

C. Gambaro, L. Fratini, A. Squillace
J. Adamowski, M. Ponte, G. Buffa

Friction Stir Welding

Introduzione alla tecnologia



Copyright © MMIX
ARACNE editrice S.r.l.

www.aracneeditrice.it
info@aracneeditrice.it

via Raffaele Garofalo, 133 A/B
00173 Roma
(06) 93781065

ISBN 978-88-548-2530-7

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,
di riproduzione e di adattamento anche parziale,
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: febbraio 2009

Indice

CAPITOLO I - Il processo friction stir welding

1.1	Introduzione	11
1.2	Vantaggi e svantaggi	14
1.3	Metallurgia dei giunti	15
1.4	Flusso del materiale in giunti testa a testa	18
1.5	Difettosità	28
1.6	Bibliografia	31

CAPITOLO II – Attrezzature

2.1	Introduzione	35
2.2	Caratteristiche del materiale con cui realizzare l'utensile	37
2.3	Geometria dell'utensile	39
2.4	Tipologie di utensile	39
2.5	Bibliografia	46

CAPITOLO III - Parametri di processo

3.1	Introduzione	47
3.2	Angolo di inclinazione dell'utensile	48
3.3	Velocità di rotazione dell'utensile	48
3.4	Profondità di penetrazione dell'utensile	52
3.5	Velocità di avanzamento (velocità di saldatura)	53
3.6	Forze applicate	53
3.7	Un esempio	61
3.8	Temperatura del materiale durante la saldatura	64
3.9	Apporto termico e potenza	71
3.10	Bibliografia	74

CAPITOLO IV - Giunti a geometria particolare

4.1	Introduzione	77
4.2	Giunti a 't'	77
4.3	Giunti 3d	79
4.4	Giunti tra pezzi di spessore differente	82
4.2	Il processo friction stir spot welding	84
4.3	Bibliografia	87

CAPITOLO V - Saldabilità FSW di diversi materiali

5.1	Introduzione	91
5.2	Leghe d'alluminio	91
5.2.1	Trattamenti post welding per giunti in leghe di alluminio	100
5.3	Compositi a matrice metallica	103
5.4	Acciai	109
5.5	Altri materiali	120
5.5.1	Leghe di titanio	120
5.5.2	Leghe di rame e di nichel	124
5.5.3	Leghe di magnesio	125
5.5.4	Materiali polimerici termoplastici	129
5.6	Giunti tra materiali dissimili	131
5.7	Bibliografia	135

CAPITOLO VI - Applicazioni industriali

6.1	Introduzione	141
6.2	Applicazioni in campo navale	141
6.3	Applicazioni in campo automobilistico	143
6.4	Applicazioni in campo ferroviario	145
6.5	Applicazioni in campo aeronautico ed aerospaziale	146
6.6	Bibliografia	148

CAPITOLO VII - Aspetti economici

7.1	Introduzione	151
7.2	Bibliografia	155

CAPITOLO VIII - Simulazione numerica di processi FSW

8.1	Introduzione	157
8.2	Un modello numerico continuo	164
8.2.1	Modello FEM del processo	165
8.2.2	Risultati ottenuti	169
8.3	Bibliografia	171

Capitolo I

Il processo Friction Stir Welding

1.1 Introduzione

La Friction Stir Welding (FSW) è una tecnologia di saldatura relativamente nuova: è stata inventata dal The Welding Institute (TWI), l'Istituto della Saldatura Inglese, che l'ha brevettata nel dicembre del 1991 [1]. Questo nuovo processo, particolarmente adatto per realizzare giunzioni di pezzi in leghe d'alluminio [2], è stato accolto con grande interesse dal mondo industriale ed in pochi anni ha avuto un enorme sviluppo, soprattutto nelle applicazioni navali ma anche nell'industria aerospaziale, ferroviaria ed automobilistica.

I materiali per i quali è già stata ampiamente verificata l'applicabilità della FSW sono le leghe d'alluminio (sia da fonderia sia da lavorazione plastica), le leghe di magnesio, di titanio [3-4], di zinco, di rame [5], di nickel, oltre che gli acciai a basso contenuto di carbonio [6] e gli acciai austenitici al Cr-Ni [7-9].

La FSW può anche essere utilizzata per saldare materiali polimerici, compositi a matrice metallica (CMM) [10-12], schiume metalliche, pannelli sandwich e per realizzare giunti tra materiali dissimili, normalmente considerati non saldabili tra loro [13].

