



Ricerca di Sistema elettrico

Misura del FEE nei processi di saldatura
FSW su differenti impianti ed
individuazione dei fattori che lo
influenzano maggiormente

Carla Gambaro, Enrico Lertora, Chiara Mandolino, Marco Pizzorni



APPLICAZIONE DEL CONCETTO DI RENDIMENTO E VALUTAZIONE DEL FATTORE DI EFFICIENZA ENERGETICA DI UN IMPIANTO INDUSTRIALE PER SALDATURA FRICTION STIR WELDING

Carla Gambaro, Enrico Lertora, Chiara Mandolino, Marco Pizzorni
Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica, Gestionale e dei Trasporti dell'Università di Genova

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Area: "Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici"

Progetto: D3 "Efficienza energetica nel settore industria"

Obiettivo: D. Impiego tecnologie elettriche nei processi industriali

D.1 Efficientamento dei processi di saldatura industriale

Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Applicazione del concetto di rendimento e valutazione del fattore di efficienza energetica di un impianto industriale per saldatura Friction Stir Welding".

Responsabile scientifico ENEA: Ing. G. Barbieri

Responsabile scientifico dell'Università di Genova: Prof.ssa Ing. Carla Gambaro



Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 APPLICAZIONE DEL CONCETTO DI RENDIMENTO DI SALDATURA AD UNA SALDATRICE FSW INDUSTRIALE	5
2.1 LA SALDATRICE FSW INDUSTRIALE	5
2.2 SISTEMA DI MONITORAGGIO DEI CONSUMI ELETTRICI DURANTE LA REALIZZAZIONE DI GIUNTI.....	10
3 VALUTAZIONE DEL FATTORE DI EFFICIENZA ENERGETICA DI UN IMPIANTO INDUSTRIALE.....	12
3.1 VALUTAZIONE DELL'EFFICACIA DEI GIUNTI FSW	12
3.2 VALUTAZIONE DELL'EFFICIENZA DEI GIUNTI FSW	14
4 CONCLUSIONI.....	15
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	16
APPENDICE: CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO	17

Sommario

I temi sviluppati nell'ambito della presente ricerca riguardano lo studio del processo di saldatura allo stato solido Friction Stir Welding (FSW) e l'analisi del relativo fattore di efficienza energetica. Tale fattore - definito nel corso della ricerca *"Friction Stir Welding: definizione di condizioni standard di prova su impianti "on site" per il rilievo dell'efficienza di saldatura e dell'efficacia di processo per le leghe di alluminio"* - è stato valutato durante una campagna di prove svoltasi su di una saldatrice FSW per uso industriale opportunamente strumentata. Tale macchina è stata messa a disposizione dall'Istituto Italiano della Saldatura.

I dati relativi al consumo di tale macchina sono stati confrontati con quelli ottenuti durante gli studi effettuati nella sopracitata ricerca. Inoltre sono stati approfonditi gli aspetti relativi al FEE, analizzando i fattori di secondo livello di consumo energetico ad esso legati. A tale scopo, sono stati analizzati gli assorbimenti energetici delle differenti componenti della macchina saldatrice, separando quelli legati al sistema di movimentazione lungo gli assi cartesiani e quelli relativi alla testa saldante. Il sistema di acquisizione utilizzato per le rilevazioni energetiche è stato allestito in accordo con quanto messo a punto nella precedente campagna di prove.

Al fine di dare continuità alle attività svolte il primo anno della presente collaborazione e ottenere risultati confrontabili, sono state realizzate giunzioni testa a testa su lamiere di alluminio della serie 6082 T6, di spessore pari a 5 mm, utilizzando i medesimi parametri individuati quali ottimali.

1 Introduzione

L'attività prevista durante il presente anno ha lo scopo di validare la metodologia di valutazione del consumo di energia da parte di macchine per la saldatura Friction Stir Welding e definire l'efficienza e l'efficacia dell'impianto.

A tale scopo, sono state svolte delle acquisizioni monitorando una macchina appositamente realizzata per effettuare saldature FSW in ambiente industriale.

2 Applicazione del concetto di rendimento di saldatura ad una saldatrice FSW industriale

In questa prima fase del progetto, sono stati analizzati gli aspetti peculiari di una saldatrice Friction Stir Welding (FSW) industriale in modo da individuare le parti in movimento e poterne così definire i corrispondenti assorbimenti energetici.

2.1 La saldatrice FSW industriale

Le acquisizioni sono state eseguite su una macchina FSW-Gantry prodotta da H. Loitz-Robotik installata presso l'Istituto Italiano di Saldatura (Fig. 1).



Fig. 1 – Macchina FSW-Gantry (H.Loitz-Robotik)

Essa è una macchina a portale avente due montanti, una traversa fissa ed una mobile (secondo la direzione Z) sulla quale è collocato l'utensile.

