

STUDIO COMPARATIVO DELL'AFFINAMENTO MICROSTRUTTURALE DURANTE TORSIONE-COMPRESSIONE E DOPO EQUAL-CHANNEL ANGULAR PRESSING

M. Cabibbo, M. El-Mehtedi, C. Scalabroni, L. Balloni, E. Evangelista

Tecniche di deformazione plastica severa, quali twist extrusion, deformazione ciclica, corrugate roll-bonding ed equal-channel angular pressing, applicate ai materiali metallici sono ormai giunte ad un livello di applicazione industriale. Si è ormai diffusa un'ampia letteratura che riguarda ogni aspetto di carattere microstrutturale e meccanico sulle differenti tecniche di deformazione plastica severa di interesse industriale applicate a materiali metallici ferrosi e non ferrosi (leghe di alluminio, titanio, magnesio). Questo studio ha l'obiettivo di esplorare le similitudini e le potenzialità di una tecnica di deformazione quale la torsione-compressione, la quale coinvolge costi ben più ridotti e probabilmente una più immediata fattibilità industriale, rispetto ad una delle tante altre tecniche già disponibili, nello specifico l'ECAP. Il confronto tra la torsione-compressione e l'ECAP è stato limitato ad una deformazione vera pari ad $\epsilon=1$ ed una deformazione uguale per la torsione-compressione, con $\dot{\epsilon}=5 \cdot 10^{-3} s^{-1}$ in torsione, seguita dalla deformazione in compressione di $\dot{\epsilon}=5 \cdot 10^{-3} s^{-1}$. Per tale studio è stata utilizzata una lega AA6103 Al-Mg-Si dopo ricottura. Le indagini microstrutturali sono state eseguite mediante microscopia elettronica in trasmissione e in luce polarizzata al microscopio ottico.

PAROLE CHIAVE: alluminio e leghe, deformazioni plastiche, affinazione, microscopia elettronica prove meccaniche, tecnologie

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, l'interesse scientifico per le tecniche di affinamento microstrutturale dei materiali metallici destinati ad uso sia strutturale che in forma di componente meccanico ha grandemente favorito lo sviluppo di ulteriori tecniche di deformazione plastica severa (nel seguito SPD) in grado di generare una microstruttura ultrafine (grani di dimensione sub-micrometrica) ed, in alcuni casi particolari, strutture nanometriche (dimensione del grano al disotto dei 100 nm) [1-6].

Queste nuove tecniche di affinamento sono estremamente interessanti e promettenti in quanto, a differenza di tecniche maggiormente diffuse quali quelle che prevedono la compattezza di nanopolveri metalliche o per condensazione di gas, le tecniche di SPD sono in grado di affinare la microstruttura senza una variazione significativa delle dimensioni del pezzo mantenendo alto il livello di compattezza dello stesso. Il principio che sta alla base delle tecniche SPD consiste nel sottoporre il materiale a notevoli deformazioni plastiche in un arco di tempo estremamente limitato in una zona ben specifica del materiale. Lo stato deformativo si propaga per tutto il pezzo progressivamente durante il processo deformativo. Queste caratteristiche differenziano profondamente tali tecniche da quelle più convenzionali quali l'estrusione, la trafilatura o la laminazione per le quali la dimensione del pezzo è destinato a subire profonde modifiche [3,4].

M. Cabibbo, M. El-Mehtedi, C. Scalabroni,
L. Balloni, E. Evangelista

CNISM / Dipartimento di Meccanica, Università Politecnica delle Marche, Via Brecce Bianche 60131 Ancona, Italia

Studi recenti [6] hanno mostrato che il processo SPD è in grado di produrre materiali che unitamente all'elevata resistenza meccanica, combinano apprezzabili valori di duttilità e questo dovuto alla particolare microstruttura generata a seguito delle SPD. Negli ultimi anni, tra le varie tecniche SPD proposte, se ne sono affermate due: la torsione ad alta pressione (nel seguito HPT, dall'acronimo inglese *high-pressure torsion*) e l'estrusione angolare attraverso due canali ad L (nel seguito ECAP dall'acronimo inglese *equal-channel angular pressing*) [7]. Alcuni ricercatori [8-10] hanno dimostrato, confrontando le due tecniche su leghe Al-Mg e Al-Fe e Ni commercialmente puro, che le potenzialità di affinamento microstrutturale dell'HPT sono superiori all'ECAP. Ulteriori studi, in leghe di alluminio [11,12], leghe di nichel [13-15], titanio [16] e vari acciai [17,18] hanno mostrato la capacità di entrambe le tecniche di raggiungere livelli di affinamento estremamente spinti, fino a raggiungere strutture nanometriche. Ad ogni modo, sebbene siano stati portati avanti numerosi studi sulle potenzialità di affinamento microstrutturale delle due tecniche, ad oggi, poco è stato fatto per cercare di capire quali siano i meccanismi microstrutturali che agiscono ed intervengono nel processo di affinamento.