La FSW è un processo di saldatura allo stato solido che sfrutta il noto fenomeno dell'abbassamento del carico di snervamento di un materiale, ossia l'aumento della sua duttilità, all'aumentare della temperatura (Fig. 1.1).

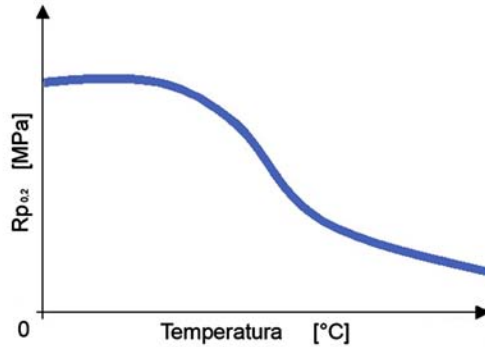


Figura 1.1 Influenza della temperatura sulla sollecitazione di snervamento.

Il materiale viene portato allo stato plastico grazie al calore sviluppato dal movimento reciproco dei pezzi da saldare e dell'utensile.

Quest'ultimo è, quindi, l'elemento fondamentale per la messa a punto del processo: deve essere in grado di plasticizzare il materiale mantenendo inalterate le proprie caratteristiche. Le dimensioni ed il materiale con cui realizzare l'utensile dipendono rispettivamente dallo spessore e dal materiale che si deve saldare.

Tipicamente, l'utensile per la saldatura FSW (Fig. 1.2) è composto da una parte cilindrica detta spalla (shoulder), che genera l'attrito ed impedisce al materiale plasticizzato di fuoriuscire dalla zona del giunto, e da una punta (pin), che provoca il mescolamento del materiale in prossimità dell'asse del giunto.

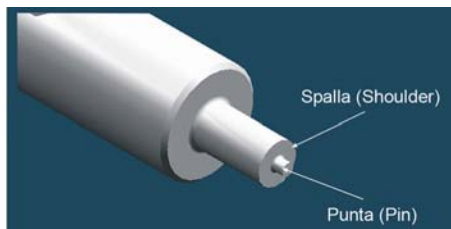


Figura 1.2 L'utensile per processi FSW.

La saldatura FSW è schematicamente rappresentata in figura 1.3.

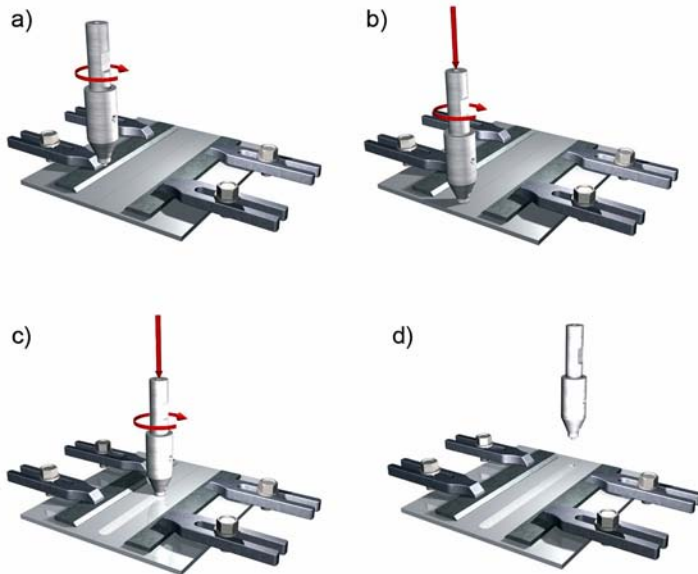


Figura 1.3 Schematizzazione del processo di saldatura FSW.

In breve, l'utensile, posto in rotazione dal mandrino della macchina (Fig. 1.3 a), viene affondato tra i lembi delle lamiere da giuntare (Fig. 1.3 b); si attende qualche secondo per favorire il riscaldamento del materiale ed il conseguente decadimento delle sue caratteristiche meccaniche. Quindi l'utensile viene fatto avanzare lungo la linea di saldatura (Fig. 1.3 c) fino al completamento del giunto. Il processo si conclude con l'estrazione dell'utensile (Fig. 1.3 d).

1.2 Vantaggi e svantaggi

La FSW è un processo di saldatura in cui il materiale non viene portato a fusione; grazie a questo fatto si evitano molti problemi di natura metallurgica, legati ai fenomeni che si attuano durante la solidificazione.

Inoltre, non si verificano molti degli inconvenienti tipici dei processi di saldatura tradizionali quali l'emissione di fumi, la presenza di archi elettrici e spruzzi e l'inquinamento acustico.

