3° CONGRESSO NAZIONALE DEL
COORDINAMENTO DELLA MECCANICA ITALIANA
Napoli, 30 Giugno – 1 Luglio2014

MAPPE DI LAVORABILITA' PER GIUNTI MISTI DI ALLUMINIO MEDIANTE PROCESSO DI SALDATURA LINEAR FRICTION WELDING

G. Buffa[a], M. Cammalleri[a], D. Campanella[a], F. Bilello[a], L. Fratini[a], F. Micari[a]

[a] *Università di Palermo - Dipartimento di Ingegneria Chimica, Gestionale Informatica e Meccanica, Viale delle Scienze, 90128 Palermo, e-mail: gianluca.buffa@unipa.it; marco.camalleri@unipa.it; davide.campanella@unipa.it; francescobilello91@gmail.com, livan.fratini@unipa.it; fabrizio.micari@unipa.it.*

Sommario
Il Linear Friction Welding è un processo di saldatura allo stato solido in cui una parte fissa è forzata contro una parte che si muove con moto lineare alternato per generare calore attraverso l'attrito. Nel presente lavoro viene descritto lo studio effettuato per la realizzazione della giunzione mista mediante processo di Linear Friction Welding tra due leghe di alluminio che presentano proprietà meccaniche differenti, come la lega AA2011 e AA6082. Lo studio è stato condotto analizzando due differenti configurazioni determinate dalla posizione relativa delle leghe costituenti i provini da saldare. Per la realizzazione del processo è stata utilizzata una macchina prototipale dotata di sensori atti alla misura "in process" di variabili fondamentali per la completa comprensione del processo quali temperature nei provini, forze sui provini, accelerazioni e velocità che questi subiscono.

Parole chiave: Linear Friction Welding; giunti misti; alluminio.

1. Introduzione

Nell' ultimo secolo il progredire della tecnologia è andato di pari passo con lo sviluppo di nuove tecniche atte a migliorare ed estendere sempre più i processi preesistenti. Tale progresso negli ultimi decenni ha interessato anche le tecniche di saldatura le quali, pur comparendo in brevetti già a partire dall'inizio del secolo scorso, costituiscono tutt' oggi uno dei sistemi di collegamento rigido maggiormente in uso in campo aeronautico, navale, automobilistico e più di recente per quanto riguarda i componenti elettronici [1].
Un particolare processo di saldatura che negli ultimi anni si sta affermando in ambito industriale è il processo di saldatura per attrito, dove durante il processo si ottiene una condizione di plasticità superficiale che permette la compenetrazione osmotica dei due materiali, che si saldano indissolubilmente e in modo omogeneo senza l'apporto di altre sostanza. La saldatura per attrito si basa sulla trasformazione diretta dell'energia cinetica in energia termica e sfrutta il calore d'attrito generato all'interfaccia tra i due componenti da saldare. Questi processi si dividono in due categorie chiamate Friction Stir Welding e Friction Welding. La differenza tra le due categorie si basa sulla presenza o meno di un utensile appositamente progettato che si occupa di generare calore e nello stesso tempo di mescolare il materiale come nel caso del processo di Friction Stir Welding (FSW) [2].
Il processo trattato in questo lavoro fa parte della categoria dei Friction Welding dove non viene utilizzato nessun utensile esterno perché sono proprio gli elementi da unire ad essere chiamati direttamente in causa per la giunzione [3].
Il presente lavoro sfrutta il processo di Linear Friction Welding per la giunzione di materiali con caratteristiche meccaniche differenti. Questo tipo di giunzione negli ultimi anni risulta in forte crescita

per la possibilità di unire materiali differenti offrendo così le caratteristiche meccaniche necessarie per il tipo di impiego [4].
Il processo può quindi considerarsi in prima analisi caratterizzato da due fasi; dove la prima fase consiste nel riscaldamento delle interfacce attraverso l'attrito generato da un movimento relativo sul piano di saldatura, combinato con una pressione applicata normalmente al piano in questione [5-6], mentre la seconda, denominata fase di forgiatura, consiste in una ricalcatura senza movimento relativo [7-8]. A separare le due operazioni è, appunto, lo stadio di arresto, in quanto, fino a quando persiste il movimento relativo, non si può formare il giunto; inoltre dopo il suo arresto non vi è ulteriore riscaldamento delle parti. La fase di riscaldamento è fondamentale ai fini del conseguimento del processo e, durante la stessa si raggiunge la condizione di plasticità e si assiste all'espulsione di materiale, quasi sempre in modo radiale con direzioni preferenziali a seconda di che processo di saldatura per attrito si esamina, ciò determina una riduzione della pressione sulla superficie di separazione pertanto si assiste, al fine di scongiurare tale inconveniente, ad un movimento assiale che prende il nome di "burn-off" [9] che costituisce uno dei parametri su cui l'intero processo si basa. Durante la seconda fase in cui le due leghe non si trovano più in moto relativo, si assiste, ad una diminuzione della temperatura all'interfaccia, che è dovuta principalmente ai fenomeni di dispersione per irraggiamento e conduzione attraverso i provini stessi. C'è da precisare che l' apparente perdita di materiale durante la prima fase, rappresenta tutt'altro che un aspetto negativo del processo, anzi costituisce uno dei suoi principali vantaggi [10]; infatti quest'ultimo aspetto, permette l'utilizzo di provini che non devono ricevere particolari lavorazioni preliminari, ed inoltre il consumo di materiale, permette, se in quantità sufficiente, che le impurità nelle superfici da saldare, le irregolarità iniziali che impediscono un completo contatto tra le due parti metalliche, nonché gli ossidi che si formano mentre il contatto è solo parziale, vengono tutti espulsi. Da ciò si rileva la notevole riduzione dei costi di preparazione richiesti rispetto alla saldatura di tipo tradizionale. Si è detto che questo processo ha il grosso vantaggio di garantire una temperatura di esercizio abbondantemente al di sotto di quella di fusione di ciascuna delle leghe utilizzate durante il processo, ciò è dovuto in gran parte alla capacità del processo di autoregolarsi; il calore viene infatti generato soltanto nelle superfici da saldare ed è equamente distribuito per tutta la sezione da saldare, quando il materiale raggiunge lo stato plastico il coefficiente di attrito effettivo diminuisce diminuendo perciò l'entità di calore generato.
Questo tipo di saldatura sta avendo un'ampia affermazione industriale soprattutto per i vantaggi che è in grado di garantire. Il processo si basa sui pochi parametri di seguito elencati, che vengono posti sotto precisi limiti di controllo:

- Pressione
- Tempo
- Velocità di deformazione

Il primo brevetto sulla saldatura ad attrito, risale al 1891 negli Stati Uniti [11]. Seguirono altri brevetti in Europa ed in Unione Sovietica. Le compagnie americane come Caterpillar, Rockwell International, American Manufacturing Foundry e Thompson Friction Welding hanno sviluppato inoltre macchine per questa tipologia di saldature [12-13].

2. Approccio sperimentale

2.1 Materiali utilizzati

La campagna sperimentale è stata condotta su due leghe di alluminio come la serie AA2011 e AA6082 aventi caratteristiche meccaniche differenti. In figura 1 è riportato un grafico rappresentante la tensione di snervamento al variare delle temperature dei due materiali in esame [14].

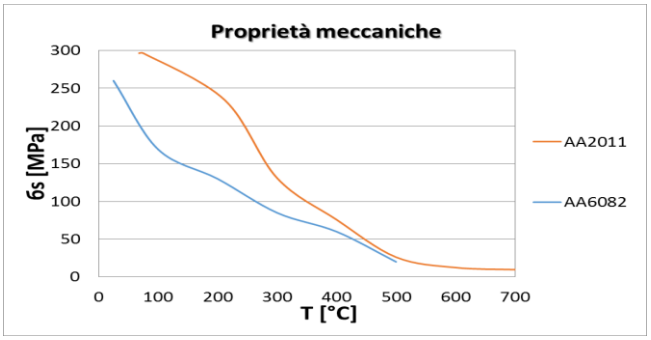

Figura 1: Caratteristiche termo-meccaniche delle leghe AA2011 e AA6082

Dal grafico delle proprietà meccaniche delle due leghe, è possibile notare un più rapido decadimento delle caratteristiche meccaniche di una lega piuttosto che di un'altra. Quindi non solo la AA2011 ha caratteristiche meccaniche migliori, ma che queste hanno un'inflessione minore rispetto a quelle della AA6082 al crescere della temperatura.

2.2 Macchina prototipale

Al fine di realizzare i giunti si è ricorso all'utilizzo di un macchinario prototipale progettato e realizzato presso l'Università degli Studi di Palermo riportato in figura 2 [15]. Il prototipo in questione ha il compito indurre un moto oscillatorio alternato a cui è sottoposto uno dei due metalli, l'altro è tenuto fermo e pressato tramite una pressione opportunamente scelta per mezzo di un attuatore oleodinamico. L'induzione di questo moto oscillatorio è possibile grazie ad un sistema di trasmissione stile desmodromico costituito da due sistemi camma-piattello.
Un elemento centrale chiamato slitta fa da supporto tramite collegamento a viti al provino costituito da uno dei due materiali della prova, esso è collegato e reso solidale ai due piattelli posti ai lati opposti dello stesso, essi andranno a loro volta a contatto con due gruppi di camme contrapposte che hanno la funzione di indurre il moto oscillatorio.

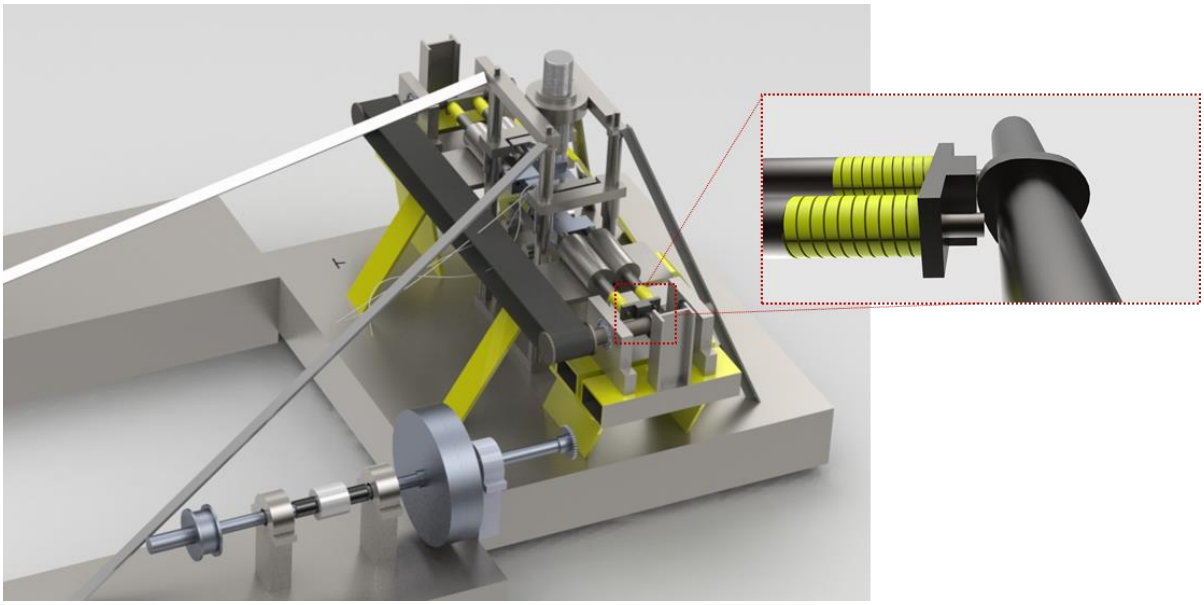
Figura 2: Macchina prototipale per processi di LFW

