

Pannelli aeronautici rinforzati con parti estruse saldate mediante FSW: caratterizzazione meccanica

G. Serroni, A. Squillace, U. Prisco, C. Bitondo, A. Prisco

La Friction Stir Welding (FSW) è una delle tecniche di giunzione più interessanti per l'industria aeronautica poiché, essendo un processo di saldatura allo stato solido, permette di superare tutti i problemi conosciuti collegati alle trasformazioni di fase dei processi di giunzione allo stato fuso. Tale tecnica, inoltre, permette di ridurre il peso nelle aerostutture se comparate a quelle ottenute mediante la tecnologia del rivettamento. In questo lavoro viene presentata una caratterizzazione meccanica di un componente ottenuto con tecnologia FSW mediante giunzioni sovrapposte (lap). Il campione simula un pannello bulkhead, ossia un pannello che separa un ambiente pressurizzato di un aeromobile (ad esempio la cabina) da ambienti non pressurizzati (ad esempio la stiva). Tali pannelli (skin) sono usualmente irrigiditi da parti estruse rivettate sul pannello stesso (stringer). In questo caso le parti estruse, con una sezione a forma di T, sono state giuntate al pannello tramite FSW con configurazione lap sui due lembi di appoggio. Le condizioni di carico sono state scelte per simulare due condizioni operative reali: tensione circonferenziale (hoop stress) e trazione perpendicolare al piano di sfessaggio (T-pull). I risultati permettono di apprezzare il buon comportamento atteso dal simulatore. Una caratteristica specifica delle giunzioni in configurazione a sovrapposizione (FSW Lap), ossia il difetto ad uncino (hook defect), gioca un ruolo significativo nelle rotture osservate durante i test statici e nel fenomeno di innesco delle cricche durante i test ciclici. I risultati indicano che l'attenzione dovrebbe essere focalizzata sul settaggio dei parametri di processo al fine di minimizzare il verificarsi dell'hook defect.

PAROLE CHIAVE:

titanio e leghe, saldatura, caratterizzazione materiali, prove meccaniche, difetti elettrochimica, fatica

INTRODUZIONE

La Friction Stir Welding è una recente tecnologia di giunzione allo stato solido che, inventata e brevettata presso The Welding Institute (TWI) di Cambridge (UK) nel 1991 [1], ha mostrato molte potenzialità.

A causa delle sue interessanti proprietà, molte attività di ricerca sono state implementate in tutto il mondo su differenti materiali (leghe di alluminio prima di tutto, ma anche acciaio, titanio, magnesio, rame, polimeri, etc.) e per differenti geometrie, anche se la più indagata è stata, senza dubbio, la configurazione testa a testa (butt).

Altre geometrie, come giunti a sovrapposizione, anche se potenzialmente molto interessanti, sono state meno studiate. Ferrini e Pironi [2] hanno indirizzato le proprie ricerche proprio sulla vita a fatica di giunzioni a sovrapposizione semplici prodotte con FSW, mostrando l'influenza della sovrapposizione di materiale avvenuta in questo caso. Ericsson ed altri [3] hanno studiato le stesse geometrie utilizzando differenti utensili e valutando la loro influenza sulle proprietà dei giunti. Tran ed altri [4] hanno, invece, focalizzato la loro attenzione sui lap joint realizzati attraverso Friction Stir Spot Welding su due differenti leghe di alluminio. Borrelli e Squillace [5] si sono occupati delle proprietà meccaniche statiche di giunti ottenuti dall'accoppia-

mento di leghe dissimili sia con singola passata che multipla. In questo lavoro, l'attenzione è stata rivolta a giunture simulanti una configurazione geometrica utilizzata in strutture per la realizzazione di pannelli *bulkhead*. L'obiettivo è sfruttare la fattibilità di sostituire i rivetti con giunti FSW.

SPERIMENTAZIONE

Materiali e saldature

Una costola di rinforzo (stringer) in lega AA 2024 T351 estrusa con sezione a "T" è stata sovrapposta e giuntata tramite FSW su entrambi i lembi del profilo ad un pannello laminato e placcato di lega AA2056 T3, come illustrato in Figura 1.