Il presente lavoro si pone come obiettivo quello di esplorare le potenzialità di affinamento microstrutturale dell'accoppiamento di una deformazione per torsione seguita da una deformazione per compressione in una lega Al-Mg-Si prodotta per estrusione. Lo studio microstrutturale si è avvalso dell'uso del microscopio elettronico in trasmissione ed i risultati sono stati messi a confronto con quelli ottenuti sottoponendo la stessa lega a deformazioni plastiche severe equivalenti mediante Equal-Channel Angular Pressing.

PROCEDURE SPERIMENTALI

Materiale:

La composizione chimica della lega AA6103 è la seguente (%peso): 0.8 Si, 0.5 Mg, 0.35 Fe, 0.1 Cu, 0.1 Mn, 0.1 Ti e Al. La lega è stata fornita dall'Istituto Metalli Leggeri (Novara) in forma di estrusi. Il materiale, prima di essere deformato è stato ricotto alla temperatura di 450°C/5h con raffreddamento lento in forno.

Deformazione per Torsione + Compressione:

Le prove di torsione sono state eseguite mediante una macchina di torsione servo-idraulica a temperatura ambiente e con una velocità di deformazione di 10⁻³ s⁻¹, fino a deformazioni $\hat{\epsilon} = 0.2, 0.4, 0.6$. Il tratto utile del campione è in forma cilindrica di lunghezza $L = 10$ mm e raggio $R = 5$ mm; il raggio di curvatura tra il tratto utile e l'afferraggio (spalla) è di 0.5 mm. Lo stesso campione, previo taglio delle teste di afferraggio, ha successivamente subito una deformazione per compressione mediante una MTS servo-idraulica (MTS 810). I campioni sono stati compressi fino ad ottenere un livello complessivo di deformazione pari ad 1 ($\epsilon_{\text{torsion}} + \epsilon_{\text{compression}} = 1$), ad una velocità costante della traversa di 0.005 mm/s.

La deformazione angolare (M) e l'angolo di rotazione (θ) direttamente ottenuto dalla prova di torsione, sono stati convertiti ai valori corrispondenti di deformazione di taglio (τ) ed allungamento (γ) mediante la relazione seguente (Eq.1):

$$(1) \quad \tau = (3 + n + m)M / (2\pi R^3)$$

dove $n (= \delta \log M / \delta \log \theta |_{\tau})$ è l'indice di incrudimento del materiale ($n=0.31$) ed $m (= \delta \log M / \delta \log l_{e,T})$ può essere

assunto pari a zero per deformazioni a temperatura ambiente. I valori di sforzo-deformazione (σ, ϵ) sono stati calcolati a partire dai valori di deformazione di taglio in superficie utilizzando il criterio di von Mises:

$$(2a) \quad \sigma = \tau\sqrt{3};$$

$$(2b) \quad \epsilon = \gamma/\sqrt{3}$$

Per quel che riguarda la compressione, il carico applicato (P) in funzione dello spostamento lineare della traversa (Δh) è stato convertito in sforzo-deformazione ($\hat{U}, \hat{\epsilon}$) mediante le seguenti relazioni:

$$(3a) \quad \sigma = P(h_0 - \Delta h) / A_0 h_0;$$

$$(3b) \quad \epsilon = \ln[h_0 / (h_0 - \Delta h)]$$

dove A_0 e h_0 sono, rispettivamente, la sezione iniziale e la lunghezza iniziale del tratto utile del provino.

Deformazione per Equal-Channel Angular Pressing:

Le deformazioni mediante ECAP sono state eseguite per mezzo di uno stampo la cui configurazione era tale da consentire una deformazione vera pari a $\epsilon = 1.08$. Infatti, lo stampo ECAP utilizzato ha i due canali che si incontrano a formare un angolo di 90° ed un arco di curvatura esterno di 45° [19-27]. La deformazione attraverso lo stampo è stata eseguita a temperatura ambiente.

