



Effect of post-welding heat treatments on mechanical properties of double-lap FSW joints in dissimilar aluminium alloys

Effetto dei trattamenti termici post-FSW sulle caratteristiche meccaniche di giunti doppi sovrapposti dissimili

E. Cerri, P. Leo

Department of Innovation Engineering, University of Salento, Lecce (Italy)
emanuela.cerri@unisalento.it

ABSTRACT. Friction Stir Welding (FSW) is a solid state joining method particularly suited for aluminium alloys, which are often difficult to be fusion welded without hot cracking, porosity or distortion. The present study focuses on double lap Friction Stir Welded (FSW) joints in 2024T3 and 7075T6 aluminium alloys subjected to several post-welding heat treatments at warm (typical aging) and high temperature (solution range), followed by room temperature deformation (tensile tests). The tensile and fracture behaviour of the joints after heat treatment at low temperature is completely different when compared with their properties after exposure at high temperature. Interpretation of results is based on microstructure evolution of the FSW joints.

SOMMARIO. La Friction Stir Welding (FSW) è una tecnologia di saldatura allo stato solido particolarmente adatta per le leghe di alluminio che sono difficili da saldare con metodi tradizionali a causa di cricature, porosità e distorsioni. In questo lavoro si è analizzato il comportamento meccanico a trazione di giunti doppi a sovrapposizione in leghe di alluminio 2024T3 e 7075T6 prima e dopo i trattamenti termici. Il comportamento meccanico a trazione e a frattura si è rivelato differente dopo trattamenti a temperature tipiche dell'invecchiamento delle leghe in questione e dopo esposizione a temperature prossime a quelle di solubilizzazione. L'interpretazione dei risultati si basa sulla analisi microstrutturale dei giunti.

KEYWORDS. FSW; Double-lap joint; Fracture; Heat treatment; Tensile properties; Hardness; Microstructure.

INTRODUZIONE

La Friction Stir Welding (FSW) è una tecnologia di saldatura allo stato solido particolarmente adatta per le leghe di alluminio che sono difficilmente saldabili con le tecnologie convenzionali. Durante la FSW, il calore che si sviluppa per attrito e per deformazione plastica induce delle modificazioni microstrutturali rilevanti nel giunto tali da modificarne le proprietà meccaniche rispetto al materiale base [1-6]. Il giunto che si ottiene è costituito da una zona severamente deformata che rappresenta il centro della saldatura (nugget), da una zona termo meccanicamente alterata (TMAZ) e da una zona termicamente alterata (HAZ). Di solito, nel nugget si ha ricristallizzazione dinamica durante la FSW, mentre nella TMAZ si notano i grani deformati secondo il flusso plastico del materiale che fluisce verso il nugget [7-12]. I grani ricristallizzati del nugget hanno dimensioni anche 10 volte inferiori rispetto al materiale base, in quanto l'entità della deformazione impressa durante una singola passata può risultare $\epsilon > 40$ e quindi avere diametri equivalenti a 0.5-10 μm . Questo comporta, in linea di principio, alte prestazioni in termini di duttilità e resistenza meccanica. In questo lavoro

si propone un'analisi delle caratteristiche a trazione di giunti doppi a sovrapposizione di lamine di leghe di alluminio alto resistenziali (2024T3 e 7075T6). I giunti FSW sono stati trattati termicamente a basse temperature (paragonabili ad un invecchiamento) e ad alte temperature (vicine alle temperature di solubilizzazione) e poi sottoposti a trazione a temperatura ambiente. Lo studio del giunto originale e di quelli trattati termicamente verte a definire, ove possibile, delle finestre atte a migliorare le caratteristiche del giunto in funzione anche della evoluzione microstrutturale del giunto stesso. Gli studi delle proprietà a trazione e a rottura sono stati affiancati da osservazioni microstrutturali per spiegare i differenti comportamenti a frattura dei giunti stessi.