Nel sistema camma-piattello il moto relativo è affidato alla contemporanea azione di due camme contrapposte, per realizzare il moto alterno della slitta. Le due camme devono essere "calibrate" alla perfezione in modo che al minimo di una delle camme corrisponda il massimo dell'altra, se questa condizione non è rispettata si arriva ad impuntamento della macchina per effetto della necessaria riduzione della slitta centrale, elemento rigido.

Al fine di ampliare il più possibile l'intervallo delle frequenze di oscillazione alle camme è stato dato un profilo trilobo, questa condizione fa sì che a parità di velocità di rotazione di una delle camme, la frequenza di oscillazione risulti triplicata.
Le due camme sono rese solidali per mezzo dell'utilizzo di una cinghia dentata che permette di non perdere la fase tra le due.
Il moto principale è fornito da un tornio che è collegato ad un albero secondario mediante un collegamento cinghie-pulegge trapezoidali. Infine, l'albero secondario trasmette il moto alla macchina attraverso un collegamento catena-rocchetto dentato con rapporto 1:1. L'albero secondario chiamato anche albero di misura, contiene un torsiometro, una frizione pneumatica ed un volano che permettono il monitoraggio in tempo reale [16].

3 Prove sperimentali

Prima di partire ad analizzare i dati raccolti è necessario precisare gli strumenti su cui sono stati riportati i dati ottenuti. A tal fine si è deciso di utilizzare la rappresentazione grafica, che permette di inquadrare molto velocemente il problema evidenziandone i principali elementi caratteristici della prova. Questo tipo di rappresentazione è chiamata "mappa di lavorabilità", in cui sono riportati sull'asse delle y, le *frequenze di oscillazioni* mentre sull'asse delle x, le *pressioni al contatto*. Inoltre sono riportati anche dei dati qualitativi delle prove e quindi non solo le prove effettuate ma anche i risultati ottenuti relativi alla qualità della saldatura, fornendo così una lettura univoca dei risultati ottenuti.
Per quanto riguarda la geometria dei provini utilizzati nella campagna sperimentale, di questi vengono riportate i CAD in figura 3.

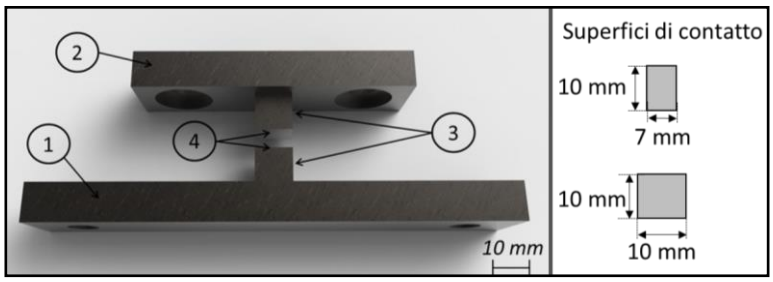

Figura 3: Geometria dei provini

Due campagne sperimentali sono state condotte per cercare di studiare l'influenza delle differenti geometrie dei provini considerati. Una prima campagna è stata condotta dove la lega AA2011 costituiva il provino superiore e la lega AA6082 costituiva quella inferiore. La seconda campagna, invece, riportava gli stessi dati ma all'inverso.
Dal punto di vista sperimentale sono stati presi in considerazioni i test con frequenza compresa tra 45-72 Hz, pressione all'interfaccia compresa tra 20-60 MPa e, una volta stabilito l'ottimo, mantenendo costante il tempo del processo a 2,25 sec.
Un parametro di output importante che è stato considerato durante le prove ha riguardato i profili di temperatura che si venivano a delineare. Per poter ottenere questi dati è stata usata una termocoppia di tipo-k posizionata sul provino superiore a 6 mm di distanza dall'interfaccia. Il sensore termico, durante la prova inviava il segnale alla scheda di acquisizione dati che ha permesso la registrazione e la visualizzazione mediante il software LABView.

4. Risultati ottenuti

4.1. Analisi finestra di lavorabilità

In figura 4 sono riportate le finestre di lavorabilità ricavate in questo lavoro. Per comodità si userà il termine "Top" per specificare la lega che costituirà il provino superiore.