Grazie a questi motivi ed alla completa automatizzabilità del processo, è possibile adottare la tecnica FSW anche in un'officina non attrezzata per effettuare saldature convenzionali.

La FSW permette di ottenere giunzioni di ottima qualità ed efficienza, caratterizzate da basse tensioni interne e deformazioni, mantenendo comunque molto elevata la produttività, in quanto consente di saldare pezzi di spessore elevato in passata singola.

A questi pregi si può aggiungere la possibilità di saldare leghe leggere tradizionalmente non saldabili e materiali omologhi o dissimili nella composizione chimica e nello stato di fornitura.

Le geometrie dei giunti realizzabili mediante FSW sono riportate in figura 1.4. Si può osservare che si tratta di geometrie comunemente adottate e non risulta quindi necessaria alcuna modifica progettuale se si desidera sostituire una giunzione realizzata mediante procedimento tradizionale con una FSW.

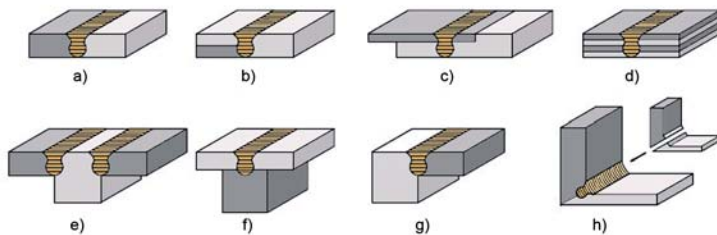


Figura 1.4 Geometrie di giunti FSW: a) testa a testa, b) testa a testa ed a sovrapposizione, c) singola sovrapposizione, d) sovrapposizione multipla, e) a T 3 pezzi, f) a T 2 pezzi, g, h) giunti ad L.

Alcuni approfondimenti sui giunti realizzabili mediante FSW e le relative problematiche sono riportati nel capitolo 4.

La FSW, peraltro, presenta alcuni svantaggi che, a seconda dell'applicazione, possono comprometterne l'applicabilità.

La presenza del foro d'uscita ("keyhole") dell'utensile alla fine del cordone di saldatura rende necessario l'uso di talloni di uscita o richiede di tagliare la parte finale del giunto contenente il difetto; le aziende produttrici di centri di saldatura FSW hanno risolto il problema mettendo a punto dei sistemi di movimentazione del pin che lo rendono retraibile.

A causa delle notevoli forze che si sviluppano durante la saldatura, è necessario fissare molto rigidamente i pezzi da unire ed utilizzare piastre di sostegno per contenere l'eventuale fuoriuscita del materiale plasticizzato. Da questo derivano costi elevati sia delle attrezzature utilizzate per l'afferraggio dei pezzi sia del centro di lavoro.

Inoltre, essendo una tecnologia relativamente nuova, non esiste ancora una normativa di riferimento per la certificazione del processo ma solamente una linea guida (ISO TC/SC N - IIW Doc. III-1325-04r).

1.3 Metallurgia dei giunti

Dalla descrizione del processo, si rileva immediatamente che il flusso plastico del materiale generato dall'azione dell'utensile, ed in particolare del pin, dà origine a giunti asimmetrici. In particolare, osservando una sezione trasversale del giunto (Fig. 1.5), si distinguono un "advancing side" ed un "retreating side": nel primo (a sinistra in figura) i vettori velocità periferica di rotazione e velocità d'avanzamento dell'utensile sono concordi; al contrario, nel retreating side i due vettori sono discordi.

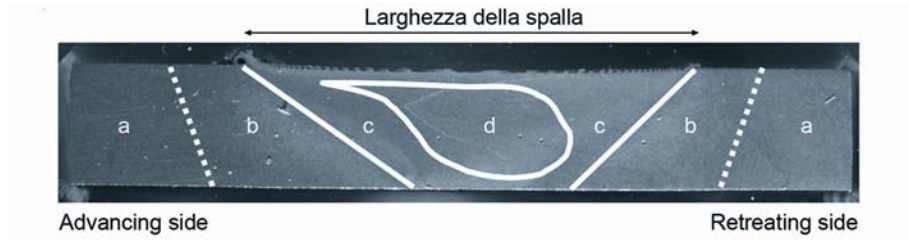


Figura 1.5 Macrostruttura di una sezione trasversale di un giunto FSW.