Le lamiere da saldare vengono fissate su una tavola dotata di moto di avanzamento rettilineo lungo l'asse X. La forza massima esercitabile lungo la direzione Z è pari a 55 kN, con una corsa utile pari a 520 mm; lungo la direzione Y, invece, l'utensile può compiere uno spostamento di circa 2400 mm. Il movimento lungo la direzione Z è realizzato da due giunti prismatici connessi in serie, il primo dei quali, ad azionamento elettrico, realizza la corsa principale; il secondo, ad azionamento elettro-idraulico, consente invece di effettuare il posizionamento di precisione. L'azionamento del mandrino è pilotato da un servomotore sincrono CA, avente velocità nominale di rotazione di 2400 giri/min e coppia nominale di 70 Nm.

La testa di saldatura (Fig. 2) è costituita da tre sotto-sistemi: il supporto del mandrino, la connessione al portale e il mandrino stesso, che viene azionato da un motore esterno.

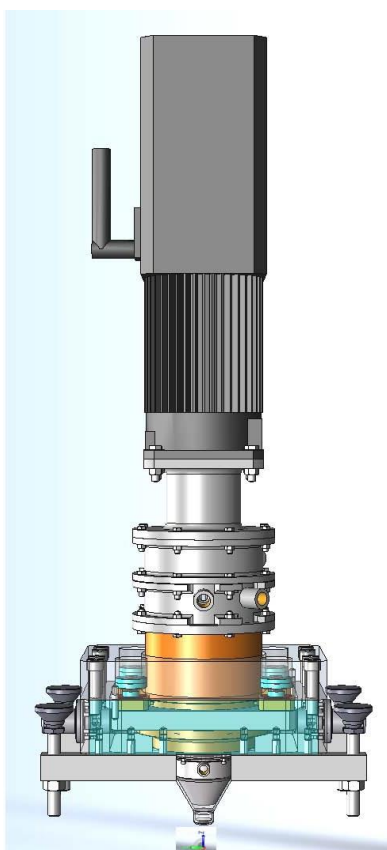


Fig. 2 – Vista 3d-CAD della testa saldante

La testa saldante è sostenuta da quattro sensori piezo-ceramici (visibili in Fig. 3) che consentono di realizzare le misure di forza. Può essere inclinata manualmente rispetto alla direzione X (direzione di saldatura), con un angolo di tilt variabile tra $+3^\circ$ e -3° (Fig. 4). Durante l'esecuzione dei giunti, l'angolo di tilt è stato mantenuto costante e pari a $+1,5^\circ$.

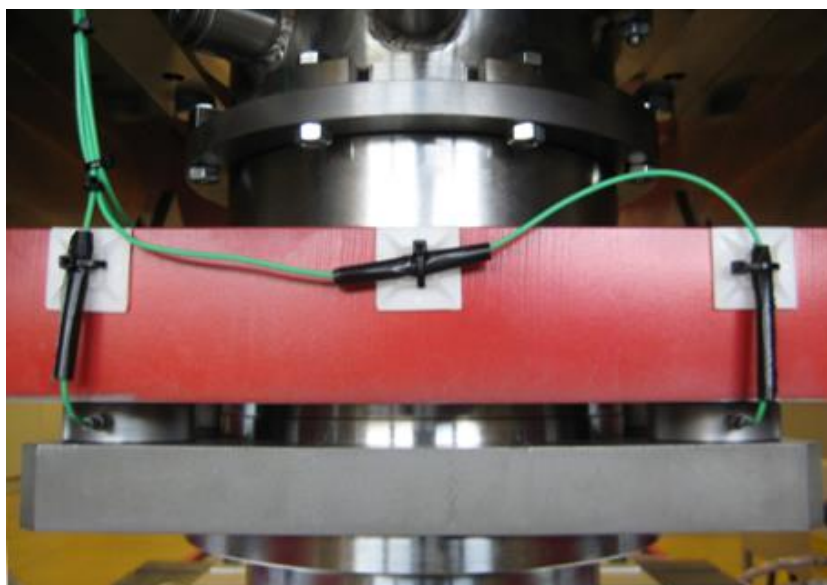


Figura 3 – Sensori piezo-ceramici a sostegno della testa saldante



Fig. 4 – Sistema di regolazione dell'angolo di tilt

La testa saldante è equipaggiata con un sistema di raffreddamento ad olio a circuito chiuso, dotato di scambiatore di calore (Fig. 5).