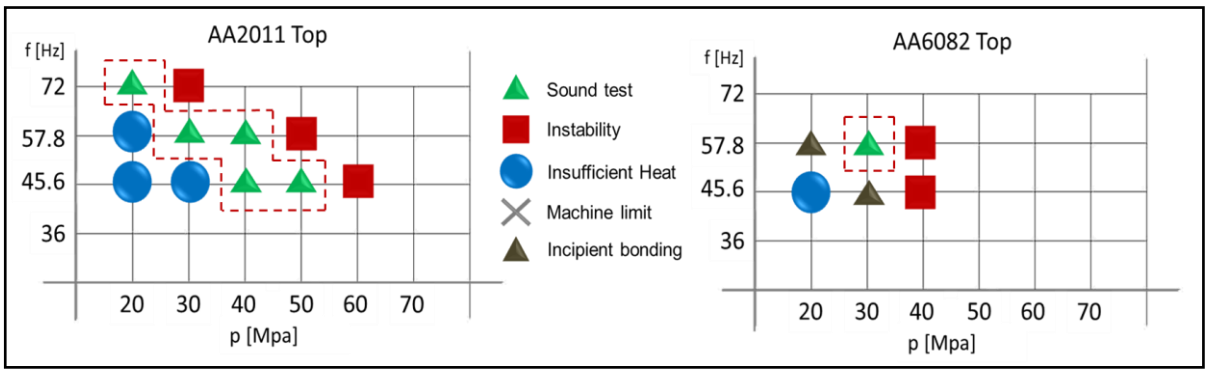

Figura 4: Finestre di lavorabilità

Una prima osservazione che può essere fatta riguarda la riduzione nella finestra di lavorabilità per quanto riguarda la prova con la lega AA6082 costituente il provino superiore, giustificabile per il fatto che stiamo trattando l'unione di due leghe con peculiarità nettamente differenti come anche mostrato in figura 1. Infine a differenza di quanto accadeva nel caso di giunzioni omologhe [17] si è osservata un'ulteriore stadio prima della saldatura, che è stato nominato "incipient bonding". In questa fase il provino mostrava tutte le caratteristiche di una buona giunzione ma in realtà, come sarà spiegato più avanti, morfologicamente ha mostrato un vero e proprio incollaggio dettato dalla mancanza di diffusione atomica all'interfaccia. Un dato altresì rilevato durante la sperimentazione, ha riguardato il valore massimo della pressione applicabile e cioè che questa non doveva superare un certo limite in modo da non inficiare il movimento alternato in quanto riduce il moto relativo producendo così un minore apporto termico. Questo tipo di prove veniva classificato nullo perché attribuito ad un limite della macchina, tuttavia va precisato ulteriormente che non va confuso però con la giunzione fredda detta "insufficient heat", dove la pressione risultava insufficiente per far instaurare la meccanica di giunzione senza influire però sul movimento relativo.

4.2. Analisi Temperature

Il processo di Linear Friction Welding è, come già detto, un processo polistadio in cui gioca un ruolo fondamentale il flusso termico generato. Come già accennato nel paragrafo precedente, al fine di ottenere un'analisi più dettagliata del processo e per comprendere fino in fondo quanto rilevato durante la prova, compiendo se necessario gli opportuni confronti, si è deciso di registrare l'andamento delle temperature.
Nella figura 5 sono riportati gli andamenti delle temperature registrate nel corso della campagna caratterizzata a sinistra dalla lega AA2011 e a destra dalla lega AA6082 nella posizione di provino superiore.