Nella figura, relativa ad un giunto testa a testa realizzato su lamiere di alluminio [14], si distinguono le seguenti zone:

- a) materiale base (MB): zona che subisce un debole ciclo termico, legato alla conduzione del calore che proviene dal centro del giunto, senza però mostrare alterazioni della microstruttura o delle proprietà meccaniche;
- b) zona termicamente alterata (ZTA): parte nella quale il ciclo termico di saldatura ha causato alterazione della microstruttura e delle proprietà meccaniche del materiale;
- c) zona termo-meccanicamente alterata (ZTMA): area in cui il materiale ha subito sia deformazione plastica sia riscaldamento;
- d) nugget (N): zona prossima alla linea di saldatura.

In figura 1.6 sono visibili i dettagli microstrutturali delle zone precedentemente descritte.

La figura 1.6 a) evidenzia una porzione di materiale base; la microstruttura è costituita da grani di dimensione media pari a $50 \div 100 \mu\text{m}$.

In figura 1.6 b) è visibile la ZTA, relativa allo stesso giunto, caratterizzata da ingrossamento del grano.

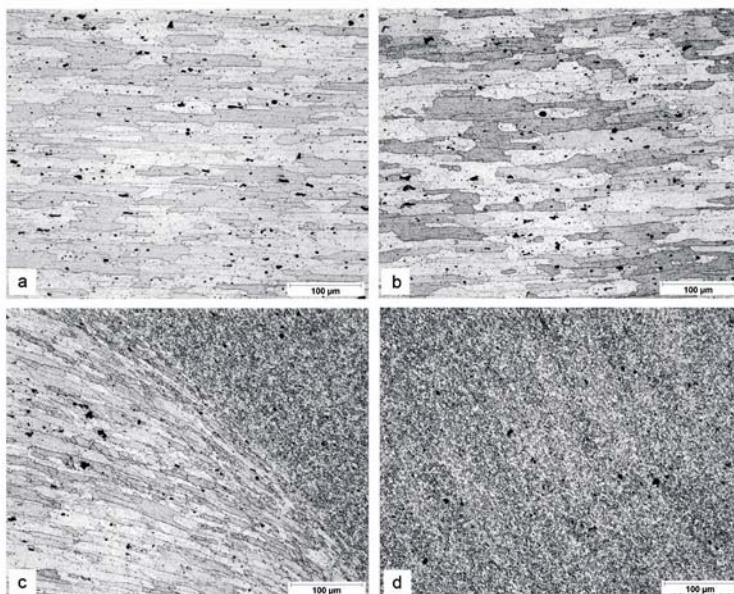


Figura 1.6 Micrografie delle diverse zone di un giunto FSW (Ingrandimento 200X).

La ZTMA, visibile in figura 1.6 c), risulta costituita da grani fortemente allungati ed orientati diversamente rispetto a quelli delle zone circostanti. Questo fatto è dovuto alla duplice azione dell'utensile che, in quest'area, ha alterato il materiale sia termicamente sia meccanicamente.

Il nugget, riportato in figura 1.6 d), mostra una microstruttura a grani molto fini ed equiassici aventi una dimensione media pari a circa un decimo di quella dei grani del materiale base.

In quest'ultima zona si verificano fenomeni di ricristallizzazione [15-16], sulla cui natura si è aperto un ampio dibattito nella comunità scientifica. Numerosi autori sostengono che la microstruttura osservata nel nugget deriva da una ricristallizzazione dinamica di tipo continuo (CDRX), simile a ciò che si verifica durante i processi di laminazione a caldo.

Tale ricristallizzazione è dovuta all'azione meccanica effettuata dal pin: l'utensile, nella sua duplice azione meccanica e termica, distrugge

la microstruttura originale generando nuovi grani che vengono resi equiassici dal calore apportato.

La dimensione finale media del grano nel nugget dipende dalla deformazione e dalla velocità di deformazione imposta dal movimento dell'utensile, nonché dalla temperatura, dal materiale trattato e dal suo stato di fornitura.

In figura 1.7 è mostrato l'andamento della dimensione del grano al variare della distanza dall'asse della saldatura ed a diverse profondità.

Le rilevazioni sono state effettuate su un provino ricavato da un giunto testa a testa in AA6082-T6 di spessore pari a 3 mm (velocità di rotazione 715 giri/min, velocità di avanzamento 200 mm/min) opportunamente inglobato, lucidato ed attaccato con acido cromico.

Occorre osservare che le dimensioni del grano nel nugget sono pari a circa 10 μm , notevolmente inferiori alle dimensioni del grano del materiale considerato (circa 60 μm). Inoltre risulta che la larghezza del nugget varia da 2 a 6 mm a seconda della profondità [17].