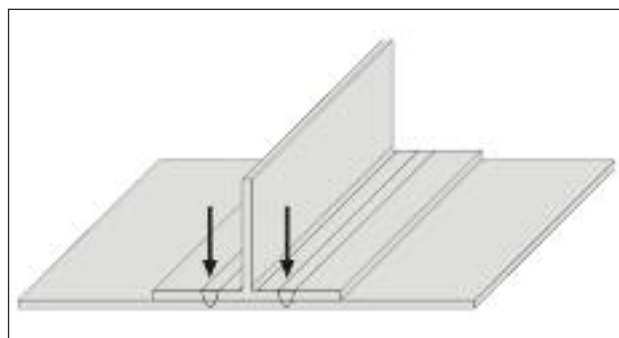


FIG. 1 Schema delle giunzioni, le frecce nere indicano i due cordoni continui.

Scheme of the joint, black arrows indicate two continuous weld beads.

G. Serroni, A. Squillace, U. Prisco, C. Bitondo
Dip. di Ingegneria dei Materiali e della Produzione,
Università degli Studi di Napoli "Federico II"

A. Prisco
Alenia Aeronautica Spa, Pomigliano d'Arco, Napoli.

Elemento	AA 2056		AA 2024	
	min	max	min	max
Silicio	–	0.10	–	0.50
Ferro	–	0.12	–	0.50
Rame	3.30	4.30	3.80	4.90
Manganese	0.10	0.50	0.30	0.90
Magnesio	0.60	1.40	1.20	1.80
Cromo	–	0.05	–	0.10
Zinco	–	0.80	–	0.25
Titanio	–	0.10	–	0.15
Alluminio	rimanente			

TAB. 1 **Composizione delle leghe di Alluminio.**

Aluminium alloys compositions.

	E GPa	YS MPa	UTS MPa	A%
BM (L)	75	501	523	11.4
BM (LT)	77	490	512	10.5

TAB. 2 **Proprietà meccaniche della AA 2056 T3.**

AA 2056 T3 mechanical properties.

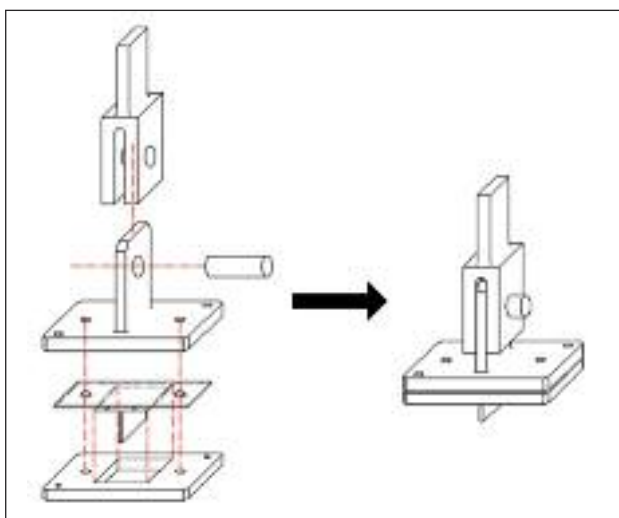


FIG. 2 **Schema di afferraggio utilizzato per test T-pull.**

Scheme of the jig used to perform T pull tests.

In tabella 2 sono riportate le principali proprietà meccaniche di una lamiera di AA 2056 T3 come quella utilizzata, lungo le due principali direzioni L ed LT.

In tale figura, le due frecce individuano le posizioni dei cordoni di saldatura. I principali parametri di processo adottati sono: velocità di rotazione 400 RPM, velocità di avanzamento dell'utensile pari a 100 mm/min e angolo di incidenza pari a 3°.

È importante mettere in evidenza che i due lembi sono stati saldati singolarmente con lo stesso verso di rotazione e stessa direzione di avanzamento.

Procedura di prova

La resistenza a trazione statica e a fatica sono state determinate utilizzando una macchina servo-idraulica equipaggiata con un attuatore della capacità di carico di 500kN. Per le prove di fatica è stata utilizzata una funzione carico-tempo di forma sinusoi-

dale con rapporto di stress $R=0.1$.

Il carico massimo nelle prove di fatica è stato scelto come percentuale decrescente, prova dopo prova, del massimo valore di tensione ottenuto dai giunti in condizioni omologhe nelle prove statiche.

I test statici e a fatica sono stati condotti in due differenti condizioni di carico.

La prima condizione di carico, denominata "hoop stress", simula la pressurizzazione della fusoliera cilindrica con un carico applicato sulla *skin*, perpendicolarmente allo *stringer*; la seconda condizione di carico, denominata "T-pull", simula l'azione tirante dello *stringer* sulla *skin*. Al fine di simulare correttamente il test T-pull, è stata utilizzata la strumentazione di afferraggio mostrata in Figura 2.