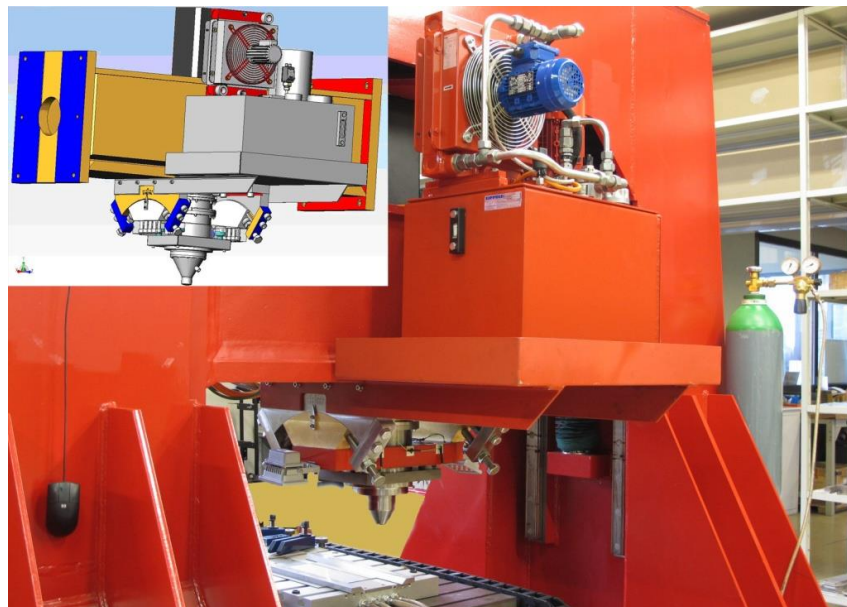


Fig. 5 – Vista generale della traversa mobile, comprensiva della testa saldante e del sistema di raffreddamento

L'albero del mandrino è cavo ed è separato internamente in due camere da un divisore centrale. Le camere vengono sfruttate per il passaggio del fluido refrigerante. Vicino al portautensile, sul lato inferiore dell'albero, le due camere sono collegate circolarmente tra loro; in questo modo si ottiene un'azione diretta e regolare di raffreddamento.

Grazie alla scelta dei materiali ed allo spessore delle pareti intorno al portautensile, si può ottenere una bassa resistenza termica e quindi una buona conduttività del calore. Viene perciò consentita una efficace trasmissione del calore tra utensile e fluido di raffreddamento.

Il sistema di raffreddamento dell'utensile è permanentemente in funzione durante tutte le fasi di saldatura (rotazione, penetrazione, saldatura, estrazione).

L'utensile impiegato (Fig. 6) è di tipo scomponibile, con spalla piatta in acciaio temprato ($\varnothing=19\text{mm}$) e punta conica filettata in acciaio per utensili; esso viene inserito all'interno del mandrino e fissato con un grano. L'accoppiamento deve essere tale da garantire un certo gioco altrimenti, in seguito alle deformazioni termiche, l'utensile potrebbe restare bloccato all'interno del mandrino.



Fig. 6 – Utensile FSW scomponibile

Al fine di ottimizzare la visualizzazione dello stato della lavorazione durante la saldatura, nel portale è integrato un sistema di monitoraggio grafico (Fig. 7).



Fig. 7 – Monitor per la visualizzazione in tempo reale dei parametri di saldatura

L'operatore è in grado di comandare le operazioni di saldatura attraverso un teach pendant (Fig. 8), su cui vengono visualizzati tutti i parametri di processo e attraverso il quale è possibile operare variazioni in tempo reale. I dati relativi al processo vengono copiati e archiviati automaticamente su un PC esterno.



Fig. 8 – Teach pendant di comando

La zona scarsamente illuminata sotto la traversa è equipaggiata con una illuminazione a LED, per una migliore osservazione del processo di saldatura (Fig. 9). In questo modo, vengono creati anche i presupposti per l'integrazione di una fotocamera, estendendo la tecnica con sistemi di inseguimento del giunto.



Fig. 9 – Illuminazione a LED della zona di saldatura

Per il sostegno e il bloccaggio delle lamiere durante la saldatura, si è fatto ricorso ad una piastra in lega di alluminio provvista di condotti interni destinati al passaggio del fluido di raffreddamento e sulla cui superficie sono state realizzate apposite cave che alloggiavano le staffe di fissaggio (Fig. 10). Sulla mezzeria della piastra è presente un inserto in lega di tungsteno, resistente alle alte temperature, tale da garantire il sostegno meccanico dei pezzi da saldare.