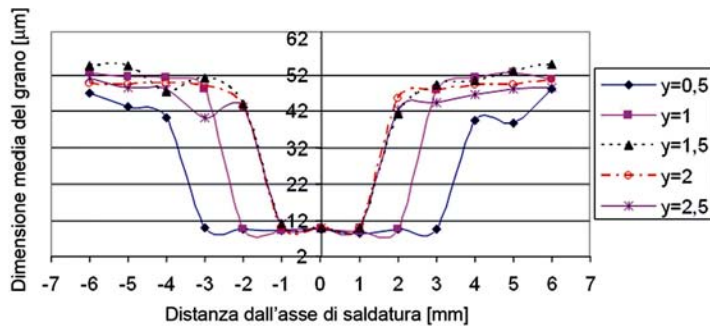


Figura 1.7 Dimensione media del grano.

1.4 Flusso del materiale in giunti testa a testa

Ulteriori interessanti informazioni possono essere ottenute tramite lo studio del flusso del materiale metallico che si attua durante il pro-

cesso FSW [18]. Indagini di questo tipo sono condotte impiegando degli opportuni marcatori: si tratta di elementi che per composizione, o più semplicemente per colorazione, possono essere facilmente individuati eseguendo delle indagini macrografiche.

Di seguito si riportano i risultati di una campagna di prove effettuata realizzando, con diversi parametri, dei giunti testa a testa tra lamiere di alluminio AA7075-T6 di spessore 3 mm. Come marcatore è stato utilizzato un foglio di rame di spessore pari a 0,1 mm, posizionato tra i lembi da saldare, come mostrato in figura 1.8 [19-21].

I parametri operativi che sono stati variati durante le prove sono la velocità di rotazione, la velocità di avanzamento dell'utensile e la geometria del pin. In riferimento a quest'ultimo, si sono considerati un pin cilindrico ed alcuni pin conici caratterizzati da diversi angoli di conicità.

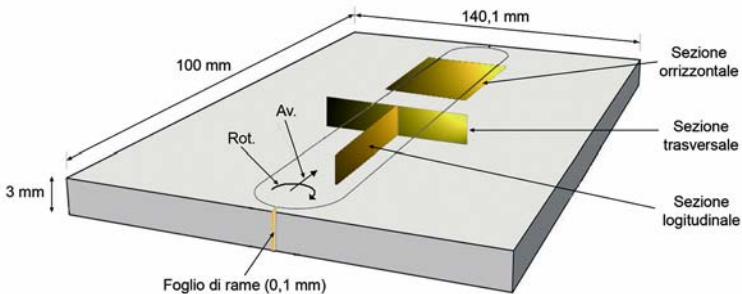


Figura 1.8 Indagine del flusso di materiale in giunti saldati FSW.

In figura 1.9 è riportata una macrografia della sezione trasversale di un giunto testa a testa: è evidenziata la linea di saldatura e sono indicati l'advancing side (A.S.) ed il retreating side (R.S.).

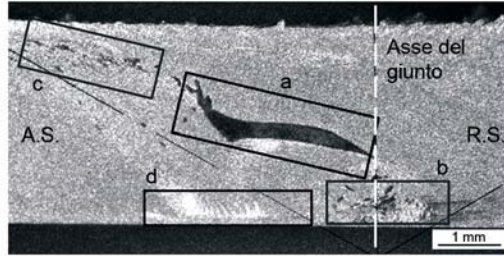


Figura 1.9 Andamento del flusso evidenziato dal marcatore.

Nell'immagine è possibile individuare alcune zone.

Nella zona "a" il marcatore ha semplicemente subito uno spostamento dall'asse del giunto verso l'advancing side ed una rotazione in senso antiorario, senza risultare frammentato. È possibile quindi ipotizzare uno spostamento del materiale plasticizzato dal retreating side verso l'advancing side; tale spostamento risulta più accentuato in prossimità della superficie superiore del giunto, in quanto viene favorito dall'effetto di trascinamento della spalla.

Per quanto riguarda le zone "b" e "c", è possibile fare alcune considerazioni circa la frammentazione del marcatore.

La spinta dell'utensile imprime un moto verticale al materiale plasticizzato ma la presenza della tavola portapezzo impone, nella zona "b", una deviazione del flusso plastico, che determina la frammentazione del marcatore (Fig. 1.10).