Preparazione dei campioni per MO e TEM:

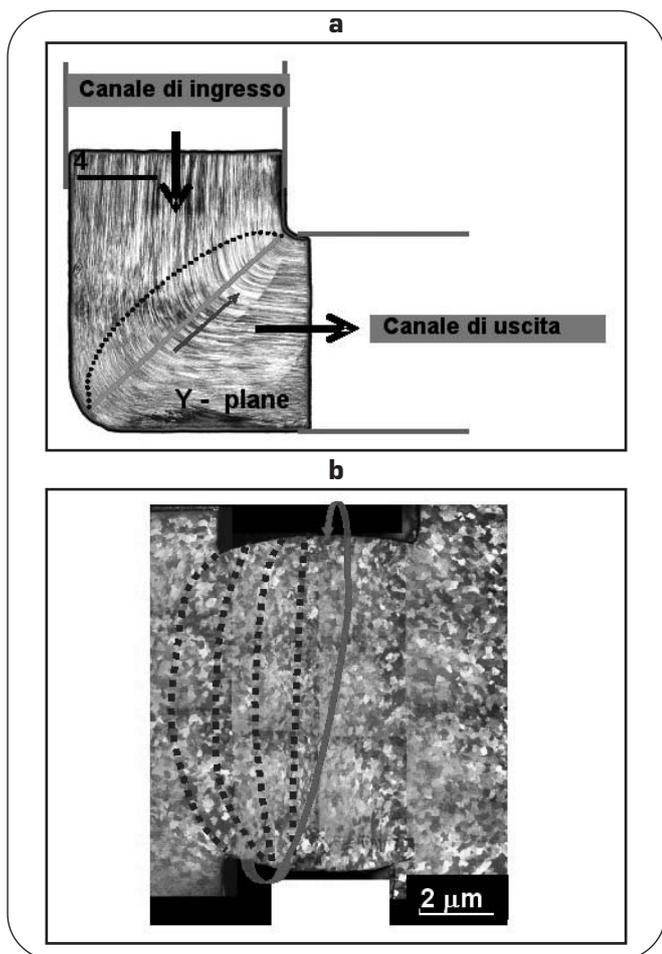
I campioni sottoposti a Torsione + Compressione sono stati sezionati longitudinalmente. Le osservazioni al microscopio ottico in luce polarizzata sono state effettuate in superficie, dove è massima la deformazione per torsione, e al cuore, dove è massima la deformazione in compressione. I campioni cilindrici sottoposti ad ECAP, sono stati sezionati lungo il piano di estrusione, contenente la direzione di estrusione (DE) e la direzione traversa (DT).

Per le osservazioni MOP, la superficie dei campioni è stata preparata con una soluzione di HBF₄ in etanolo a 0 °C ed una tensione di 12 V. Film sottili per la microscopia elettronica in trasmissione (TEM) sono stati preparati meccanicamente fino ad uno spessore di ~120 μm , da questi sono stati ritagliati dischetti di 3 mm che successivamente sono stati attaccati elettro-chimicamente per ottenere una zona sufficientemente sottile da poter essere osservata al TEM. Per la fase di preparazione elettro-chimica al doppio-getto è stata utilizzata una soluzione di 1/3 HNO₃ in metanolo a -35 °C ad una tensione di 18 V.

Le osservazioni TEM sono state effettuate utilizzando un microscopio PhilipsTM CM200 equipaggiato di porta campioni a doppio-tilt. Tutte le osservazioni sono state effettuate ad una tensione di accelerazione di 200 kV.

RISULTATI E DISCUSSIONE

La Fig. 1 mostra la differenza tra il processo di deformazione plastica severa mediante ECAP e quello mediante Torsione-Compressione (nel seguito indicato con T-C). L'aspetto più rilevante qui, oltre al differante meccanismo di deformazione, è la completa disomogeneità microstrutturale indotta da T-C in confronto all'omogenea deformazione cui è soggetto il materiale durante ECAP. La Fig. 2 mostra una panoramica della microstruttura a seguito della deformazione per T-C.

▲
Fig. 1

Stato deformativo cui è soggetto il materiale durante ECAP, tra la prima e la seconda passata (a), e durante Torsione-Compressione (b).

In (a) Y-plane indica il piano contenente la direzione di estrusione e quella trasversale, piano utilizzato per lo studio microstrutturale al microscopio ottico e al TEM, la linea color arancio indica il piano di deformazione di taglio, mentre la freccia ne indica la direzione, la linea blu tratteggiata delimita il volume del campione interessato dalla deformazione

di taglio durante il passaggio all'interno del ginocchio del canale ad L dello stampo.

