

Studio FEM e microstrutturale di leghe Al-Mg-Si sottoposte ad Equal Channel Angular Pressing (ECAP)

P. P. De Marco, E. Cerri, P. Leo, P. Cavaliere

La memoria presenta uno studio agli elementi finiti (FEM), nello spazio 3D, del processo di deformazione plastica severa Equal Channel Angular Pressing (ECAP) di billette in lega di alluminio AA6082 ed in lega 6082 modificata con Zr (6082Zr). Tale studio è stato effettuato su due tipologie geometriche di processo, differenti in particolare per sezioni e valori angolari degli stampi. Oggetto d'indagine è stata la deformazione plastica indotta dagli stampi su tali billette, senza prescindere dalle caratteristiche di incrudimento dei materiali che le compongono. Attraverso un modello 2D ideale, inoltre, è stata analizzata la relazione tra l'omogeneità della deformazione ed i parametri geometrici caratteristici dello stampo. I risultati dell'analisi FEM sulle due varianti di lega e processo sono stati confrontati con quelli previsti da un modello analitico e supportati da indagini metallografiche effettuate su billette realmente estruse con le modalità di processo in studio.

Parole chiave: alluminio e leghe, estrusione, modellazione

INTRODUZIONE

L'ECAP è un processo in cui si sottopone una billetta metallica ad una severa deformazione plastica, tramite una sollecitazione prevalentemente di taglio, senza che questa subisca variazioni della sezione trasversale. Tale deformazione è indotta da estrusioni (in genere a temperatura ambiente) in uno stampo costituito dai due canali di uguale sezione che s'intersecano con angolo interno ϕ e la cui curvatura esterna, nella zona di intersezione, è definita da un angolo ψ (Fig. 1). La billetta, di sezione appena inferiore a quella dei canali, viene forzata da un plunger attraverso lo stampo opportunamente lubrificato. L'estrusione è in genere ripetuta più volte (multi-passate, con metodologie differenti in relazione alla rotazione imposta alla billetta, intorno al proprio asse longitudinale, tra una passata e l'altra [1-5]) e la deformazione cumulata si traduce in un progressivo affinamento del grano [1-5]. Ciò rende possibile il ricorso all'ECAP per ottenere dimensione di grano ultrafine ($\leq 1 \mu\text{m}$) nei metalli policristallini.

Produrre metalli a grano ultrafine è importante principalmente per due ragioni. In primo luogo si ha un aumento della resistenza del materiale a basse temperature, per l'incremento della tensione di snervamento secondo la legge di Hall-Petch [6] e della tensione di rottura, a spese di una piccola diminuzione dell'allungamento a rottura e quindi della duttilità [1-5]. In secondo luogo, se la microstruttura a grano fine è stabile a temperature in cui i processi diffusivi sono ragionevolmente rapidi e controllabili, vi è la possibilità di ottenere formature superplastiche ad elevate velocità di deformazione. È noto, infatti, che la velocità del flusso plastico è inversamente proporzionale alla radice quadrata della dimensione del grano [1,2,4].

Una prima trattazione analitica dell'ECAP fatta da Segal

[1,3,5], Iwahashi et al. [7] in assenza di attrito e nell'ipotesi di taglio semplice come unica sollecitazione agente [1,3,5,7], ha portato all'Eq. 1 che correla la deformazione plastica equivalente ϵ con i valori angolari ϕ e ψ ed il numero di passate N.

$$\epsilon = \frac{N}{\sqrt{3}} \left(2 \cot\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) + \psi \cos \text{ec}\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) \right) \quad (1)$$

Da questa equazione si ricava che la deformazione plastica è costante su tutte le sezioni interessate dal taglio, fissata la configurazione geometrica ed il numero di passate. Per $\phi=90^\circ$, la deformazione per passata oscilla intorno al valore 1 al variare di ψ ed è massima quando $\psi=0^\circ$, dunque dopo N passaggi vale circa N [1-5]. È stato dimostrato che l'utilizzo di angoli ϕ prossimi a 90° consente di ottenere più veloce-