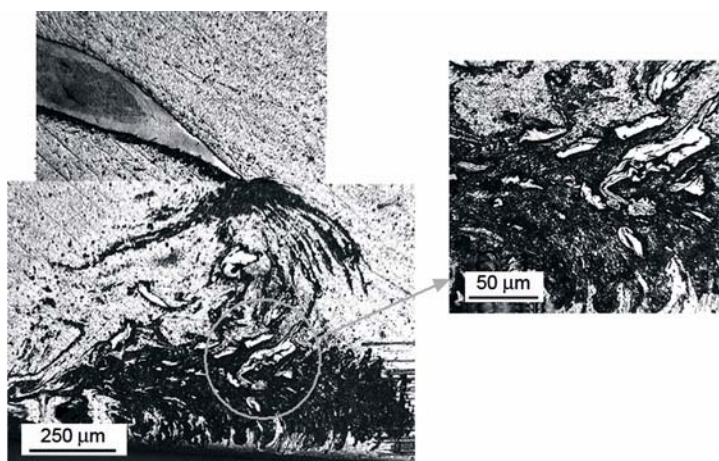


Figura 1.10 Dettaglio della zona “b”, in prossimità del fondo.

In figura 1.11 sono riportate alcune micrografie relative alla zona “c”: è immediatamente possibile distinguere una linea di separazione tra il nugget e le zone limitrofe, in cui non si riscontrano tracce del marcatore. La linea su cui si posizionano i frammenti del marcatore identifica la ZTMA al lato advancing, comunemente denominata “braccio di flusso”.

Si tratta, in altre parole, della traccia dell’effettivo piano di giunzione che si verifica durante il processo FSW.

Risulta importante sottolineare come in un giunto testa a testa ottenuto mediante il processo FSW la linea di saldatura (welding line) e la traccia del piano di effettiva giunzione (bonding line) non coincidano.

La cosiddetta bonding line rappresenta una zona di forte discontinuità delle proprietà meccaniche del giunto saldato FSW: è il punto di maggiore debolezza delle saldature effettuate su lega 7XXX. Quindi, in corrispondenza di tale linea si avrà, nel caso di saldatura ben riuscita, la frattura del giunto sollecitato a trazione.

È interessante rilevare come in questa zona l’alluminio ed il rame siano disposti secondo linee pressoché parallele, ad indicare un flusso laminare del materiale. È possibile inoltre notare come la distanza tra due linee di flusso adiacenti aumenti spostandosi dalla periferia verso il centro del giunto.

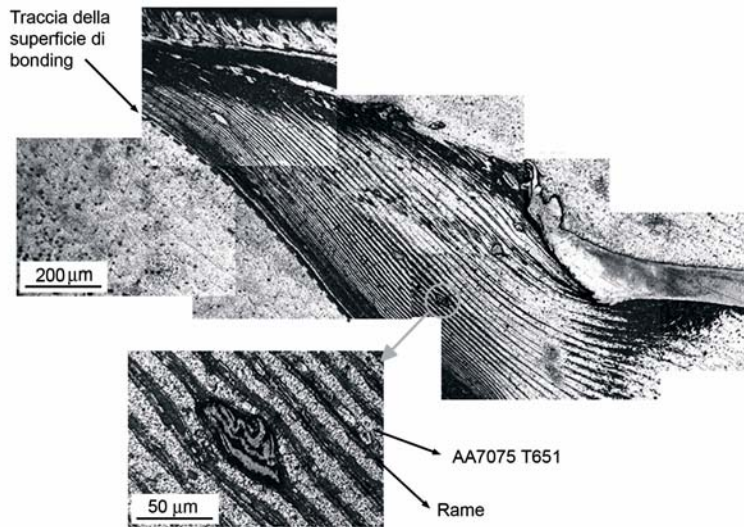


Figura 1.11 Dettaglio della zona “c”.

Infine, nella zona “d” della figura 1.9, si possono notare alcuni tipici difetti di flusso che possono generarsi in saldature FSW. Tali difetti, denominati “swirls” (Fig. 1.12), sono dovuti ad una geometria non appropriata dell’utensile utilizzato.

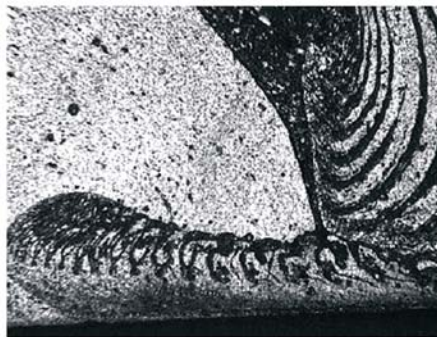


Figura 1.12 Difetti di swirl.

Utilizzando un utensile con un pin conico è possibile ottenere un flusso di materiale privo di difetti di swirl. Infatti, il pin conico determina un incremento della componente verticale del flusso plastico, rispetto a quanto riscontrabile nel caso si utilizzi un pin cilindrico, e ciò determina un più efficace rimescolamento del materiale.

