie a fenomeni di deformazione plastica: nessuna traccia di fusione localizzata è stata rilevata.

L'analisi sperimentale del comportamento a fatica di giunti a singolo e doppio punto di saldatura ha però principalmente evidenziato i limiti di competitività di questa tecnologia rispetto ad altre atte alla saldatura per punti, benché i meccanismi di danneggiamento e cedimento siano molto simili a livello macroscopico a quelli osservati dalle altre tecnologie. La principale causa di queste osservazioni sembra poter essere imputata alla elevata severità delle impronte lasciate dagli utensili durante il processo di formazione del giunto. Tale aspetto merita ulteriori approfondimenti, unitamente al ruolo giocato dalla diversa disposizione dei giunti nelle configurazioni basate su molteplici punti di saldatura.

5. RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano Valerio Mussi, Nicoletta Fenucci e Daniele Ferrari per il valido supporto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Devine J. Ultrasonic welding, in: ASM Handbook volume 6: Welding, brazing, and soldering, Materials Park, ASM international. 1993;324-327.
- [2] De Vries E. Mechanics and mechanisms of ultrasonic metal welding. Ohio State University Thesis, Columbus, Ohio, K. Graff. 2004.
- [3] Weare N.E., Antonevich J. N., Monroe R. E. Fundamental studies of ultrasonic welding. Welding Journal, Welding research supplement. 1960; 8:331s-341s.
- [4] Kreye H. Melting Phenomena in Solid State Welding Processes. Welding Journal, Welding research supplement. 1977; 5:154s-158s.
- [5] Satoh T, Abe H, Nakaoka T, Hayata . The fatigue life of the spot-welded joint under a repeated load of $R = 1$: Comparison of mild steel and high strength steel. Welding in the World 1996;37:12-15.
- [6] Rada D, Sonsino CM. Fatigue assessment of welded joints by local approaches. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 1998.
- [7] Nong N, Keu O, Liu Y, Hiyuan Q, Changcheng T, Feipeng L. Research on press forming technology for automotive metallic sheets. Jnl Mat Proc Tech 2003;137:159-163.
- [8] Davies R, Pedreschi R, Sinha BP. The shear behaviour of press-forming in cold-formed steel structures. Thin-Walled Struct 1996;25:153-170.
- [9] Carboni M, Beretta S, Monno M. FATIGUE behaviour of TENSILE-SHEAR LOADED clinched joints. Eng. Fract. Mech. 2006: 73:178-190.
- [10] Fu M, Mallick PK. Fatigue of self piercing riveted joints in aluminium alloy 6111. Int Jnl of Fatigue 2003;25:183-189.
- [11] Rozenberg L.D. Physical Principles of Ultrasonic Technology. Plenum Press, New York, USA, 1970.
- [12] ISO 14273:2003, Specimen dimensions and procedure for shear testing resistance spot seam and embossed projection welds, Genève (Switzerland), ISO, 2003.
- [13] ISO 14329:2003, Destructive tests of welds - Failure types and geometric measurements for resistance spot, seam and projection welds, Genève (Switzerland), ISO, 2003.