RESULTATI E DISCUSSIONE

Test statici

In Figura 3.a è riportata la geometria dei provini sottoposti a prove statiche di *hoop stress*, mentre i risultati ottenuti su un campione

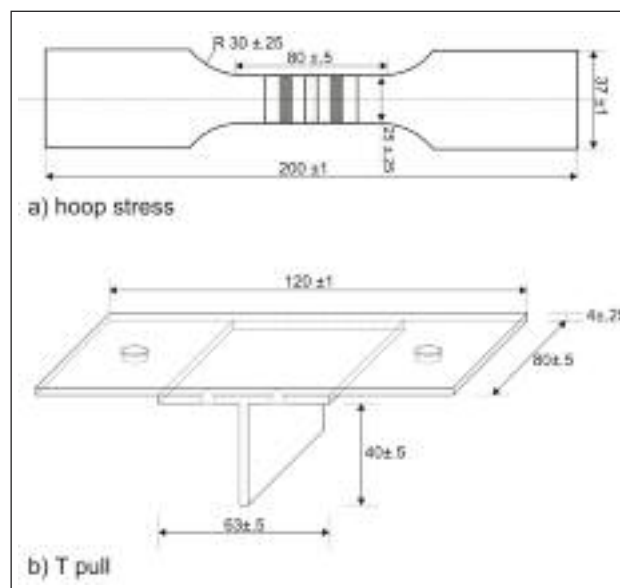


FIG. 3 **Geometria dei campioni per prove statiche di hoop stress (a) e di T-pull (b).**

Specimen geometry for hoop stress (a) and T-pull (b) static tests.

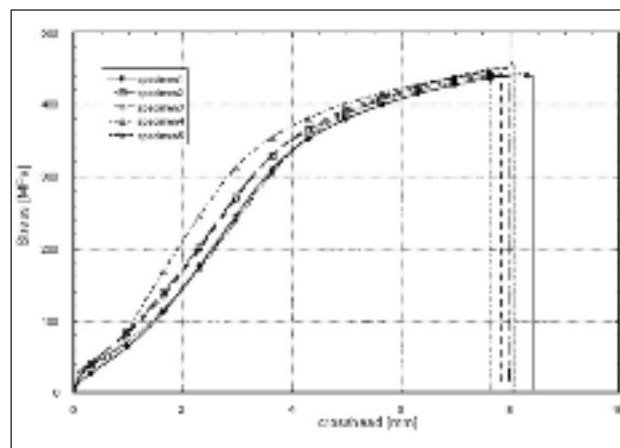


FIG. 4 **Sollecitazione vs spostamento della traversa nelle prove statiche di hoop stress.**

Stress vs crosshead in hoop stress static tests.



FIG. 5 *Modalità di frattura in test hoop stress.*
Failure mode in static hoop stress test.



Fig. 6 *Macrografia del campione (advancing side sulla sinistra).*
Macrograph of a bead (advancing side on the left).

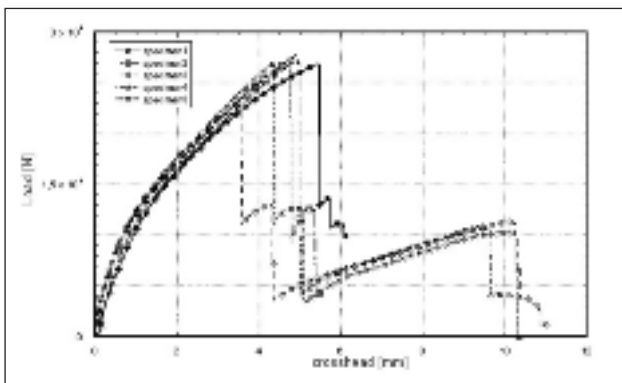


FIG. 7 *Carico vs spostamento della traversa nelle prove statiche di T-pull.*
Load vs crosshead in T pull static tests.