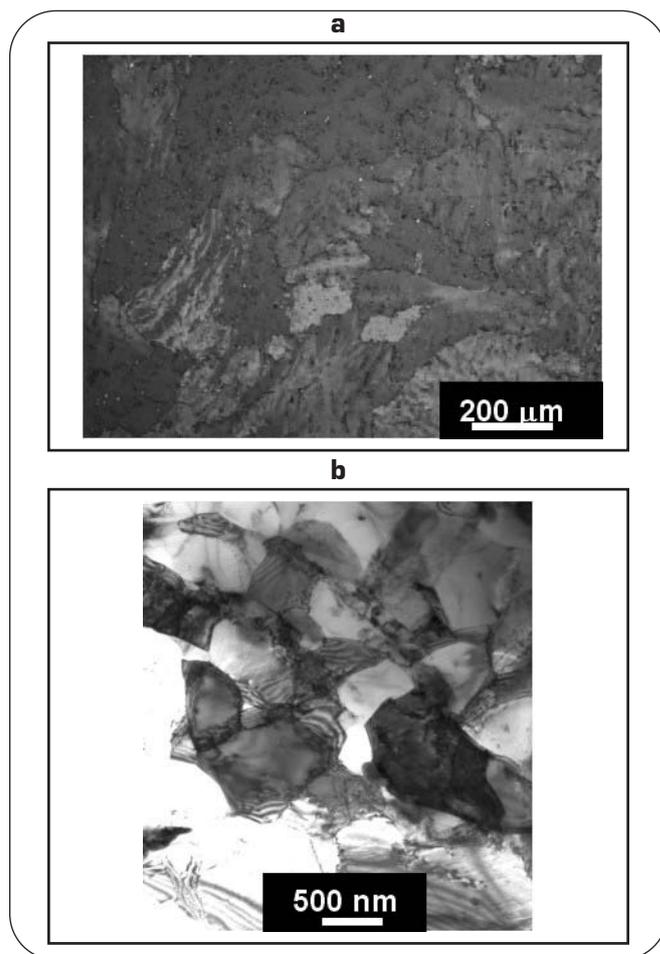
In (b) la linea rossa indica la deformazione cui è soggetto il materiale per effetto della torsione, mentre le linee tratteggiate in blu indicano il volume interessato dalla deformazione per compressione.

The state of deformation between the first and the second ECAP passes (a) and during Torsion-Compression (b).

In (a) Y-plane states for the plane containing the extruding and transverse directions, this plane has been selected to perform the whole microstructural study by either POM and TEM.

Orange Coloured line indicated the shearing plane location, the arrow is the shearing direction.

The dotted blue line delimitates the region behind the shearing plane where actually acts the deformation within the sample volume.

▲
Fig. 2

Immagini del materiale sottoposto ad ECAP ($\epsilon = 1.08$); immagine in luce polarizzata (a) e dettaglio al TEM (b).

The microstructure after 1 ECAP pass ($\epsilon = 1.08$) in Polarised light (a) and TEM (b).

La Fig. 2 mostra la microstruttura del materiale sottoposto ad una passata ECAP. L'immagine in luce polarizzata mostra una distorsione del grano in grado di deformare e generare da ognuno dei grani strutture ad alto angolo che contribuiscono alla generazione di nuove sottostrutture fini. Tali sottostrutture, come illustrato nell'immagine TEM, sono veri e propri grani fini, risultato dell'affinamento microstrutturale indotto dalla deformazione di taglio. E' un processo altamente efficiente, in quanto già dopo una singola passata la microstruttura appare uniformemente affinata.

La Fig. 3 mostra l'intero tratto utile nelle tre condizioni T-C: $\epsilon_T = 0.2 + \epsilon_C = 0.8$, $\epsilon_T = 0.4 + \epsilon_C = 0.6$, $\epsilon_T = 0.6 + \epsilon_C = 0.4$, insieme ai dettagli delle tre zone più significative, ovvero la zona del ginocchio tra il tratto utile e la spalla del campione (zona indicata con il numero 1 nelle figure (a), (b) e (c)), la zona centrale superficiale (numero 2) e la zona centrale a cuore (numero 3). In particolare, la zona 2 e 3 sono quelle di maggior interesse in quanto nella zona superficiale al centro del tratto utile la deformazione per torsione risulta essere massima, mentre nella zona al cuore è massima la deformazione per compressione e minima, se non nulla, quella per torsione. Il confronto delle tre condizioni ha evidenziato come la deformazione per compressione, che segue quella per torsione, sia quella che maggiormente contribuisce all'affinamento microstrutturale.