PARTE SPERIMENTALE

I giunti FSW sono stati ottenuti da lamine di 2024T3 e 7075T6 di spessore 1.3 mm e 2 mm rispettivamente utilizzando una velocità di rotazione del pin di 1000 rpm e avanzamento di 80 mm/min. La configurazione del giunto doppio a sovrapposizione è riportata in Fig. 1. I test di trazione sono stati effettuati a temperature ambiente su provini aventi un tratto utile di 30 mm ed una larghezza di 10 mm ricavati in modo da avere l'asse di trazione perpendicolare al cordone di saldatura (velocità di deformazione 10^{-4} s^{-1}). Le misure di microdurezza Vickers sono state effettuate sul piano perpendicolare alla direzione di saldatura su una superficie preventivamente lucidata. La microstruttura dei giunti e dei materiali base è stata indagata con tecniche di microscopia ottica ed elettronica a scansione. Per le osservazioni in luce polarizzata i campioni sono stati anodizzati con 5% HBF_4 in metanolo. La tabella 1 illustra le caratteristiche meccaniche dei materiali base.

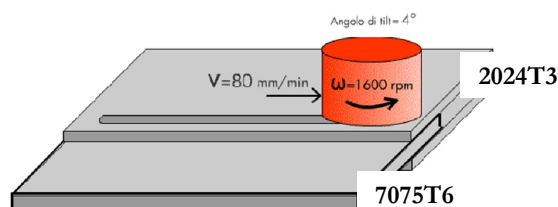


Figura 1: schema del giunto FSW.

Figure 1: double-lap FSW joint.

Material	Ref.	UTS [MPa]	σ_Y [MPa]	A%
2024T3	[13]	480	350	16
7075T6	[13]	600	530	8
FSW*		100	55	5

*giunto doppio a sovrapposizione

Tabella 1: Caratteristiche meccaniche a trazione dei materiali base e del giunto doppio a sovrapposizione.

Table 1: Mechanical properties of Base Materials and FSW double-lap joint.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Le zone caratteristiche del giunto doppio a sovrapposizione ottenuto per FSW sono illustrate in Fig. 2, dove sono evidenziati i materiali base (Fig. 2a), il nugget (Fig. 2b) e la zona TMAZ (Fig. 2c). Nel nugget si notano grani ricristallizzati di dimensioni di pochi micron ($3-4 \mu\text{m}$), mentre nella TMAZ i grani, che hanno subito una deformazione plastica severa ma non hanno ricristallizzato, sono allungati secondo le direzioni del flusso plastico. I materiali base hanno una microstruttura tipica dei laminati ma le lamine sono state posizionate in modo da avere la 2024T3 con i grani originali paralleli alla direzione di FSW mentre la 7075T6 perpendicolari, per evitare di inglobare



tessiture preesistenti. Le proprietà meccaniche dei materiali base sono riportate in Tab. 1 che mostra i valori ottenuti dalla prova di trazione sul giunto originale. Si nota un'evidente differenza tra le caratteristiche a trazione del giunto FSW e quelle dei materiali base sia per la duttilità sia per le resistenze a trazione. La Fig. 3 illustra la curva tensione-deformazione equivalente del giunto FSW (Fig. 3a) e i profili di microdurezza realizzati nella sezione del giunto perpendicolare al cordone di saldatura partendo dall'estremo di ogni lamina originale e attraversando tutto il giunto (Fig. 3b).