di cinque provini sono riportati graficamente in Figura 4. Poiché lo *stringer* e lo *skin* sono sovrapposti ma non saldati con continuità l'uno all'altro, non è stato possibile utilizzare un estensimetro per misurare l'elongazione reale. Tutti i campioni hanno presentato rotture nelle stesse modalità, come mostrato in Figura 5. Le rotture sono avvenute e sono confinate all'interno dello *skin* molto vicino al cuore del cordone della saldatura, proprio dove lo *skin* sembra mostrare un aumento di spessore dovuto al flusso del materiale indotto dal moto dell'utensile e, soprattutto, dalla scelta di adottare un angolo di incidenza di 3° , che favorisce il rimescolamento dei materiali anche in senso verticale oltre che, ovviamente, orizzontale. Questo fenomeno ben si apprezza nelle macrografie del singolo cordone di saldatura mostrato in Figura 6, dove, inoltre, è visibile un *hook defect* posizionato proprio sotto la posizione menzionata in precedenza. Il valore medio della tensione massima dei giunti sottoposti a *hoop stress* è stato di circa 444 MPa, risultato che permette di valutare un'efficienza statica molto alta delle giunzioni stesse: all'incirca l'87% del valore del pari dato del materiale di base.

La geometria del provino per le prove statiche di *T-pull* è riportata in Figura 3.b.

In Figura 7 sono mostrate le curve Carico-Spostamento traversa registrate durante cinque differenti prove di *T-pull*.

Nella prova in configurazione *T-pull* non è possibile calcolare la tensione a causa della complessità della forma del provino. Tutte le curve riportate in Figura 7 mostrano un primo picco coincidente con la capacità del massimo carico sopportata dal provino. Il calo successivo è dovuto al cedimento di uno dei due cordoni di saldatura. In queste condizioni il provino riuscirà a sostenere ancora un certo carico (circa un terzo del carico massimo registrato nel primo picco) finché non interviene la rottura del secondo cordone (secondo e ultimo picco nella curva di Figura 7). Il valore medio del massimo carico di capacità portante mostrato nelle prove è stato di 26.3 kN.

Prove di fatica

Le prove di fatica sono state condotte utilizzando le stesse configurazione di carico: *T-pull* e *hoop stress*. In Figura 8, è riportata la curva di fatica ottenuta in condizioni di *hoop stress*. Sono state effettuate due prove per ciascun livello una volta imposto il valor massimo della sollecitazione. Come c'era da attendersi, i dati sono abbastanza distribuiti come anche le differenze tra le prove effettuate allo stesso livello di sollecitazione sono molto ampie. Osservando la modalità di rottura dei campioni testati si possono trarre interessanti considerazioni.

I campioni soggetti ad alto livello di sollecitazione, indicate al di sopra della linea continua a, in Figura 8, hanno presentato rotture nella zona del cordone di saldatura dove sono concordi il verso di rotazione e velocità di avanzamento dell'utensile (*advancing side*), riportata nel lato destro della Figura 9.a. Per questi campioni, la frattura inizia in corrispondenza dell'*hook defect* (vedi anche Figura 6) e, quindi, si propaga nello *skin* e nello *stringer*. Nei campioni soggetti ai livelli medi di carico, ossia quelli compresi tra le linee a e b in Figura 8, benché la rottura inizi nella medesima posizione dei campioni menzionati in precedenza, la propagazione, tuttavia, avviene solo nello *stringer*. Per questi campioni, la frattura finale ha luogo nello *skin*, in particolar modo nel cordone sul lato sinistro, dovuto ad una frattura iniziata sull'*advancing side*, come illustrato in Figura 9.b.

Infine, i campioni soggetti ai livelli di carico più bassi, al di sotto della linea tratteggiata b in Figura 8, hanno presentato rotture iniziate in corrispondenza dell'*hook defect* dell'*advancing side* del cordone, visibile sul lato sinistro della Figura 9.c. Quindi la frattura, una volta generatasi si è propagata solo nello *skin*.

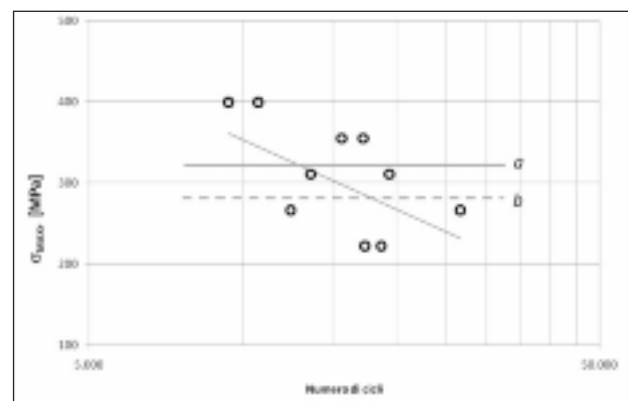


FIG. 8 *Curva di fatica in configurazione hoop stress.*
Fatigue curve in the hoop stress way.