Valore medio del diametro equivalente del grano [μm] - aspect-ratio	ZONA CENTRALE [zona 3 in Fig.3]	ZONA SUPERFICIALE A METÀ SEZIONE [zona 2 in Fig.2]	ZONA SUPERFICIALE GIUNZIONE [zona 1 in Fig.3]
solo ricotto (450°C/5h)	268 -	-	-
ECAP	11.4 -	-	-
$\epsilon_T = 0.2 + \epsilon_C = 0.8$	34.5 -	41.8 -	18.3 -
	0.21 -	0.71 -	0.19 -
$\epsilon_T = 0.4 + \epsilon_C = 0.6$	46.2 -	50.6 -	42.1 -
	0.34 -	0.51 -	0.26 -
$\epsilon_T = 0.6 + \epsilon_C = 0.4$	58.7 -	67.0 -	53.3 -
	0.73 -	0.38 -	0.22 -

▲
Tab. 1

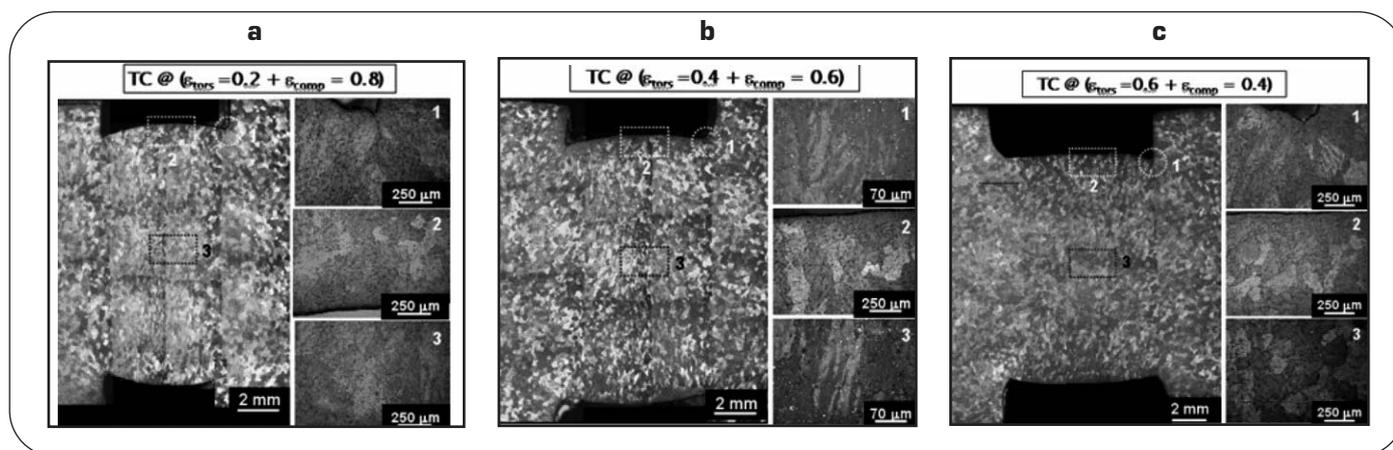
Dimensione media del grano (diametro equivalente medio: Diam. Eq.) e rapporto larghezza/lunghezza (rapporto d'aspetto: A.R.) per le condizioni sperimentali dopo ricottura, dopo Torsione-Compressione, nelle tre diverse zone di interesse (collo del campione, superficie mediana e cuore) e dopo ECAP (sezione centrale del paino DE-DT).
Equivalent grain diameter and aspect ratio (ratio between width and length) after heat treatment, after Torsion-Compression in three different zones (see Figure 3), and after ECAP.

Le analisi quantitative al microscopio ottico e, soprattutto al microscopio elettronico in trasmissione, sulla dimensione media dei grani ha mostrato, come riportato in seguito in Tab. 1, che la condizione $\epsilon_T = 0.2 + \epsilon_C = 0.8$ è quella che riesce meglio ad affinare la microstruttura del materiale.