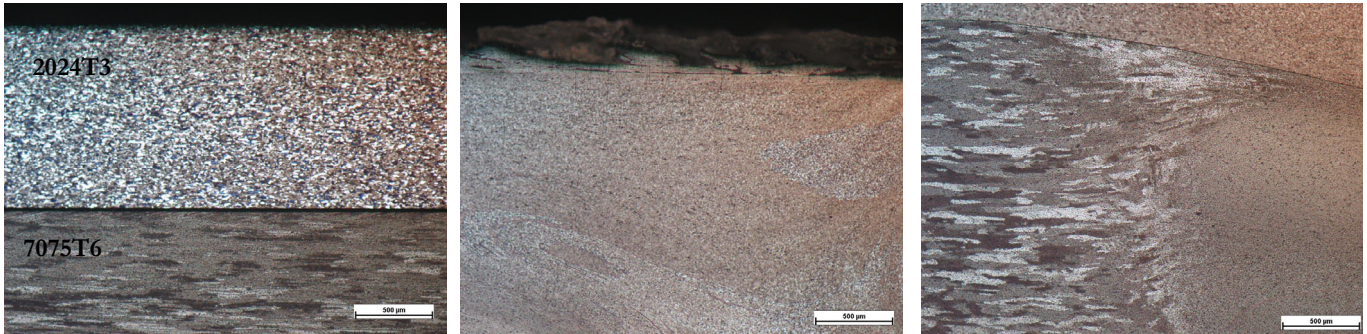


Figura 2: Zone caratteristiche del giunto FSW doppio a sovrapposizione: a) materiale base, b) nugget e c) zona TMAZ.

Figure 2: Characteristic zone of the FSW double-lap joint: a) Base Materials, b) nugget and c) TMAZ.

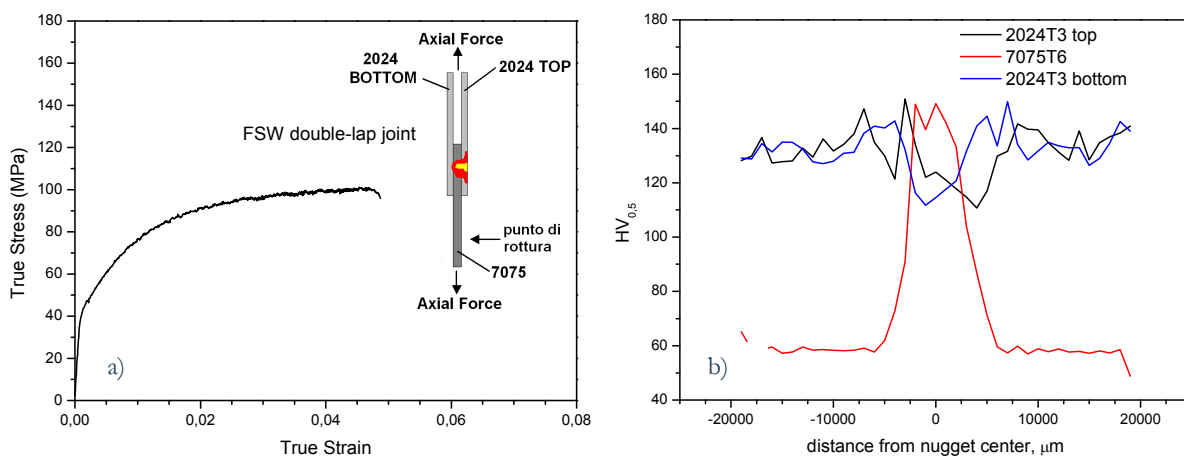


Figura 3: Curva di trazione a) e profili di microdurezza b) del giunto FSW.

Figure 3: True stress – true strain curve a) and microhardness profiles b) of double-lap FSW joint .

La curva di trazione (Fig. 3a) mostra un leggero incrudimento per poi giungere alla rottura del campione con una deformazione $\varepsilon \approx 0,05$. La frattura non si manifesta nella zona saldata ma nel materiale base della lamina 7075T6. Questo comportamento può dipendere dalle minore durezza che la lamina base della 7075T6 ha rispetto al resto del giunto e all'altro materiale base. Infatti dalle Fig. 3b si notano, nel profilo di microdurezza preso lungo la lamina centrale corrispondente alla 7075T6, i valori più bassi (60HV) di tutte le zone del giunto. La zona del nugget presenta microdurezze non perfettamente omogenee se si segue il cammino dalle zona top sino al bottom, in quanto si oscilla tra 120 e 140 HV. Questo comportamento è da attribuire alla redistribuzione dei dispersoidi e dei precipitati durante il flusso plastico del materiale.