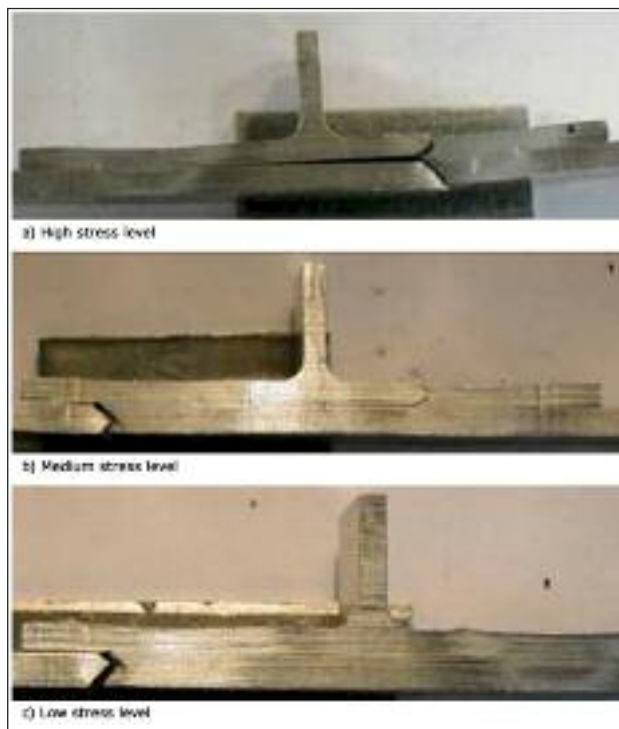


FIG. 9 Modalità di frattura del campione soggetto ai livelli di carico più elevati (a), medi (b) e più bassi (c).

Failure mode of specimen subjected to an high (a), medium (b) and low (c) stress level hoop stress fatigue test.

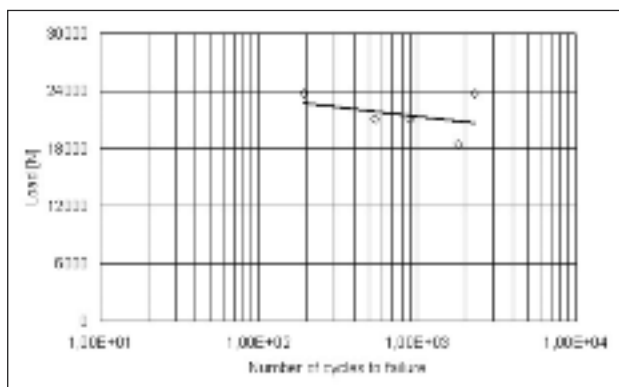


FIG. 10 Curva di fatica in configurazione T-pull.

Fatigue curve in the T pull way.

In quest'ultimo caso, il cordone sul lato destro della saldatura appare illeso (Figura 9.c).

Sulla base delle menzionate osservazioni, è evidente il ruolo significativo giocato dall'*hook defect* situato nell'*advancing side* del cordone.

Le prove di fatica sono state effettuate anche in modalità *T-pull*, sebbene fossero disponibili solo pochi campioni. I risultati sono mostrati in Figura 10. Le prove sono state effettuate utilizzando lo stesso dispositivo adoperato per i test statici e descritto in Figura 2. A causa dell'alto livello di sollecitazione adoperato, rispetto al massimo carico di capacità portante risultato dalle prove statiche, tutti i campioni hanno mostrato un inizio e una propagazione della frattura confinata nel cordone destro, come osservato nelle prove statiche con inizio della frattura sempre all'interno dell'*advancing side* (Figura 11).



FIG. 11 Modalità di frattura del campione sottoposto a prova T-pull.

Failure mode of T pull fatigue specimens.

CONCLUSIONI

Sulla base delle caratterizzazioni sperimentali condotte, possono essere desunte le seguenti considerazioni:

- La FSW appare essere una tecnologia di giunzione perseguibile per giunture di parti estruse su lamiera. I giunti ottenuti appaiono privi di distorsioni e di difetti apprezzabili.
- Le proprietà statiche nelle modalità di carico *hoop stress*, sono molto alte, comparate alla lega di partenza. I giunti risultano avere un'efficienza meccanica statica molto elevata.
- Le proprietà statiche in modalità di carico *T-pull*, appaiono molto alte se comparate con i risultati di letteratura per giunzioni rivettate.
- Le proprietà di fatica sono completamente governate dall'apporto di materiale nell'*advancing side* dei cordoni: questo aspetto gioca un ruolo significativo nell'innesco della frattura sia nella configurazione *T-pull* che in quella *hoop stress*. Il suo ruolo è evidente ad ogni livello di carico applicato, anche se le modalità di rottura risultano significativamente differenti. Come conseguenza, maggiore attenzione potrebbe essere prestata nel settaggio dei parametri di processo e nella configurazione dell'utensile di saldatura al fine di prevenire e di controllare la formazione del difetto. Probabilmente anche la placcatura del laminato può giocare un ruolo nella formazione dell'*hook defect*.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro di ricerca è stato condotto con il supporto di EC FP6: progetto COINS. Si ringrazia Alenia Aeronautica per la fornitura dei pannelli e delle leghe di Alluminio e la realizzazione delle saldature.

BIBLIOGRAFIA

- [1] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needam, M.G. Murch, P. Temple-smith, C.J. Dawes, GB Patent Application No. 9125978.8, December 1991 and US Patent No. 5460317, October 1995.
- [2] D. Fersini and A. Pironi, Analysis and modelling of fatigue failure of friction stir welded aluminum alloy single-lap joints, *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 75, Issues 3-4, February-March 2008, Pages 790-803;
- [3] Mats Ericsson, Lai-Zhe Jin and Rolf Sandström, Fatigue properties of friction stir overlap welds, *International Journal of Fatigue*, Volume 29, Issue 1, January 2007, Pages 57-68;
- [4] V.-X. Tran, J. Pan and T. Pan, Fatigue behavior of aluminum 5754-O and 6111-T4 spot friction welds in lap-shear specimens, *International Journal of Fatigue*, Volume 30, Issue 12, December 2008, Pages 2175-2190.
- [5] R. Borrelli, A. Squillace, Mechanic and Metallographic Response of both Single and Multiple Heterogeneous Lap Joints Friction Stir Welded, *Proceedings of International Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - ICME*, June 2008, Naples, Italy.

Abstract

Aircraft panels stiffened by friction stir welded extruded parts: mechanical characterization

Keywords: titanium and alloys, welding, feature material, mechanical tests, defects in electrochemistry, fatigue

Friction Stir Welding is a young solid state joining technology that, invented and patented at The Welding Institute (TWI) of Cambridge (UK) in 1991, has been showing many potentialities.

Due to the interesting features of FSW, lots of research activities have been carried out all over the world, on different materials (aluminium alloys first of all, but also steel, titanium, magnesium, copper, polymers, etc.) and for different geometries, even if the most investigated one is, without any doubt, the butt joint configuration.

Other geometries, such as lap joint, even if potentially very interesting, have been less studied. In the present paper, attention has been focused on joints simulating a geometrical configuration used in aircraft structures to manufacture bulkhead panels. The aim is to exploit the feasibility of substituting rivets with a friction stir weld.

An AA 2024 T351 T shape extruded stringer was overlap friction stir welded to an AA 2056 T3 clad rolled sheet (see Table 1 for chemical compositions) by means of two parallel beads, as illustrated in Figure 1.

The principal welding process parameters adopted are: rotational speed of 400 RPM, welding speed of 100 mm/min and tilt angle of 3°.

It is important to put in evidence that the two beads were one by one welded with the same rotational verse and welding direction.

Static and dynamic tests were carried out in two different loading conditions.

The first loading condition, named "hoop stress", simulates the pressurization of the cylindrical fuselage with a load applied to the skin, perpendicularly to the stringer; the second loading condition, named "T pull", simulates the pulling action of stringer on the skin.

On the basis of the experimental characterization carried out, the following conclusion can be drawn:

- FSW appears to be a suitable welding technology to make sound lap joints of extruded parts on rolled sheets. The obtained overlap friction stir welds resulted free of distortions and appreciable defects.
- Static mechanical properties in hoop stress loading way are very high compared to the skin parent alloy. The joint mechanical efficiency resulted close to one.
- Static mechanical properties in T-pull loading appear very high if compared with those provided by conventional riveted joints.
- Fatigue properties are fully governed by the hooking material in the advancing side of beads: this defect plays a significant role in the crack initiation both upon T-pull and hoop stress loading. Its significant role is present at every fatigue stress level, even if the failure modes can be significantly different. As a consequence, much care should be put in setting the process parameters and in designing the tool geometry in order to minimize the hook defect occurrence. Probably an important role, in hook defect occurrence, is played by skin cladding layer too.