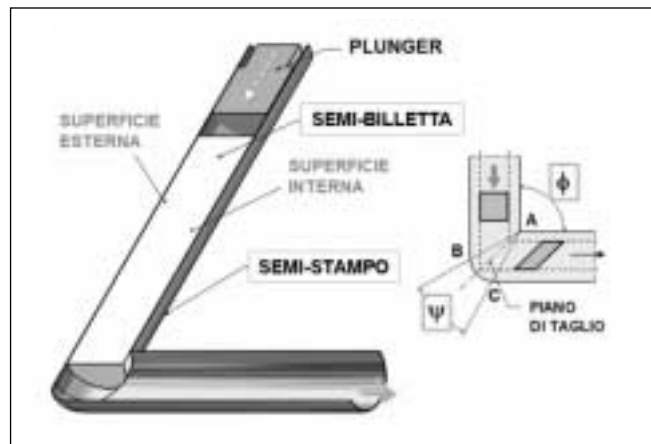


Fig. 1 – Schematizzazione dell'ECAP con indicazione dei valori angolari ϕ e ψ caratteristici dello stampo e della traccia del piano di taglio ideale. La zona ABC indicata rappresenta la zona di deformazione principale.

Fig. 1 – ECAP die geometry, scheme of process and terminology on specimen sides. Ideal shear plane and main deformation zone ABC are outlined.

P.P. De Marco, E. Cerri, P. Leo, P. Cavaliere
Dip. Ingegneria dell'Innovazione; Lecce, Italy

Memoria pervenuta il 17 maggio 2005

mente microstrutture omogenee a grani equiassici e che il valore dell'angolo ψ influenza poco l'entità della deformazione ottenibile ma ne caratterizza l'omogeneità della distribuzione [8-13], fatto questo che non si evince dall'Eq.1 e che ne costituisce un limite. Tale equazione, sicuramente valida per un'analisi quantitativa dello stato deformativo, prescinde però dalla sua distribuzione effettiva e dai meccanismi che lo determinano. Nella pratica applicativa, in cui è importante trovare le condizioni di processo ottimali tenendo conto di tutte le variabili in gioco (materiale, attrito, geometria dello stampo, velocità di estrusione ecc.) un'analisi FEM si rivela sicuramente più adatta, garantendo un output deformativo e tensionale più dettagliato [8,9]. Per una migliore lettura del processo e dei parametri geometrici caratteristici una sua schematizzazione è riportata in Fig. 1.

MATERIALI E PROCEDURE SPERIMENTALI

Utilizzando la simmetria geometrica di stampo e billetta, è stata effettuata una prima analisi FEM, 2D, sulla sezione longitudinale mediana per evidenziare l'effetto dei parametri angolari sulla distribuzione della deformazione e dello stato tensionale. Il materiale è stato considerato elasticamente perfettamente plastico, privo cioè di effetti di incrudimento (modello ideale) e la billetta di dimensioni 11x70 mm. Successivamente sono state condotte delle analisi nello spazio 3D, ricorrendo ancora ad un modello simmetrico, considerando due differenti geometrie e due materiali diversamente incrudenti (modello reale). In questo modello sono state analizzate billette in lega 6082Zr di sezione circolare con diametro di 11 mm e billette in lega AA6082 di sezione quadrata con lato di 20 mm, entrambe di lunghezza pari a 70 mm.

Le sezioni dei canali dei due stampi sono state uguali a quelle delle rispettive billette e per entrambi l'angolo ϕ è stato di 90°. Il valore dell'angolo ψ invece è stato di 20° nello stampo a sezione quadrata e di 35° in quello a sezione circolare. Tutti i valori angolari hanno coinciso con quelli degli stampi utilizzati nella pratica sperimentale.

Per quel che concerne la pratica sperimentale, lo stato pre-ECAP del materiale è stato quello di billette estruse per la 6082Zr, di barre direct chill cast omogeneizzate (580°C per 3h e raffreddamento a 300°C/h) per la AA6082. La composizione chimica di tali leghe è riportata in Tab. 1.

Le billette in lega AA6082 sono state sottoposte ad ECAP utilizzando una pressa idraulica dedicata di 60 ton, per le billette in lega 6082Zr invece, è stata utilizzata una macchina di trazione MTS, per la quale è stato necessario progettare un sistema di afferraggio che garantisse la perfetta assialità tra stampo e plunger. Il valore della velocità media della traversa in entrambi i casi è stato di 3 mm/s ed il processo è avvenuto a temperatura ambiente. L'uso di un lubrificante a base di MoS₂ ha ridotto l'attrito ed evitato il grippaggio tra provino e canale.

Su entrambe le leghe sono state effettuate indagini microstrutturali tramite microscopia ottica in luce polarizzata, sia nello stato come ricevuto che deformato.