Il comportamento a trazione dei giunti trattati termicamente a 200° o 300°C per tempi fino alle 6h non si discosta da quello del giunto originale. In Fig. 4a sono illustrate le curve tensione-deformazione vera dei giunti FSW dopo essere stati trattati a 300°C per tempi diversi. La duttilità, le tensioni a rottura ed anche la zona in cui avviene la frattura, sono paragonabili a quelle del giunto originale. Nei profili di microdurezza dei campioni trattati a 300°C si nota però una progressiva riduzione della durezza nel giunto e nel materiale base 2024T3, mentre nel materiale base 7075T6 rimane

inalterata e comunque di valore sempre inferiore alle altre zone. La rottura infatti si manifesta ancora nel materiale base della 7075T6. La riduzione di durezza nel nugget è influenzata dal coarsening dei precipitati fini e indurenti.

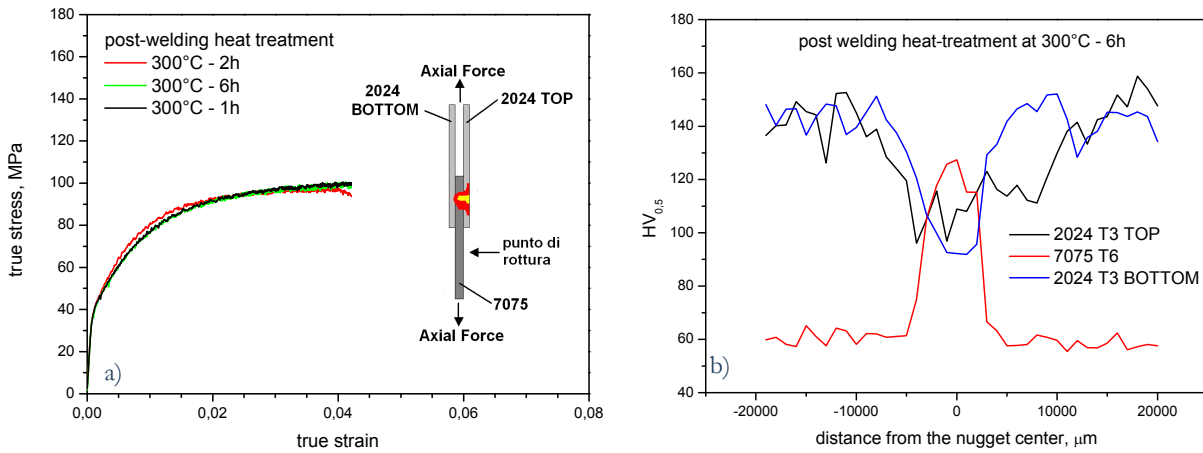


Figura 4: a) Curve di trazione dei giunti FSW dopo trattamento termico a 300°C e b) profili HV del giunto FSW dopo 300°C-6h.

Figure 4: a) True stress – true strain curves for post-welded heat treated joint at 300°C and b) HV profiles after exposure at 300°C-6h .