I dettagli delle varie zone del materiale dopo T-C mostrano una disomogeneità microstrutturale diffusa dovuta a stati deformativi torsione + compressione che, se si esclude la zona superficiale centrale (zona 2), non sono mai orientati in piani tali da concorrere costruttivamente alla formazione di sottostutture fini ad alto angolo (requisito essenziale per l'affina-

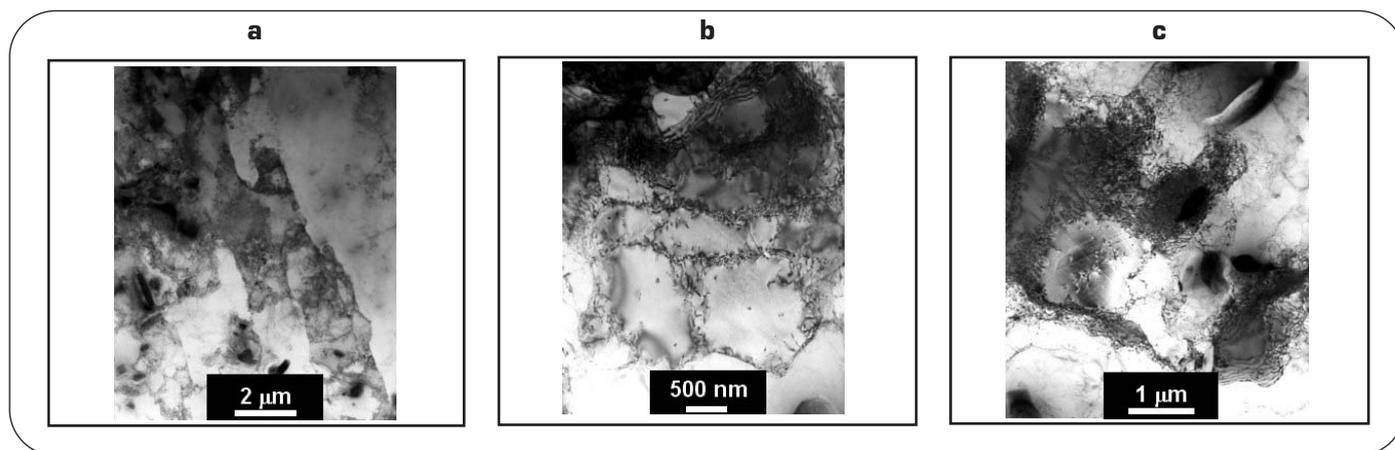
mento microstrutturale mediante le tecniche di SPD). Queste considerazioni sono alla base per la spiegazione di una diversa ed inferiore capacità della deformazione combinata T-C di affinamento microstrutturale se confrontata con il processo ECAP (illustrato in Fig. 2).

La Fig. 4 mostra alcune immagini TEM rappresentative nelle tre diverse condizioni T-C: $\epsilon_T = 0.2 + \epsilon_C = 0.8$ (4a), $\epsilon_T = 0.4 + \epsilon_C = 0.6$ (4b), $\epsilon_T = 0.6 + \epsilon_C = 0.4$ (4c). Risulta evidente la scarsa attitudine per le due ultime condizioni T-C a formare bordi ad alto angolo; in questi due casi (Fig. 4 (b) e (c)) le dislocazioni prodotte durante T-C tendono piuttosto ad arrangiarsi a for-



▲
Fig. 3

Panoramica della microstruttura del materiale sottoposto alla sequenza di deformazione T-C: $\epsilon_T = 0.2 + \epsilon_C = 0.8$ (a), $\epsilon_T = 0.4 + \epsilon_C = 0.6$ (b), $\epsilon_T = 0.6 + \epsilon_C = 0.4$ (c). Immagini acquisite al microscopio ottico in luce polarizzata.
The microstructure of the material after different combination of T-C strain: $\epsilon_T = 0.2 + \epsilon_C = 0.8$ (a), $\epsilon_T = 0.4 + \epsilon_C = 0.6$ (b), $\epsilon_T = 0.6 + \epsilon_C = 0.4$ (c). Images obtained by POM.



▲
Fig. 4

Dettagli ad alto ingrandimento (TEM) del materiale sottoposto a T-C per: $\epsilon_T = 0.2 + \epsilon_C = 0.8$ (a), $\epsilon_T = 0.4 + \epsilon_C = 0.6$ (b), $\epsilon_T = 0.6 + \epsilon_C = 0.4$ (c).
High magnification (TEM) of the material after T-C: $\epsilon_T = 0.2 + \epsilon_C = 0.8$ (a), $\epsilon_T = 0.4 + \epsilon_C = 0.6$ (b), $\epsilon_T = 0.6 + \epsilon_C = 0.4$ (c).

mare foreste di dislocazioni ostacolando l'un l'altra. La condizione $\epsilon_T = 0.2 + \epsilon_C = 0.8$ (Fig. 4(a)) è quella che più di tutte mostra una tendenza alla formazione di sottostrutture ordinate, tuttavia non così efficaci e diffuse come nel caso della struttura ECAP (Fig. 2).