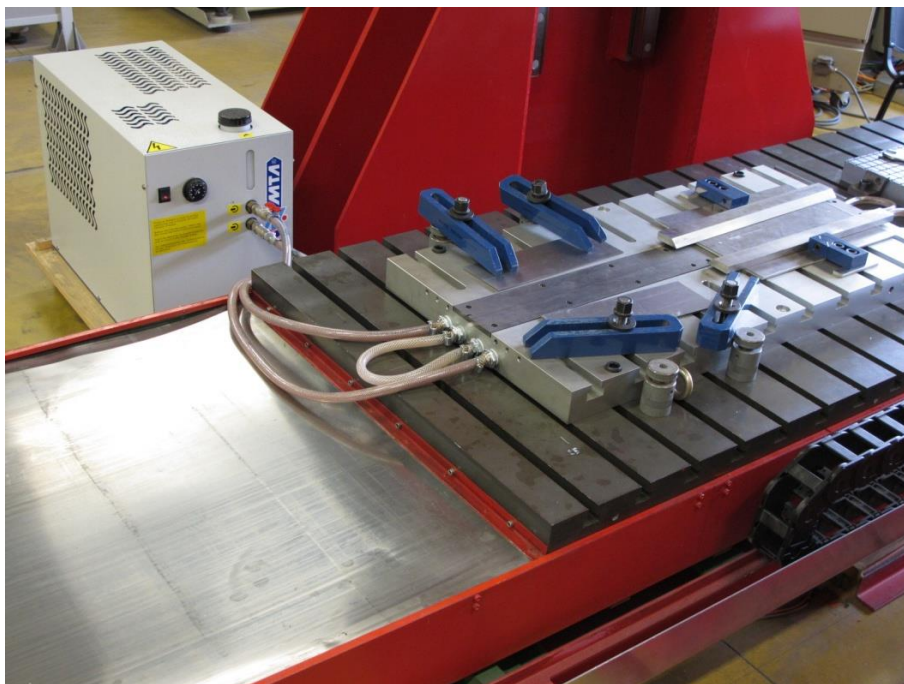


Fig. 10 – Piastra di sostegno e sistema di fissaggio

2.2 Sistema di monitoraggio dei consumi elettrici durante la realizzazione di giunti

Al fine di valutare i consumi energetici dell’impianto di saldatura FSW, sono stati predisposti due livelli di acquisizione dei parametri elettrici. Il primo livello è inerente alla movimentazione della tavola portapezzo nella direzione longitudinale (fase di saldatura), mentre il secondo corrisponde al moto di rotazione del mandrino (fase di rimescolamento del materiale plasticizzato) e al sistema di refrigerazione dello stesso secondo lo schema riportato in figura 11.

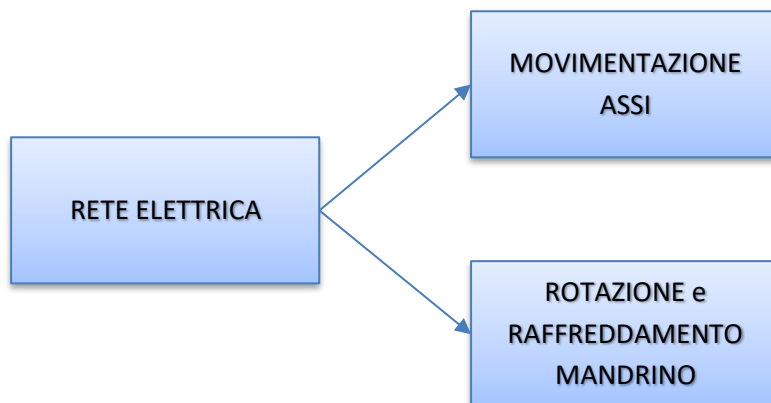


Fig. 11 - Schema dei punti di rilevamento del consumo energetico

La rilevazione della potenza assorbita e dei parametri elettrici dalla macchina è stata effettuata allestendo un sistema di acquisizione analogo a quello utilizzato nella precedente ricerca e composto da un wattmetro monofase Fluke (Fig. 12), un oscilloscopio Le Croy (Fig. 13) e le relative pinze amperometriche per la rilevazione della corrente circolante in ogni singola fase (Fig. 14). Il medesimo allestimento è stato impiegato per la rilevazione dei due livelli sopracitati. L’oscilloscopio è stato introdotto nella catena di misura per monitorare l’andamento delle tre fasi distintamente ed il loro sfasamento.



Fig. 12 - Wattmetro elettronico digitale Fluke – modello 418



Fig. 13 - Oscilloscopio LeCroy – modello WaveAce 204



Fig. 14 - Pinze amperometriche

La rilevazione della potenza assorbita dalla macchina in condizione di funzionamento a vuoto (senza effettuare la saldatura) si è resa necessaria poiché alla potenza assorbita durante la giunzione si deve sottrarre la potenza assorbita a vuoto; in tal modo è stato possibile individuare la potenza utilizzata per generare il calore necessario per realizzare le saldature.

3 Valutazione del fattore di efficienza energetica di un impianto industriale

Ricordando che come efficacia si intende la capacità di raggiungere un determinato obiettivo, mentre l'efficienza è la capacità di raggiungerlo con la minima allocazione possibile di risorse, anche nel caso della FSW applicata ad un impianto industriale si è fatto riferimento ad una finestra di saldabilità, in cui sono identificati gli accoppiamenti dei parametri di saldatura che permettono di ottenere giunti privi di difetti e quindi in grado di soddisfare i requisiti delle prove di qualifica.

La finestra di saldabilità presa in considerazione è quella relativa a giunti testa a testa realizzati tra lamiere di alluminio della serie 6082 T6, di spessore pari a 5 mm ed individuata durante la precedente campagna di prove (Tab. 1). Le sigle 01-PXX identificano i giunti realizzati.

Tab. 1 - Combinazioni Velocità di avanzamento – Velocità di rotazione dell'utensile

Velocità di avanzamento utensile [mm/min]	Velocità di rotazione utensile [giri/min]		
	1230	630	460
390		01-P4	
260	01-P1	01-P2	01-P3

Durante l'esecuzione dei giunti, è stato mantenuto un angolo di tilt pari a 1,5°.

3.1 Valutazione dell'efficacia dei giunti FSW

Per verificare e confermare il raggiungimento del grado di qualità prefissato su tutti i giunti prodotti, sono state eseguite delle analisi visive, radiografiche e metallografiche.