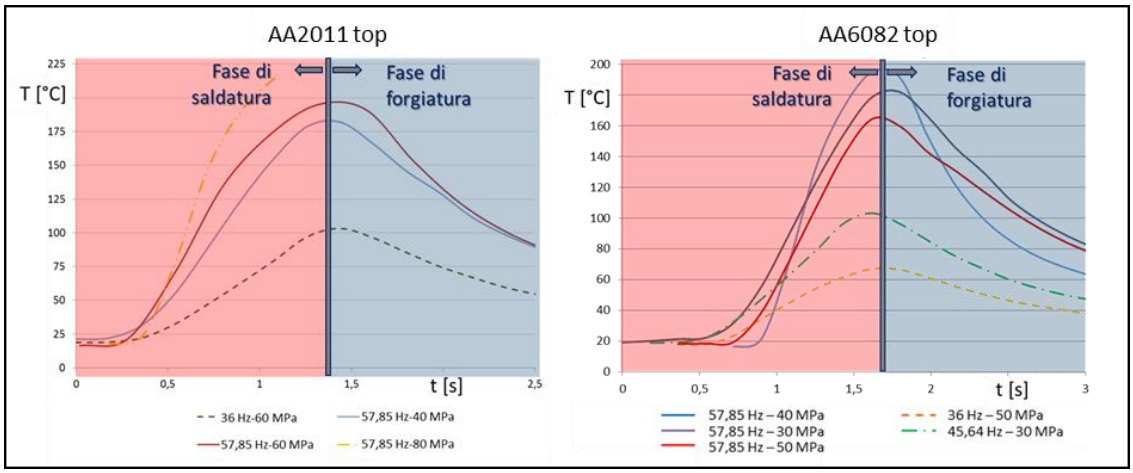

Figura 5: Grafico andamento temperature

Osservando tali grafici ci si accorge subito delle sostanziali differenze fra i vari giunti, specie per quanto riguarda l'apporto termico che ciascuno riceve. In particolare, in questo grafico è possibile notare l'influenza dei due parametri fondamentali per questo tipo di processo, quali la frequenza e la pressione all'interfaccia. Per esempio, volendo analizzare la campagna relativa alla lega AA6082 come provino superiore ed in particolare osservando le due prove a 57,8 Hz, si nota che, fino a quando la pressione è inferiore ai 40 MPa, all'aumentare della pressione aumenta anche l'apporto termico. Questa affermazione non è più vera, invece, per pressioni maggiori. Va precisato che la prova con 50 MPa ha prodotto comunque un giunto "sound" nonostante la temperatura registrata avesse un andamento più basso rispetto a quella effettuata a 40 MPa. Tale risultato è da attribuire all'eccesso di flash che ha disturbato la corretta lettura del sensore. Un altro aspetto deducibile da questa figura è l'importanza del parametro frequenza, e ciò perché, tenendo la pressione costante e facendo variare solo la frequenza, si nota come l'apporto termico sia maggiore nelle prove aventi frequenze elevate.
Le stesse considerazioni possono essere fatte anche per il grafico di sinistra ad eccezione della prova avente 57,85 Hz e 80 MPa in cui si è verificata il fenomeno dell'instabilità di cui non è stato possibile riportare tutto l'andamento della temperature perché la termocoppia, a seguito del progressivo accorciamento del dentello, raggiungeva la zona di contatto, sfalsandone così la lettura. Viene riportato, a titolo di esempio, nel grafico di sinistra, che è riferito alla lega AA2011 costituente il provino superiore, solo il primo tratto di curva filtrato della parte "disturbata" dovuta al contatto del flash. In ogni caso prima del "fuori servizio" della termocoppia si è registrata una temperature intorno i 350°C. Va precisato che in ogni caso la temperatura più elevata registrata durante le prove, risulta abbondantemente sotto il livello di fusione del materiale, confermando così le ipotesi che stanno alla base dell'intero processo di saldatura allo stato solido.

4.3. Analisi Macro e Micrografiche

L'analisi macrografica si fonda su un particolare presente in letteratura è cioè la presenza di materiale di prima plasticizzazione anche detto "flash" [2,18] che risulta essere un indice di corretto apporto di calore. In particolare, la presenza di tale materiale agli angoli dei provini offre al giunto una caratteristica meccanica nettamente superiore di una prova dove questa non si è presentata. Di seguito verranno analizzate le prove effettuate per le due campagne utilizzando come metro di valutazione quanto riportato in letteratura.
Le immagine che segue ritrae i giunti misti in cui la lega AA2011 costituisce il provino superiore mentre la AA6082 quello inferiore.

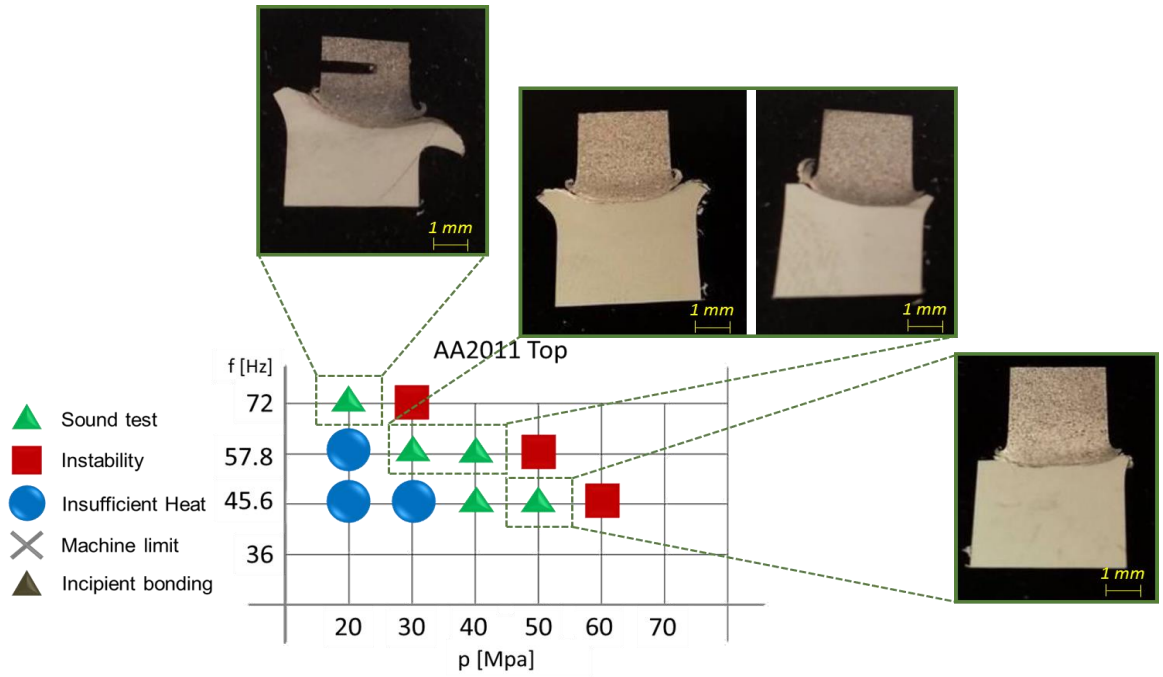

Figura 6: Analisi macrografica con lega AA2011 up

L’immagine di figura 6 mostra come varia la natura e la quantità del flash al variare dei parametri frequenza e pressione. Un altro dato importante è vedere come la quantità di flash prodotto e quindi di qualità della saldatura, non segua un trend lineare ma un classico andamento a campana. A titolo di esempio, si prenda il caso in qui la frequenza è uguale a 57,8 Hz. Come è possibile notare in figura l’ottimo si ha per una pressione pari a 30 MPa e non 40 MPa. Questa affermazione segue quanto affermato prima e cioè che dopo un certo valore di pressione l’aumento di questo parametro non giochi un effetto benefico sul prodotto finale.
Un altro dato importante riguardante l’effetto della frequenza è possibile notare in figura, e cioè che l’effetto di “abbracciamento” del provino inferiore è maggiore all’aumentare della frequenza.
Questo effetto risulta essere fondamentale per questo tipo di giunzione perché permette di trattenere la temperatura all’interfaccia riducendo così lo scambio termico con l’esterno. In questo modo, aumentando la temperatura all’interfaccia si riduce la tensione della lega AA2011 “aiutandola” così a partecipare nella giunzione che, come sarà dimostrato più avanti, si instaura non solo come meccanica di giunzione ma anche come trasmigrazione atomica tra le leghe.
Questo tipo di osservazione, non è possibile sostenerla per la campagna che vede la lega AA6082 costituire il provino superiore. Infatti, come è possibile vedere nella figura 7, riportante il provino ottenuto con parametri pari a 45,6 Hz e 30 MPa, nonostante presenti un flash molto abbondante, presenta un cordone di saldatura discontinuo che implica un’inadeguata interazione tra le due leghe.