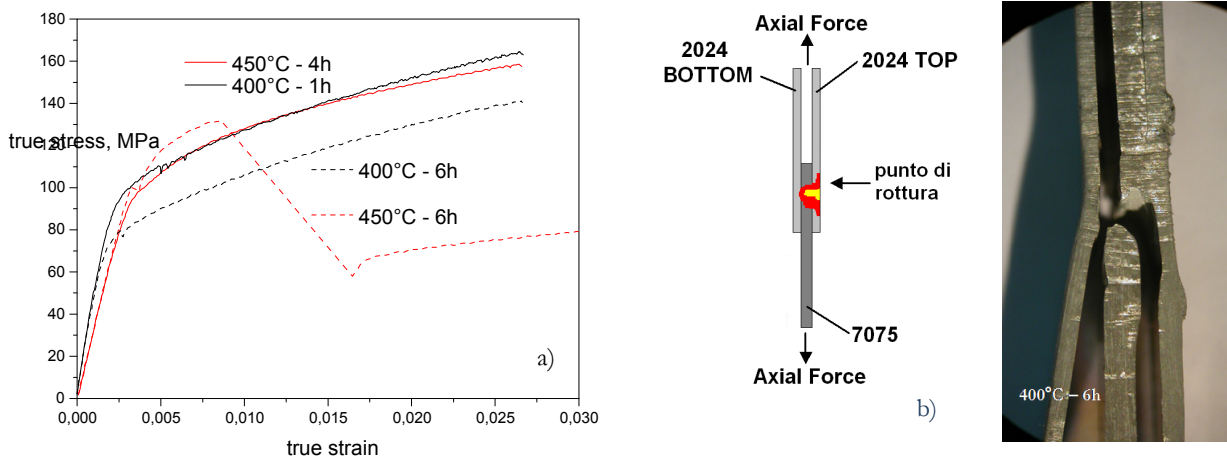


Figura 5: a) Curve di trazione dei giunti FSW dopo trattamento termico a 400° e 450°C; b) punto di rottura con macrografia.

Figure 5: a) True stress – true strain curves for post-welded heat treated joint at 400° or 450°C; b) fracture point.

Per i giunti doppi sovrapposti che hanno subito un trattamento a 400° o 450°C si ha un comportamento a trazione differente da quanto illustrato in precedenza. Infatti i giunti (Fig. 5a) mostrano delle curve σ - ϵ con tensione crescente sino a rottura, che avviene prematuramente ($<0,03$). In fig. 5a si riporta anche la curva del giunto trattato a 450°C-6h che, all'inizio del tratto plastico, vanta un valore maggiore di tensione ma poi cede parzialmente per iniziale distacco della parte inferiore del nugget (Fig. 5b). I giunti con i tempi inferiori di trattamento mostrano valori di tensione superiore. L'interpretazione degli andamenti a trazione dei giunti a trazione è integrato dalle misure di microdurezza di cui si illustrano i casi corrispondenti ai giunti trattati a 400° e 450°C per 6h (Fig. 6a e 6b rispettivamente). In questi grafici, si nota come il trattamento termico abbia omogeneizzato (fig. 6a) o livellato (Fig. 6b) i tre profili di microdurezza, che ricordiamo, attraversano tutto il giunto partendo dalle tre lamine base fino ai materiali base sul lato opposto. Nel caso in cui i tre profili siano sovrapposti o comunque vantino una differenza <30 - 35 HV, la frattura del giunto avviene nel nugget. Questa situazione si realizza però solo dopo un trattamento ad alta temperature (400°-450°C) e non a 200° o 300°C. Dal punto di vista microstrutturale, poichè le temperature del trattamento sono prossime a quelle di solubilizzazione che per la 2024 è $\approx 490^\circ\text{C}$ e per la 7075 è $\approx 470^\circ\text{C}$, si ha un processo di parziale solubilizzazione dei precipitati presenti,

sferoidizzazione dei dispersoidi e delle fasi incoerenti rimaste nella matrice. Osservazioni approfondite della microstruttura hanno mostrato anche il fenomeno della crescita abnorme dei grani nella zona inferiore del nugget dei campioni trattati a 450°C. I grani abnormi sono già presenti dopo 0,5h di esposizione a 450°C e dopo 4h occupano tutto il volume della zona interessata dal processo di severa deformazione plastica della friction [14].