La Tab. 1 riporta i dati relativi alla dimensione media dei grani e al loro stato di distorsione dalla condizione di equiassialità (aspect ratio). I risultati sono stati ottenuti mediante osservazioni TEM sulla base di ca. 80 grani misurati per ciascuna condizione sperimentale. I risultati mostrano chiaramente un affinamento notevole a seguito della deformazione ECAP, capace di indurre una riduzione media del grano di oltre 20 volte rispetto alla condizione iniziale del materiale dopo ricottura. I grani così prodotti mostrano un aspect ratio medio di 0.21 il che denota una forte non-equiassialità degli stessi. Per quel che riguarda la deformazione composta T-C, i risultati della zona di giunzione tra il tratto utile e la spalla del campione possono sembrare del tutto soddisfacenti, ma la disomogeneità microstrutturale rende i risultati di questa zona del tutto irrilevanti. Le zone 2 e 3 (si veda la Fig. 3) sono le uniche di interesse per la loro maggiore uniformità microstrutturale. I risultati, in queste due zone, mostrano un considerevole affinamento nella condizione $\epsilon_T = 0.2 + \epsilon_C = 0.8$ (zona centrale) che si è mostrata la combinazione torsione - compressione più efficace tra le tre.

CONCLUSIONI

Il presente studio è stato dedicato al confronto delle potenzialità di affinamento microstrutturale tra la tecnica ECAP ed una tecnica di deformazione combinata torsione-compressione effettuate a temperatura ambiente. Lo studio microstrutturale è stato portato avanti avvalendosi di osservazioni in luce polarizzata al microscopio ottico completate con studi sistematici al microscopio elettronico in trasmissione con il quale è stato possibile valutare quantitativamente l'affinamento microstrutturale nei due casi.

I risultati hanno mostrato un affinamento microstrutturale omogeneo solo nel caso della deformazione per ECAP. Inoltre, la capacità di affinamento dell'ECAP è risultata di gran lunga

superiore rispetto alla migliore delle combinazioni torsione-compressione (ovvero 0.2 in torsione seguita da 0.8 in compressione).

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare il Sig. Daniele Ciccarelli per il suo prezioso supporto in fase di preparazione delle superfici dei campioni per le osservazioni al microscopio ottico in luce polarizzata.

BIBLIOGRAFIA

- 1) T.C. LOWE, R.Z. VALIEV, Editors, Investigations and applications of severe plastic deformation, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 2000.
- 2) R.Z. VALIEV, R.K. ISLAMGALIEV, I.V. ALEXANDROV, Prog. Mater. Sci. 45 (2000), p.103.
- 3) R.Z. VALIEV, N.A. KRASILNIKOV, N.K. TSENEV, Mater. Sci. Eng. A 137 (1991), p.35.
- 4) R.Z. VALIEV, A.V. KORZNIKOV, M.M. MULYUKOV, Mater. Sci. Eng. A 168 (1993), p.141.
- 5) S.X. McFADDEN, R.S. MISHRA, R.Z. VALIEV, A.P. ZHILYAEV, A.K. MUKHERJEE, Nature 398 (1999), p.684.
- 6) R.Z. VALIEV, I.V. ALEXANDROV, Y.T. ZHU, T.C. LOWE, J. Mater. Res. 17 (2002), p.5.
- 7) P. BASSANI, M. CABIBBO, E. EVANGELISTA, M. VEDANI, La Metallurgia Italiana 3 (2003), p.49.
- 8) Z. HORITA, D.J. SMITH, M. FURUKAWA, M. NEMOTO, R.Z. VALIEV, T.G. LANGDON, J. Mater. Res. 11 (1996), p.1880.
- 9) Y. IWAHASHI, Z. HORITA, M. NEMOTO, T.G. LANGDON, Metall. Mater. Trans. A 29 (1998), p.2503.
- 10) V. STOLYAROV, R.Z. VALIEV, in: Y.T. ZHU, T.G. LANGDON, R.S. MISHRA, S.L. SEMIATIN, M.J. SARAN, T.C. LOWE, Editors for Ultrafine grained materials II, Warrendale, PA: The Minerals, Metals and Materials Society, (2002), p.209.
- 11) R.S. MISHRA, R.Z. VALIEV, S.X. McFADDEN, R.K. ISLAMGALIEV, A.K. MUKHERJEE, Philos. Mag. A 81 (2001), p.37.