Durante l'esame visivo, è stato possibile notare come la saldatura realizzata con elevata velocità di rotazione (1230 giri/min) abbia prodotto una giunzione caratterizzata da una superficie opaca mentre le saldature realizzate con velocità di rotazione dell'utensile meno elevate abbiano dato origine a giunti caratterizzati da superfici più lisce e lucide.

In figura 15 è riportata la comparazione dei quattro giunti realizzati.

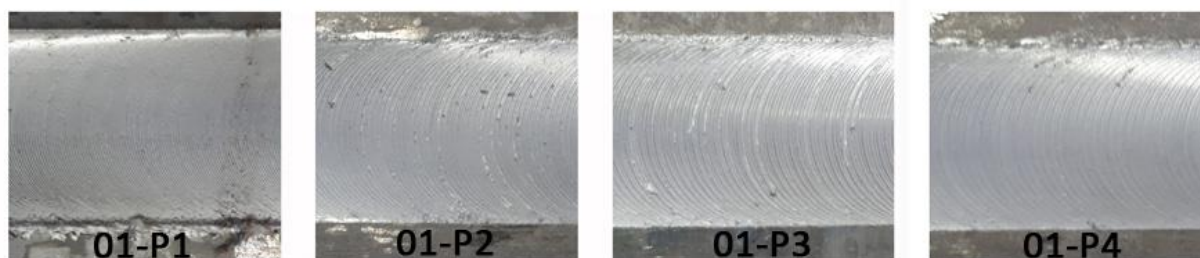






Fig. 15 - Fotografie della superficie di alcuni giunti in lega AA6082 T6

Su tutti i giunti è stato effettuato un esame radiografico, in modo da individuare l'eventuale presenza di difetti interni, non rilevabili con esame visivo, quali tunnel o mancanze di penetrazione (Tab. 2).

Tab. 2 - Analisi radiografica dei giunti in lega AA6082 T6

Provino numero	Analisi radiografica
01-P1	
01-P2	
01-P3	
01-P4	

Come si nota dalle immagini riportate in tabella 2, i giunti risultano privi di difetti interni.

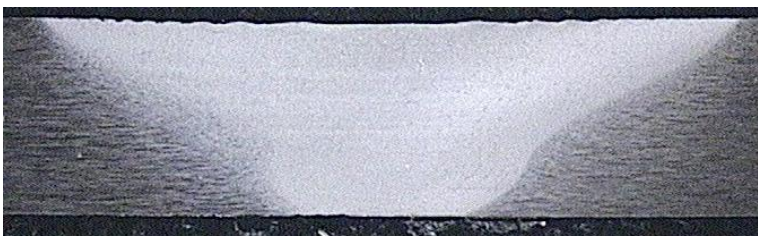
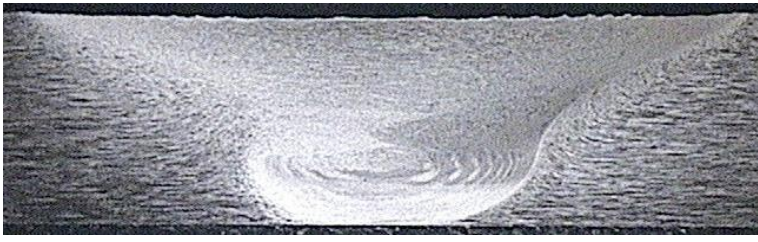
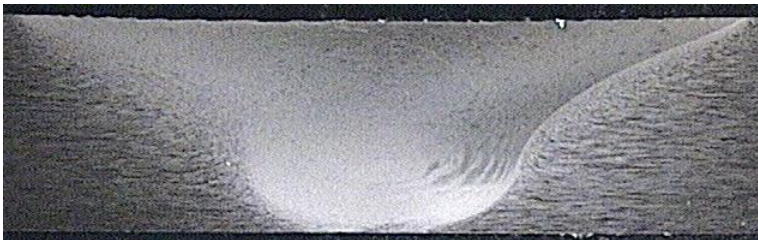
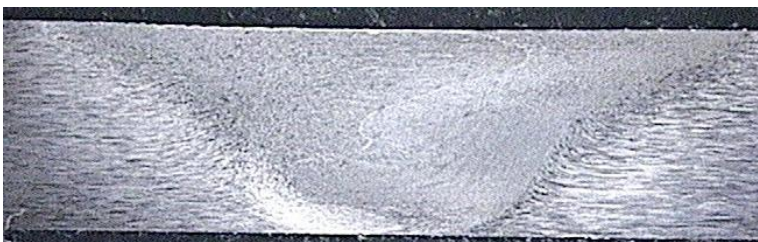
I provini metallografici sono stati ricavati perpendicolarmente alla direzione di saldatura, in modo da osservare le strutture presenti nelle varie zone dei giunti. Dopo il taglio, i provini sono stati inglobati in resina e successivamente lucidati; è stato poi effettuato un attacco con reagente di Keller e si è proceduto all'esame della struttura mediante microscopio ottico (Fig. 167).



Fig. 16 - Vista di un provino metallografico

Le immagini riportate in tabella 3 mostrano le sezioni macrografiche dei giunti realizzati. Si noti che il giunto 01-P4, realizzato con velocità di rotazione 630 giri/min e velocità di avanzamento 390 mm/min, è quello che presenta una struttura meno uniforme nella zona centrale.