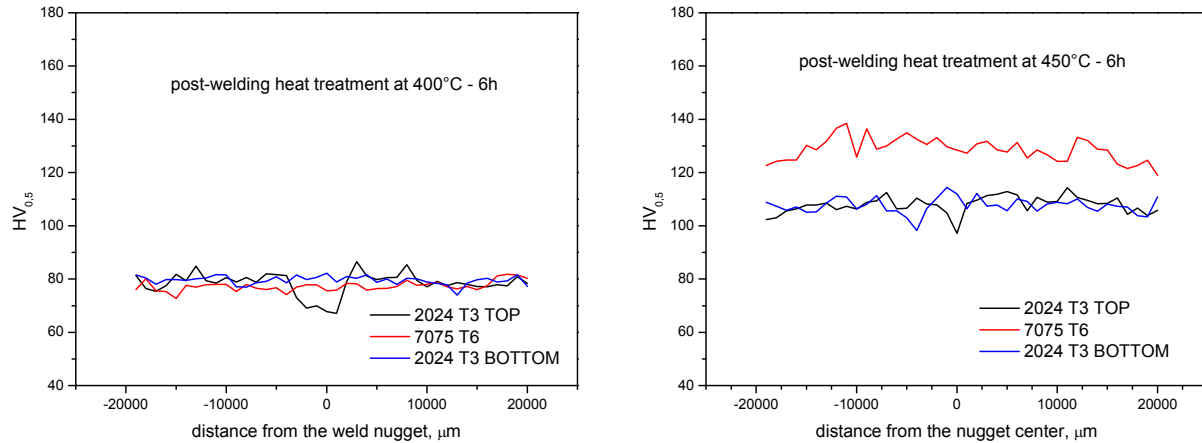


Figura 6: Profili di micro durezza dopo esposizione per 6h a) a 400°C e b) a 450°C.

Figure 6: Microhardness profiles after exposure for 6h a) at 400°C and b) at 450°C .

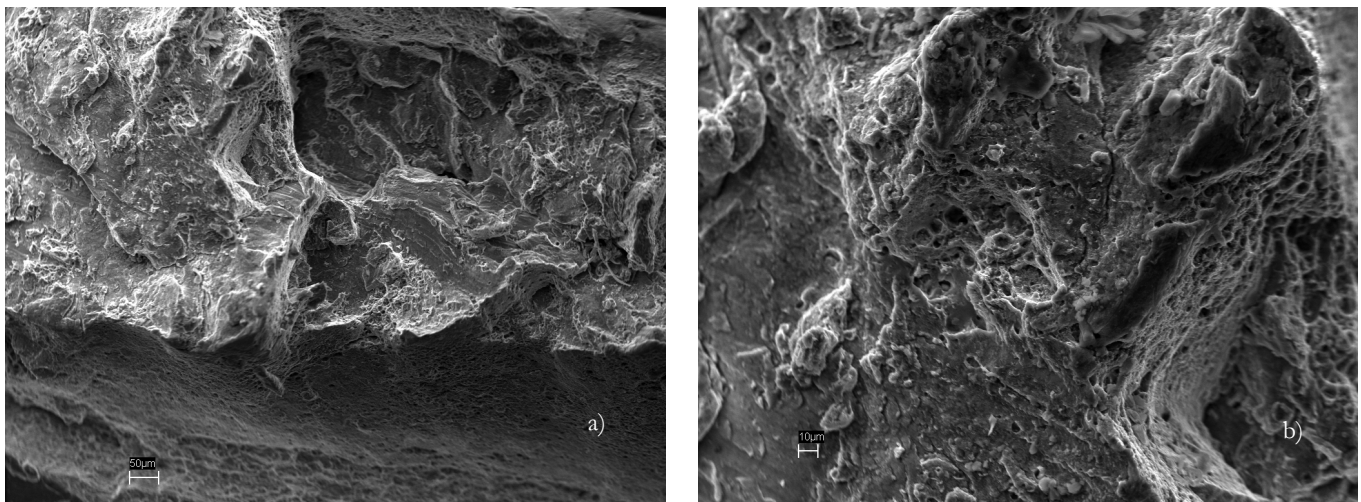


Figura 7: Micrografie SEM della frattura nel nugget del giunto trattato a 450°C-6h: a) zona centrale-7075T6 e b) zona top-2024T3.