- 12) R.K. ISLAMGALIEV, N.F. YUNUSOVA, I.N. SABIROV, A.V. SERGUEEVA, R.Z. VALIEV, *Mater. Sci. Eng. A* 319-322 (2001), p.877.
- 13) A.V. KORZNIKOV, O. DIMITROV, G.F. KORZNIKOVA, J.P. DALLAS, S.R. IDRISOVA, R.Z. VALIEV, F. FAUDET, *Acta mater.* 47 (1999), p.3301.
- 14) A.V. KORZNIKOV, G. TRAM, O. DIMITROV, G.F. KORZNIKOVA, S.R. IDRISOVA, Z. PAKIELA, *Acta mater.* 49 (2001), p.663.
- 15) R.Z. VALIEV, C. SONG, S.X. McFADDEN, A.K. MUKHERJEE, R.S. MISHRA, *Philos. Mag. A* 81 (2001), p.25.
- 16) R.S. MISHRA, V.V. STOLYAROV, C. ECHER, R.Z. VALIEV, A.K. MUKHERJEE, *Mater. Sci. Eng. A* 298 (2001), p.44.
- 17) A.V. KORZNIKOV, Y.U.V. IVANISENKO, D.V. LAPTIO-NOK, I.M. SAFAROV, V.P. PITYUGIN, R.Z. VALIEV, *Nanostruct. Mater.* 4 (1994), p.159.
- 18) S.V. DOBATKIN, R.Z. VALIEV, L.M. KAPUTKINA, N.A. KRASILNIKOV, O.V. SUKHOSTAVSKAYA, V.S. KOM-LEV, in: T. SAKAI, H.G. SUZUKI, Editors for The fourth international conference on recrystallization and related phenomena, Sendai, Japan: The Japan Institute of Metals, (1999), p.907.
- 19) M. FURUKAWA, Z. HORITA, T.G. LANGDON: *Mater. Sci. Eng. A* 332 (2002), p.97.
- 20) H. AKAMATSU, T. FUJINAMI, Z. HORITA, T.G. LAN-GDON: *Scripta Mater.* 44 (2001), p.759.
- 21) K. NAKASHIMA, Z. HORITA, M. NEMOTO, T.G. LAN-GDON: *Mater. Sci. Eng. A* 281 (2000), p.82.
- 22) Y. NISHIDA, H. ARIMA, J.-C. KIM, T. ANDO: *J. Japan Inst. Light Metals* 50 (2000), p.655.
- 23) S. KOMURA, M. FURUKAWA, Z. HORITA, M. NEMOTO, T.G. LANGDON: *Mater. Sci. Eng. A* 297 (2001), p.111.
- 24) Y. IWAHASHI, Z. HORITA, M. NEMOTO, T.G. LAN-GDON: *Acta Mater.* 45 (1997), p.4733.
- 25) P.L. SUN, P.W. KAO, C.P. CHANG: *Metall. Mater. Trans. A* 35 (2004), p.1359.
- 26) M. CABIBBO, C. SCALABRONI, E. EVANGELISTA, *Micron*, 36 (2005), p.401.
- 27) M. CABIBBO, E. EVANGELISTA, M. VEDANI, *Metall. Mater. Trans. A* 36 (2005), p.1353.

ABSTRACT

A COMPARATIVE STUDY OF MICROSTRUCTURAL REFINEMENT BY TORSION-COMPRESSION AND EQUAL-CHANNEL ANGULAR PRESSING

Keywords: Al-Mg-Si alloy, SPD, ECAP, Torsion-Compression, TEM, Microstructure

The different severe plastic deformation techniques, such as twist extrusion, cold rolling, corrugate roll-bonding and equal-channel angular pressing, already reached a wide range of industrial applications. The microstructural and the mechanical aspects of these techniques of severe plastic deformation have extensively been investigated in the last decade, a large number of

papers were published on ferrous and non-ferrous materials (aluminium, titanium and magnesium alloys). The aim of the present study was thus to compare the different aspects of torsion-compression deformation technique, that has relatively low-cost and can probably find an immediate industrial application, with one of the available techniques, that is ECAP. The comparison between torsion-compression and ECAP was limited to the samples with a true strain of 1 in both cases, the strain rate in torsion and in compression was $\approx 5 \cdot 10^{-3} s^{-1}$. The alloy AA6103 Al-Mg-Si was used for this study in the solution treated condition (fully annealed). The microstructures were investigated by transmission electron and polarised optical microscopy techniques.