Tab. 3 - Analisi macrografica dei giunti in lega AA6082 T6

Provino numero	Analisi macrografica
01-P1	
01-P2	
01-P3	
01-P4	

Si conferma che l'efficacia del procedimento si ottiene adottando velocità di avanzamento comprese tra i 260 ed i 390 mm/min e velocità di rotazione tra i 460 e i 1230 giri/min, con un impianto FSW di tipo industriale.

3.2 Valutazione dell'efficienza dei giunti FSW

Una volta confermati i parametri che hanno permesso di ottenere giunti caratterizzati dalla maggiore efficacia, si è proceduto alla rilevazione dei consumi energetici utilizzando l'attrezzatura descritta nel paragrafo 2.

In tabella 4 sono riportati i parametri di saldatura adottati ed i consumi elettrici rilevati.

Tab. 4 - Parametri di saldatura e potenza totale assorbita

ID Prova	Parametri di saldatura		Potenza a vuoto mandrino [W]	Potenza a vuoto movimento assi [W]	Potenza utile al mandrino [W]	Potenza utile movimento assi [W]	Potenza utile totale [W]
	Velocità di rotazione utensile [giri/min]	Velocità di avanzamento dell'utensile [mm/min]					
01-P1	1230	260	16811	1868	2547	2208	4755
01-P2	630	260	16132	1868	2887	1528	4415
01-P3	460	260	15283	1868	2717	1528	4245
01-P4	630	390	16132	2208	2038	1104	3141

Dall'analisi macrografica dei giunti, si è valutata l'area del materiale portato alla temperatura di plasticizzazione. Considerando una lunghezza del giunto di riferimento pari a 10 mm e noto il calore specifico dell'alluminio ($c=800 \frac{J}{kg \cdot K}$), è possibile calcolare l'energia fornita al giunto. Conoscendo inoltre la velocità di avanzamento, è immediato calcolare la potenza utilizzata per plasticizzare i lembi. I valori rilevati e calcolati sono riportati in tabella 5.

Tab. 5 - Dimensioni della zona plasticizzata ed energia assorbita dal materiale

ID Prova	Dimensioni della zona plasticizzata		Temperatura raggiunta [K]	Energia assorbita dal materiale [J]	Potenza assorbita dal materiale [W]
	Area [mm ²]	Volume [mm ³]			
01-P1	76.1	761.2	760	1203	521
01-P2	64.4	643.6	735	984	426
01-P3	54.5	545.1	705	799	346
01-P4	52.0	520.3	699	756	492

Per valutare l'efficienza delle saldature è sufficiente fare il rapporto tra la potenza assorbita dal materiale e la potenza totale assorbita dalla rete. In tabella 6 sono riportati i valori di efficienza delle saldature FSW realizzate.

Tab. 6 - Efficienza di saldatura FSW

ID Prova	Efficienza di saldatura FSW [%]
01-P1	10.97
01-P2	9.66
01-P3	8.16
01-P4	15.65

4 Conclusioni

La ricerca ha confermato l'efficacia della metodologia messa a punto durante la prima campagna di prove e valutare l'efficienza di un impianto di saldatura FSW industriale.

Dall'analisi dei risultati delle prove indicati in tabella 6, si può concludere che una diminuzione della velocità di rotazione comporta un decremento dell'efficienza del processo di saldatura, esattamente in linea con quanto rilevato durante le prove effettuate precedentemente su una macchina fresatrice trasformata in saldatrice FSW.