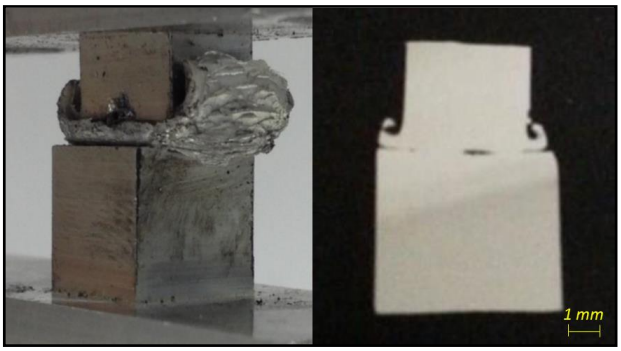

Figura 7: provino 45,6 Hz e 30 MPa

Per poter comprendere meglio l’effetto dei parametri, dalla campagna relativa alla lega AA2011 come provino superiore, è stato effettuato un confronto tra tre prove avente la stessa frequenza di oscillazione ma pressione compresa tra 20 e 40 MPa.
In figura 8 si riporta l’analisi della dimensione media dei grani nelle tre zone di interesse che come riportato in letteratura sono [19-21]:

- Zona Termicamente Alterata (HAZ);
- Zona Termo-meccanicamente Alterata (TMAZ);
- Zona di Saldatura (WL).

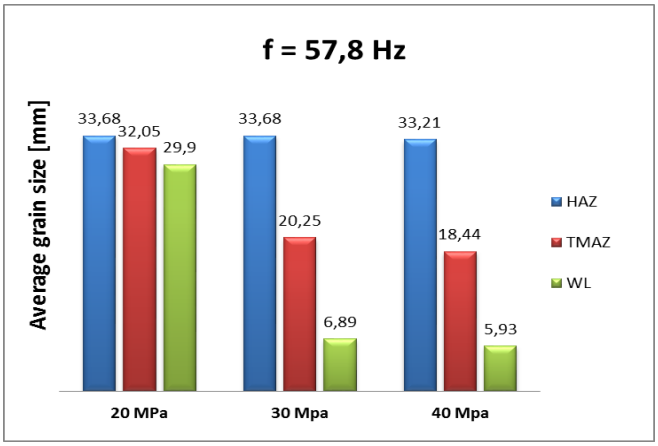

Figura 8: Dimensione media dei grani per la lega AA2011 up

Come si può notare dalla figura le dimensioni medie dei grani presenti nelle tre zone, per la prova effettuata con 20 MPa di pressione, risultano avere circa lo stesso valore e questo sta ad indicare la mancanza di ricristallizzazione dinamica dovuto al fatto che la temperatura e la deformazione raggiunte non risultano idonei per attivare il fenomeno. Mentre questo non è possibile sostenerlo per le altre due prove effettuate con pressione compresa tra i 30 e 40 MPa. Tuttavia sembrerebbe essere poco chiaro l'effetto dei parametri suddetti visto che i valori per le altre due prove risultano essere molto vicini. Per questo motivo si è pensato di effettuare un'analisi EDAX per cercare di interpretare meglio i risultati. Appare chiaro dalla figura 4 come non sia possibile effettuare il medesimo test per la campagna sperimentale avente il provino superiore creato con la lega AA6082. Prima però di passare ad analizzare i dati ottenuti con l'analisi EDAX, ci si è soffermati ad due prove avente stessi parametri, 57,8 HZ e 30 MPa, con la sola variazione della disposizione dei materiali e quindi aventi la serie AA2011 una volta costituente il provino superiore ed una volta costituente il provino inferiore. In figura 9 si riporta il confronto tra le due campagne.

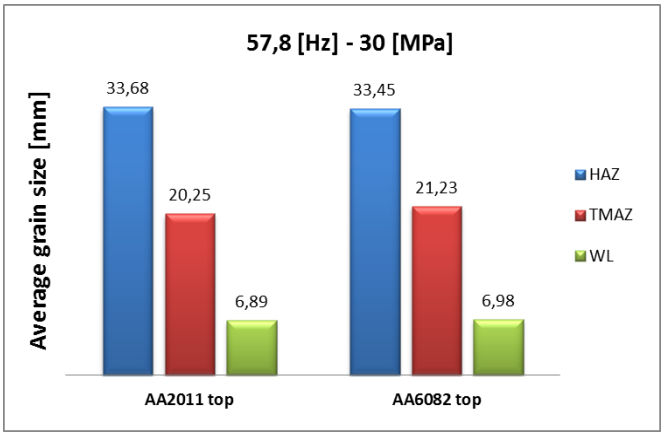

Figura 9: Confronto dimensione media dei grani

Come è possibile notare dalla figura, i valori trovati risultano essere molto simili e ciò non ha reso possibile effettuare una lettura univoca dei due test.
Per i medesimi giunti è stata effettuata anche un'analisi di microdurezza Vickers che ha mostrato un andamento tipico di giunti saldati mediante processi di giunzioni allo stato solido. I risultati di questa analisi vengono riportati in figura 10. L'analisi è stata condotta muovendosi di 1 mm lungo la perpendicolare alla linea di saldatura assumendo come zero proprio la giunzione tra le due leghe.