In figura 1.13 è rappresentato il flusso evidenziato tramite l'uso del marcatore.

L'utensile posto in rotazione genera un flusso plastico che determina lo spostamento del materiale dal retreating side verso l'avancing side, fino ad incontrare il materiale indeformato presente in quella zona del giunto.

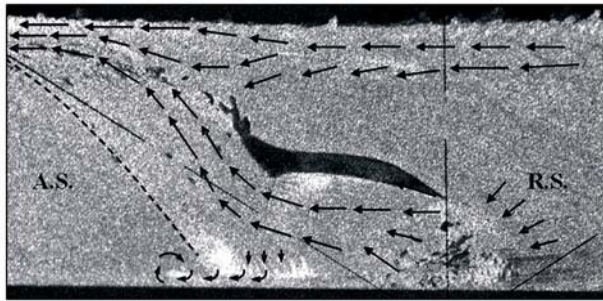


Figura 1.13 Flusso del materiale in una sezione trasversale di un giunto testa a testa.

Come si vedrà nel capitolo 2, l'utensile ed in particolare il pin vengono progettati in modo da massimizzare la spinta verticale ed ottenere giunti di qualità.

Ulteriori informazioni possono essere ottenute considerando le sezioni longitudinali ed orizzontali del giunto.

Nella figura 1.14 è visibile la sezione longitudinale di un giunto realizzato con pin cilindrico.

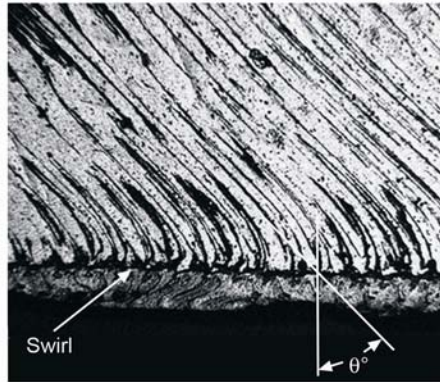


Figura 1.14 Sezione longitudinale di un giunto.

L'angolo di inclinazione delle linee di flusso (θ) dipende dalla combinazione delle velocità di rotazione e di avanzamento dell'utensile, nonché dall'angolo di tilt. Anche in questa immagine si può osservare la presenza del difetto di swirl dovuta all'utilizzo di un utensile dotato di pin cilindrico.

L'osservazione della sezione orizzontale del giunto (Fig. 1.15) evidenzia una disposizione regolare del marcatore all'advancing side. Tale disposizione risulta funzione dei parametri operativi utilizzati durante il processo.



Figura 1.15 Sezione orizzontale di un giunto.

Dal punto di vista puramente meccanico, occorre osservare che il marcatore risulta omogeneamente disperso quando la componente rotazionale dell'azione dell'utensile prevale rispetto a quella di avanzamento; al contrario, quando l'azione di avanzamento risulta prevalente si assiste ad una frammentazione più marcata del rame.

Qualitativamente, è possibile effettuare un confronto tra quanto accade durante il processo FSW e durante le lavorazioni per asportazione di truciolo: entrambi i procedimenti, infatti, sono governati da fenomeni di taglio/scorrimento. Richiamando quanto scritto sulla disposizione del marcatore nella sezione orizzontale dei giunti, si osservano morfologie molto simili alle diverse tipologie di truciolo che si ottengono nelle lavorazioni per asportazione di truciolo, come mostrato in figura 1.16. È noto, infatti, che al variare del materiale in lavorazione e dei parametri di processo (velocità di taglio) si ottiene un truciolo caratterizzato da una morfologia continua, ondulata, segmentata o discontinua. Allo stesso modo, nei processi FSW, il marcatore originariamente posto tra i due lembi da saldare si dispone in modo diverso in funzione della geometria del pin, dei parametri di processo utilizzati e naturalmente del materiale saldato.

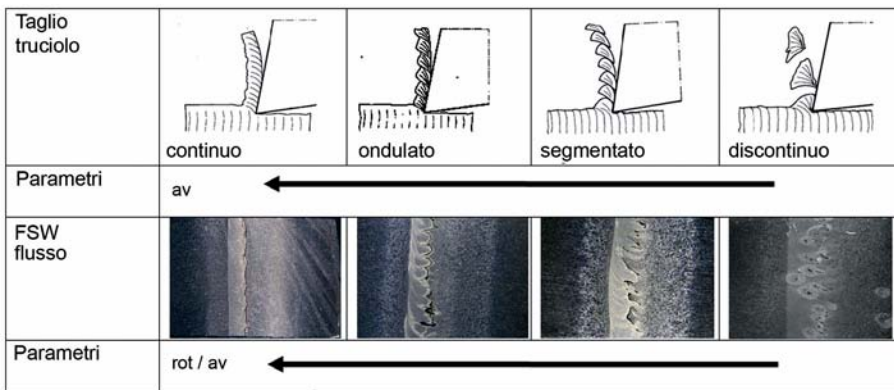


Figura 1.16 Analogia tra la morfologia del truciolo in lavorazioni di taglio ed il flusso di materiale nel processo FSW.