5 Riferimenti bibliografici

- [1] AA. VV., “L’etichetta energetica”, ENEA
- [2] W.M. Thomas, E.D. Needham, M.G. Murch, P. Temple-Smith, and C.J. Dawes, “Friction Stir Butt Welding”, International Patent Application PCT/GB92/02203, GB Patent Application 9125978.8, 6 December 1991, and U.S. Patent 5,460,317, US Patent Office, Alexandria, VA, 1995.
- [3] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Temple-Smith, and C.J. Dawes, “Improvements Relating to Friction Welding”, International Patent Application B23K 20/12, B29C 65/06, 1993.
- [4] C. Gambaro, L. Fratini, A. Squillace, J. Adamowki, M. Ponte, “Friction Stir Welding – introduzione alla tecnologia”, 2009, Aracne Editrice.
- [5] C. J. Dawes, “Friction Stir Welding”, Talat Lecture 4410.
- [6] M. J. Greitmann, P. Deimel, “Friction Stir Welding - innovative technology for Joining Aluminium Components”, Otto-Graf-Journal Vol. 16, 2005, pgg. 185-192
- [7] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, “Friction stir welding and processing”, Materials Science and Engineering R 50, 2005, pgg. 1-78
- [8] UNI EN ISO 25239 – 4: 2012 “Saldatura friction stir – alluminio – Specificazione e qualificazione delle procedure di saldatura”
- [9] H.S. CARSLAW AND J.C. JAEGER, Conduction of heat in solids, Oxford Press
- [10] Y. Li, L.E. Murr, J.C. McClure, Flow visualization and residual microstructures associated with the FSW of 2024 aluminum to 6061 aluminum, Materials Science and Engineering, vol. A271, (1999), pp. 213-223
- [11] T.J. Lienert, W.L. Stellwag, L.R. Lehman, *Comparison of Heat Inputs: Friction Stir Welding vs. Arc Welding*, Abstracts of the AWS conference, (2002), paper 011
- [12] T.J. Lienert, W.L. Stellwag, L.R. Lehman, *Heat Inputs, Peak Temperatures and Process Efficiencies for FSW*, 4th International Symposium on Friction Stir Welding, Park City, Utah, USA, (2003).
- [13] P. Zelinski, “Welding on a machining centre”, www.toolingu.com/articles .
- [14] Ponte M., Adamowski J., Gambaro C., Lertora E., “Low-cost transformation of a conventional milling machine into a simple FSW work station”, 7th International Conference on Advanced Manufacturing Systems and Technology AMST '05, Udine, 9-10 Giugno 2005, pgg. 357-365.
- [15] M.F. Zaeh; D. Eireiner; L. Papadakis, “Friction stir welding with modern milling machines - requirements, approach and application”, 5th International FSW Symposium; Metz, Francia 14-16 Settembre 2004.
- [16] AA.VV. “Appunti di Misure Elettriche ed Elettroniche”, Gruppo di Misure Elettriche ed Elettroniche dell’Università di Napoli Federico II e della Seconda Università di Napoli, Napoli 2008.

Appendice: curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Il gruppo di ricerca del Dipartimento di Ingegneria Meccanica Energetica Gestionale e dei Trasporti della Scuola Politecnica dell'Università degli Studi di Genova, coordinato dalla Professoressa Carla Gambaro, collabora da anni con Università e Centri di Ricerca italiani ed europei, effettuando studi inerenti le diverse tecniche di giunzione.

In particolare, sono state effettuate diverse campagne di prova per determinare le finestre di saldabilità di numerose leghe di alluminio e compositi a matrice metallica, mediante la tecnica di saldatura Friction Stir Welding (FSW).

Il gruppo è composto da tre ricercatori, due dei quali hanno conseguito la qualifica di International Welding Engineer, figura di coordinamento del processo di saldatura, riconosciuta dall'International Welding Federation.

A conferma delle competenze acquisite, il gruppo ha gestito diversi progetti di ricerca relativi allo studio della FSW, tra i quali si citano i seguenti:

- Studio e sviluppo di processi innovativi per l'applicazione industriale di tecnologie di Friction Stir Welding (FSW), finanziato nell'ambito del Docup Ob 2 Mis. 1.4 Sottomisura B della Legge 598/94
 - Sviluppo di metodologie innovative per l'indurimento superficiale mediante FSW, di stampi impiegati nella lavorazione di materiali polimerici termoplastici, finanziato dal Parco Scientifico e Tecnologico della Liguria nell'ambito del Docup Ob. 2 Misura 1.4 Sostegno all'innovazione Legge 598/94.
 - Resistenza a fatica di giunti in lega AA8090 saldati mediante FSW, finanziato dall'Università di Genova
- Di seguito vengono riportate le principali pubblicazioni, suddivise per tipologia, redatte a seguito dell'attività di ricerca svolta presso i laboratori del gruppo oppure in collaborazione con alcuni tra i maggiori centri di ricerca europei, quali EADS e GKSS.

Lavori su libro:

- Gambaro C., Adamowski J., "Le metodologie di giunzione", Auto e alluminio, 2004, p. 241-250, BRESCIA: Edimet, ISBN/ISSN: 788886259262.
- Gambaro C., Adamowski J., "Methods of joining aluminium alloys", Aluminium and cars, 2005, p. 241-250, BRESCIA: Edimet, ISBN/ISSN: 88-86259-24-7.
- Gambaro C., Lertora E., Metodologie di giunzione a freddo - L'alluminio e il mare. p. 154-163, BRESCIA: Edimet, 2008 ISBN/ISSN: 88-86259-29-8.
- Gambaro C., Fratini L., Squillace A., Adamowski J., Buffa G., Ponte M., Friction Stir Welding – introduzione alla tecnologia, 2009 ISBN: 978-88-548-2530-7.

Lavori pubblicati su rivista internazionale:

- Tovo R., Gambaro C., Volpone M.L., "Friction Stir Welding: an innovative seam technology", Welding International, Vol. 17, n. 1, pagg. 36–42, 2003.
- Uzun H., Dalle Donne C., Argagnotto A., Ghidini T., Gambaro C., "Friction stir welding of dissimilar Al 6013-T4 to X5CrNi18-10 stainless steel", ELSEVIER. vol. 26, pp. 41-46 ISSN: 0922-3444, 2004
- Marzoli M.L., Von Strombeck A., Dos Santos J.F., Gambaro C., Volpone M.L., "Friction Stir Welding of an AA6061/Al₂O₃/20p reinforced alloy, Composites science and technology Elsevier, pagg. 363-371, 2005.
- Adamowski J., Gambaro C., Lertora E., Ponte M., Szkodo M., "Analysis of FSW welds made of aluminium alloy AW6082-T6", Archives of materials science and engineering (AMSE), Agosto 2007, Volume 28-8, pagg.: 453-460.
- Lertora E., Ponte M., Gambaro C., "Mechanical – structural characterisation of friction stir welds between AA5754 H32 and AA2024 T3 alloys", Scientific Applications and Technical Notes, Gennaio 2009, Volume 1, pagg.: 39-50, ISSN: 1974-8493.
- Lertora E., Gambaro C., "AA8090 Al-Li alloy FSW parameters to minimize defects and increase fatigue life", International Journal of Material Forming, vol. 3, 2010, pagg. 1003-1006, DOI: 10.1007/s12289-010-0939-1.