Figure 7: Fracture surfaces in the nugget of post-welded 450°C-6h heat treated joint. a) central zone-7075T6 and b) 2024T3 top.

Le osservazioni al SEM delle superfici di frattura hanno mostrato rotture di natura duttile con zone il cui aspetto risultava chiaramente influenzato dal flusso plastico del materiale durante il processo di friction stir welding. La Fig. 7 illustra zone di frattura del campione trazione dopo esposizione a 450°C-6h con un ingrandimento della zona centrale del nugget (Fig. 7a) in linea con la 7075T6 e un altro ingrandimento della zona top dello stesso nugget (Fig.7b).

CONCLUSIONI

In questo lavoro, giunti doppi sovrapposti, in leghe di alluminio alto resistenziali, ottenuti per FSW sono stati sottoposti a trattamenti termici post-saldatura a temperature tipiche dell'invecchiamento e a temperature prossime a quelle di solubilizzazione delle leghe costituenti i materiali base. Dal lavoro svolto si possono trarre le seguenti



conclusioni:

- I giunti doppi a sovrapposizione che sono stati trattati a 200° e 300°C dopo FSW, hanno caratteristiche a trazione paragonabili con quelle del giunto FSW come ricevuto. Nei giunti trattati a 300°C si ha una progressiva diminuzione della durezza del nugget nel tempo. La rottura dei giunti si manifesta nel materiale base della lamina centrale (7075T6) che rimane, per le temperature ed i tempi considerati, a livelli di durezza sempre inferiori rispetto alle altre zone del giunto.
- I giunti trattati a 400° e 450°C mostrano un notevole incrudimento nelle curve di trazione ma poi presentano una rottura prematura nella zona del giunto. I profili di microdurezza appaiono livellati ed omogenei dopo t.t. ad alta temperatura, ma si manifesta il fenomeno della crescita abnorme del grano che contrasta l'effetto indurente della soluzione solida.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano il MIUR per il finanziamento accordato.

BIBLIOGRAFIA

- [1] C.G. Rodes, M.W. Mahoney, W.H. Bingel, R.A. Spurling, C.C. Bampton, *Scripta Mater.*, 36 (1997) 69.
- [2] M.W. Mahoney, C.G. Rodes, J.G. Flintoff, R.A. Spurling, W.H. Bingel, *Metall. Mater. Trans.*, A 29 (1998) 1955.
- [3] Y. Sato, H. Kokawa, M. Enomoto, S. Jogan, *Metall. Mater. Trans. A*, 30 (1999) 2429.
- [4] K.V. Jata, *Mater. Sci. Forum*, 331-337 (2000) 1701.
- [5] R. Braun, C. Dalle Donne, G. Staniek, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 31 (2000) 1017.
- [6] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needam, M.G. Murch, P. Templesmith, C.J. Dawes, GB Patent application 9125978.8 (1991); 9125978.8, December 1991 and US Patent No. 5460317, October 1995.
- [7] I. Charit, R. S. Mishra, M. W. Mahoney, *Scripta Mater.*, 47 (2002) 631.
- [8] H. G. Salem, A. P. Reynolds, J. S. Lyons, *Scripta Mater.*, 46 (2002) 337.
- [9] C.G. Rhodes, M.W. Mahoney, W.H. Bingel, M. Calabrese, *Scripta Mater.*, 48 (2003) 1451.
- [10] K.V. Jata, S.L. Semiatin, *Scripta Mater.*, 43 (8) (2000) 743.
- [11] W. D. Lockwood, B. Tomaz, A.P. Reynolds, *Mater. Sci. and Eng.*, A323 (2002) 348.
- [12] M. Guerra, C. Schmidt, J.C. McClure, L.E. Murr, A.C. Nes, *Mat. Charac.*, 49 (2003) 95.
- [13] M. Conserva, G. Donzelli, R. Trippodo, *Aluminium and its applications*, Edimet-Brescia (Italy) 1992.
- [14] E. Cerri, P. Leo, *Materials and Design*, 32 (2011) 3465.