In generale, a parità di materiale lavorato e di forma dell'utensile, sia nei processi FSW sia durante le operazioni di asportazione di truciolo si osserva che all'aumentare della velocità periferica dell'utensile (da saldatura o da taglio) la morfologia del flusso di materiale o del truciolo passa da un andamento discontinuo ad uno più continuo (Fig. 1.16).

L'analogia appena descritta è dovuta ai fenomeni di scorrimento che si verificano nei due processi.

Nelle lavorazioni di fresatura, il materiale incontra la superficie rigida dell'utensile ed è costretto a cambiare direzione generando un truciolo caratterizzato, come detto, da una morfologia dipendente dai parametri di processo.

Nel processo FSW il materiale è costretto a fluire intorno al pin dell'utensile, fino ad incontrare il materiale pressoché rigido che si trova all'advancing side e che non partecipa al flusso plastico generato dall'utensile; anche in questo caso, diverse combinazioni dei parametri di processo danno luogo a differenti morfologie del flusso di materiale.

Tale comportamento può essere interpretato anche dal punto di vista energetico. Il passo di saldatura, infatti, è strettamente correlato con l'apporto termico specifico conferito al giunto durante il processo FSW [22].

Per valori elevati del rapporto av/rot , l'alluminio e quindi anche il rame risultano più freddi a causa del ridotto apporto termico e l'azione di stirring dell'utensile dà luogo ad una maggiore frammentazione del marcatore. Al contrario, per bassi valori di tale rapporto, il più elevato apporto termico consente una maggiore deformazione del marcatore e quindi una sua disposizione "continua" nella sezione orizzontale del giunto.

In figura 1.17 è riportato l'andamento del passo del marcatore in funzione del rapporto tra velocità di avanzamento e velocità di rotazione dell'utensile, al variare della geometria di quest'ultimo.

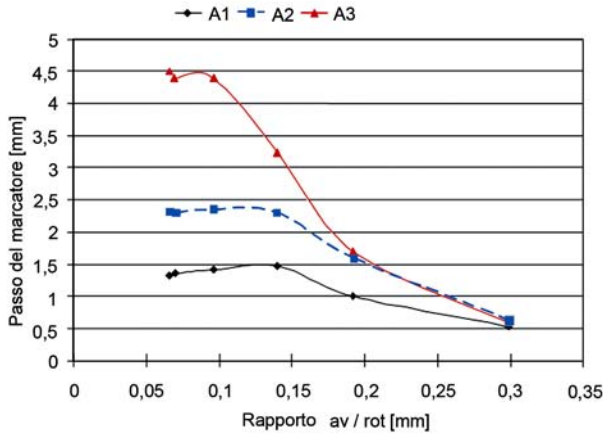


Figura 1.17 Passo del marcatore in funzione del passo di saldatura, al variare dell'utensile utilizzato.

In particolare, sono stati considerati tre utensili dotati di uguale spalla e di pin non filettati: A1 pin cilindrico; A2 pin conico con conicità di 10° ed A3 pin conico con conicità di 30° .

Le tre curve presentano un andamento simile: il passo con cui si dispone il marcatore nella sezione orizzontale dei giunti decresce all'aumentare del passo di saldatura utilizzato. In tutti e tre i casi si può notare come, per un passo di saldatura pari a 0.3 mm, gli andamenti convergano ad un valore del passo del marcatore pari a 0.5 mm.

Dalla figura 1.17 risulta inoltre che l'utensile cilindrico determina passi del marcatore più piccoli rispetto agli utensili conici: tale effetto è facilmente spiegato considerando il raggio di azione dei diversi utensili. Gli utensili conici sono in grado di interessare un volume maggiore di materiale, soprattutto negli strati superiori del giunto: essendo la base del pin conico di diametro maggiore (rispetto al diametro del pin cilindrico), si ottengono maggiori velocità periferiche del materiale a contatto con questa parte dell'utensile. In tal modo si comprende come, con utensili conici, la disposizione del marcatore risulti radialmente più ampia ed il suo passo sia maggiore.