- Lertora E., "Comparison of AA 2024 T3 friction stir welded and riveted overlap joints with the addition of a pressurization test" *Materials and design*, vol. 49, 2013, pagg. 259-266, ISSN 0261-3069, 10.1016/j.matdes.2013.01.052
- M. Pedemonte, C. Gambaro, E. Lertora, C. Mandolino, "Fatigue assessment of AA8090 friction stir butt welds after surface finishing treatment", *Aerospace science and technology*, vol 27, 2013, pagg 188-192, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2012.08.006>.
- Lertora E., Mandolino C., Gambaro C., "Effect of welding parameters on AA8090 Al-Li alloy FSW T-joint", *Key Engineering Materials*, vol 554-557, 2013, pagg. 985-995, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.554-557.985.

Lavori pubblicati su rivista nazionale:

- Marzoli L., Von Strombeck, Dos Santos J., Gambaro C., Volpone M., Rizzuto E., "Giunzioni di Al-CMM mediante Friction Stir Welding: influenza sulla distribuzione e sulle dimensioni delle particelle della fase dispersa", *La metallurgia italiana*, n° 10, 2003, pagg. 33-38, Edimet, Brescia, Italia.
- Volpone M.L., Gambaro C., Lertora E., Magnasco M., Dos Santos J., "Recenti sviluppi della tecnologia Friction Stir Welding – l'acciaio: una scommessa?"; *Rivista Italiana della Saldatura*, n° 3, 2004, pagg. 731-735, Istituto Italiano della Saldatura, Genova, Italia.
- Ponte M., Lertora E., Adamowski J., Gambaro C., "Caratterizzazione meccanica di giunti Friction Stir Welding tra materiali dissimili", *Rivista Italiana della Saldatura*, n° 2, 2006, pagg. 211-217, Istituto Italiano della Saldatura, Genova, Italia.
- Ponte M., Lertora E., Adamowski J., Gambaro C., "[Mechanical characterisation of FSW joints](#)", *A&L - Aluminium and its Alloys*, Settembre 2006, pagg.: 116-121.
- Ponte M., Lertora E., Gambaro C., "Caratterizzazione meccanico strutturale di giunzioni friction stir tra le leghe AA5754 H32 e AA2024 T3", *La metallurgia italiana*, Settembre 2007, pagg.: 13-19.
- Lertora E., Gambaro C., Ponte M., Gelci R., "Confronto tra giunti rivettati e giunti FSW a sovrapposizione", *Lamiera*, Settembre 2008, pagg.: 124-131.
- Pedemonte M., Gambaro C., Lertora E., Mandolino C., "La Friction Stir welding per incrementare la vita a fatica", *Lamiera*, Ottobre 2010, pagg.: 86-89.

Lavori presentati a congressi internazionali:

- Marzoli L., Von Strombeck A., Dos Santos J.F., Gambaro C., Volpone M.L., "Friction Stir Welding of an AA6061/Al₂O₃/20% reinforced alloy", 6th International Seminar on Experimental Techniques and Design in Composite Materials, 2003, pagg. 1-5, Vicenza, Italia, SGEEditoriali, Padova, Italia.
- Marzoli M.L., Von Strombeck, Dos Santos J.F., Limberg W., Gambaro C., Volpone M.L., Rizzuto E., "Tool wear in Friction Stir Welding of an AA6061/Al₂O₃/20p alloy", 12th International Conference on Experimental Mechanics ICEM 12, 2004, pagg. 1-8, Bari, Italia.
- Ponte M., Adamowski J., Gambaro C., Lertora E., "Low-cost transformation of a conventional milling machine into a simple FSW workstation", 7th International Conference on Advanced Manufacturing Systems and Technology AMST '05, 2005, pagg. 357-365, Udine, Italia.
- Ceschini L., Boromei I., Gambaro C., Minak G., Morri A., Tarterini F., "Friction Stir Welding of aluminium based composites reinforced with Al₂O₃ particles", *Thermec International Conference on Processing & Manufacturing Of Advanced Materials*, MARITIM Hotel Berlin, Germany, August 25-29, 2009.
- Lertora E., Gambaro C., "AA8090 Al-Li alloy FSW parameters to minimize defects and increase fatigue life", 13th International ESAFORM Conference on Material Forming, ESAFORM 2010, Brescia, Italy, 7-9 Aprile 2010.