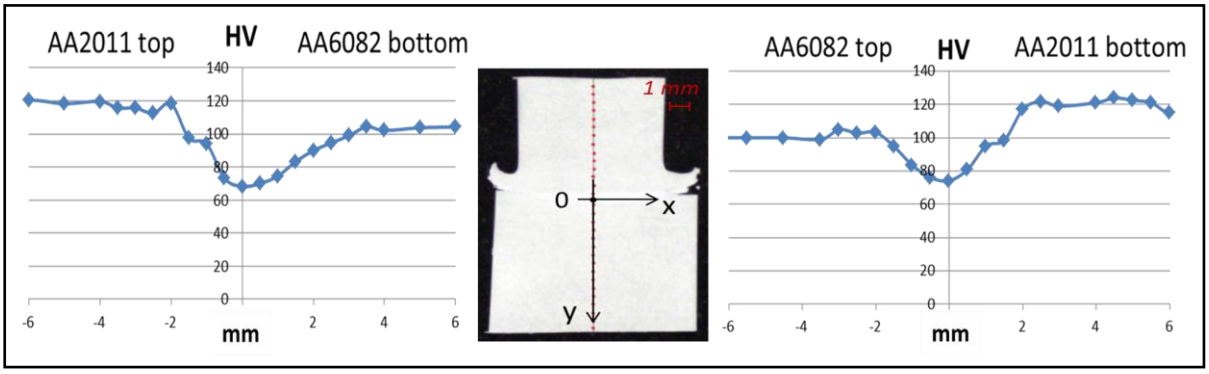

Figura 10: Analisi della microdurezza

Anche per questo test sono stati trovati i medesimi valori così, visto che pure la suddetta prova non ha fornito dei dati che hanno permesso la totale comprensione della meccanica di giunzione, si è deciso di rivolgersi ad un altro tipo di analisi che ha permesso di conoscere quanto in realtà le due leghe abbiano partecipato nella giunzione e che quindi, non si trattasse solo di un unione meccanica ma anche di giunzione per diffusione.

Come già anticipato, l'analisi che ha permesso questo tipo di indagine è stata l'analisi EDAX dove, una volta analizzate le leghe, è stato scelto un "elemento spia" da osservare. In particolare, per questo tipo di indagine, è stato utilizzato il rame che risulta essere presente solo nella lega AA2011 come è mostrato nella tabella 1.

Tabella 1. Composizione elementi in lega

Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
2011	0.5-1.2	0.7	5.0	0.4-1.2	0.2-0.8	0.1	0.25	0.15	remainder
6082	0.7-1.3	0.5	0.1	0.4-1	0.6-1.2	0.25	0.2	0.1	remainder

Per l'analisi sono state prese due giunzioni, una riconosciuta come giunto saldato ed una come giunto incollato, appartenenti alla stessa campagna.
La figura 11 mostra la percentuale di rame presente una volta che ci si sposta da una lega all'altra seguendo una linea di campionamento perpendicolare alla linea di saldatura lunga 1,2 mm avente come zero la linea di giunzione dei due materiali.

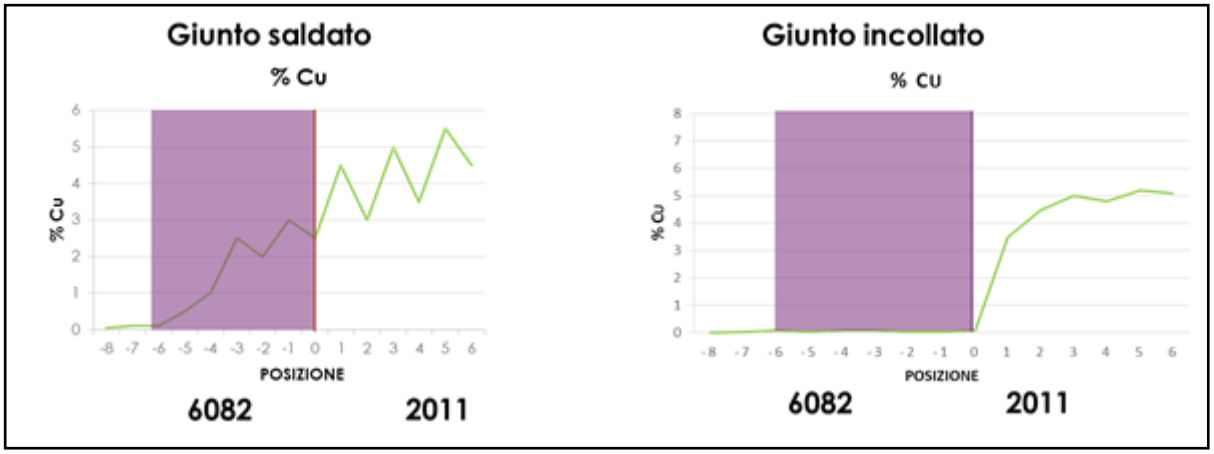

Figura 11: Analisi EDAX

Appare chiaramente visibile dalla figura, come nel caso del giunto incollato non sia presente in nessuna percentuale il rame mentre nel caso di giunto saldato si osserva una trasmigrazione atomica di questo da una lega all'altra.
Un altro dato importante che è possibile ricavare da questa analisi è la profondità di diffusione atomica che si è presentata. L'asse delle x, infatti riporta dei valori in decimi di millimetro quindi è possibile sostenere anche che una volta che si attiva la meccanica di giunzione si ha una trasmigrazione atomica e quindi un mescolamento del materiale dell'ordine degli 0,5 mm. Un altro dato certo è che questo tipo di fenomeno può essere asserito nel "campo del sound" nella finestra di lavorabilità, nel senso che non si notano particolari differenze se si resta all'interno di questo della finestra di lavorabilità.

5. Conclusioni

Dall'analisi si è evinto che:

- Per la modalità di giunzione mista non vale la normale regola, presente in letteratura, per cui un giunto con un miglior flash risulta con maggiori possibilità anche un giunto ben saldato
- Mediante l'analisi EDAX è stato possibile osservare che:
  - La giunzione avviene quando la lega AA2011 costituisce il provino superiore
  - Pressioni troppo elevate possono ostacolare la giunzione mentre l'aumento della frequenza di oscillazione ha un effetto benefico sulla efficacia della giunzione stessa.
  - La diffusione atomica si verifica nell'ordine degli 0,5 mm.

Bibliografia

[1] I. Bhamji, R. J. Moat, M. Preuss, P. L. Threadgill, A. C. Addison, M. J. Peel, "Linear friction welding of aluminium to copper", 2012, 17, Science and Technology of Welding and Joining, pp. 314-320.

[2] W.-Y. Li, T.J. Ma, S.Q. Yang, Q.Z. Xu, Y. Zhang, J.L. Li, H.L. Liao, "Effect of friction time on flash shape and axial shortening of linear friction welded 45 steel", 2008, Materials Letters,62, pp.293-296.

[3] A. Vairis, M. Frost, "Modelling the linear friction welding of titanium blocks", 2000, Materials Science and Engineering, A292, pp.8-17.

[4] P. Wanjara, E. Dalgaard, G. Trigo, C. Mandache, G. Comeau, J. J. Jonas, "Linear friction welding of Al-Cu: Part 1 - Process evaluation", 2011, Canadian Metallurgical Quarterly, 50, pp.350-359.

[5] Vairis A, Frost M. High frequency linear friction welding of a titanium alloy. Wear 1998;217:117–31.

[6] Varis A, Frost M. On extrusion stage of linear friction welding of Ti–6Al–4V. Mater Sci Eng A 1999;271:477–84.

[7] Romero J, Attallah M-M, Preuss M, Karadge M, Bray S-E. Effect of the forging pressure on the microstructure and residual stress development in Ti–6Al–4V linear friction welds. Acta Mater 2009;57:5582–92.

[8] Dalgaard E, Wanjara P, Gholipour J, Cao X, Jonas J-J. Linear friction welding of a near-b titanium alloy. Acta Mater 2012;60(2):770–80.

[9] I. Bhamji, M. Preuss, P. L. Threadgill, A. C. Addison, "Solid state joining of metals by linear friction welding: a literature review", 2011, Materials Science and Technology, 27, pp.2-12.

[10] B. Lang, T. C. Zhang, X. H. Li, D. L. Guo, "Microstructural evolution of a TC11 titanium alloy during linear friction welding", 2010, Journal of Materials Science, 45, pp. 6218-6224.

[11] S. Abrate, "Impact on laminated composites: recent advances", 1994, Appl. Mech. Rev., 47 (11), pp. 517-544.

[12] Society, American Welding. Welding Handbook: Welding Science and Technology. USA: American Welding Society, 2001. 0-87171-657-7.

[13] Crossland, B. Friction Welding. Contemporary Physics. 1971.

[14] George E. Totten, D. Scott MacKenzie, Handbook of Aluminum, vol.1

[15] L. Fratini , G. Buffa, D. Campanella, D. La Spisa, "Investigations on the linear friction welding process through numerical simulations and experiments", 2012, Materials and Design, 40, pp. 285-291.

[16] G. Buffa, M. Cammalleri, D. Campanella, L. Fratini, A. Pasta, "Ingegnerizzazione di una macchina prototipale per processi di saldatura linear friction welding", 2012, 2° Congresso nazionale del coordinamento della meccanica italiana.

[17] L. Fratini, G.Buffa, M. Cammalleri, D. Campanella, "On the linear friction welding process of aluminum alloys: Experimental insights through process monitoring", 2013, 62, pp. 295–298.

[18] C. Mary, M. Jahazi, "Multi-Scale Analysis of IN-718 Microstructure Evolution During Linear Friction Welding". Ad. Eng. Mat., 2008, 10(6): 573-578

[19]Ola OT, Ojo OA, Wanjara P, Chaturvedi MC. Analysis of microstructural changes induced by linear friction welding in a nickel-base superalloy. Metall Mater Trans A: Phys Metall Mater Sci 2011; 42(12): 3761–77.

[20] Zhang C-C, Huang J-H, Zhang T-C, Ji Y-J. The analysis in linear friction welding joint interface behavior of dissimilar titanium alloy. Cailiao Gongcheng/J Mater Eng 2011; 11:80–4.

[21] Dalgaard E, Wanjara P, Trigo G, Jahazi M, Comeau G, Jonas JJ. Linear friction welding of Al–Cu Part 2 –Interfacial characteristics. Canadian Metall Quart 2011; 50(4): 360–70.