Le superfici analizzate sono state preparate secondo la metodica classica e poi mediante lucidatura elettrolitica (45 s a 20 V in 78 ml di acido perclorico, 120 ml di acqua distillata e 800 ml di etanolo) ed anodizzazione (180 s a 20 V in soluzione di 5% di HBF₄ in acqua distillata).

RISULTATI E DISCUSSIONE

Le Fig. 2, 3, 4 illustrano i risultati dell'analisi FEM per il modello ideale. Si osserva l'effetto dell'angolo ψ sulla distribuzione e sul valore della deformazione plastica equivalente sulla sezione della billetta.

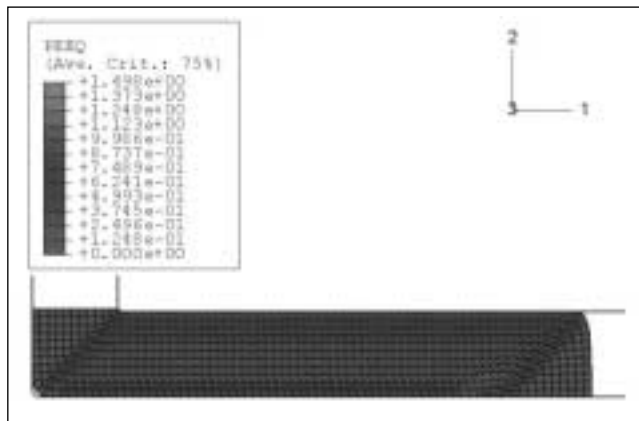


Fig. 2 - Deformazione plastica (PEEQ) sulla sezione longitudinale della billetta per $\phi=90^\circ$ e $\psi=0^\circ$.

Fig. 2 - Plastic equivalent strain (PEEQ) on longitudinal workpiece section, 2D ideal case with $\phi=90^\circ$ and $\psi=0^\circ$.

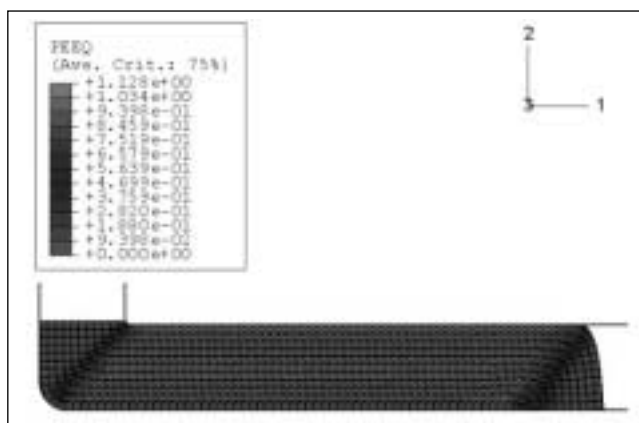


Fig. 3 - Deformazione plastica (PEEQ) sulla sezione longitudinale della billetta per $\phi=90^\circ$ e $\psi=20^\circ$.

Fig. 3 - Plastic equivalent strain (PEEQ) on longitudinal workpiece section, 2D ideal case with $\phi=90^\circ$ and $\psi=20^\circ$.

La parte centrale e quella superiore della billetta, sono fortemente deformate, mentre la parte inferiore (bottom) lo è meno, con valori di deformazione plastica prossimi a zero in assenza di attrito. Dall'analisi delle figure è evidente come sia meno estesa l'azione della linea di taglio all'aumentare dell'angolo ψ per la comparsa e la crescita progressiva di una componente tensionale di flessione [10]. L'aumento dell'entità della flessione con l'angolo ψ si evidenzia anche con un progressivo incurvamento verso l'alto della parte anteriore della billetta. In Fig.5 si riportano gli andamenti grafici della deformazione plastica equivalente, come media di valori nodali corrispondenti su tre linee di rilevamento ortogonali alla direzione di estrusione. Si effettua anche un confronto con gli andamenti previsti dall'Eq. 1 per le stesse configurazioni geometriche.

	Fe (%)	Si (%)	Mg (%)	Mn (%)	Zr (%)	Ti (%)	Cr (%)	Al (%)
6082Zr	0.16	0.51	0.34	0.014	0.1	-	-	bal.
AA6082	0.19	0.98	0.64	0.51	-	0.01	0.0037	bal

Tab. 1 - Composizione chimica delle leghe in studio.

Table 1 - Chemical compositions (weight %) of alloys.

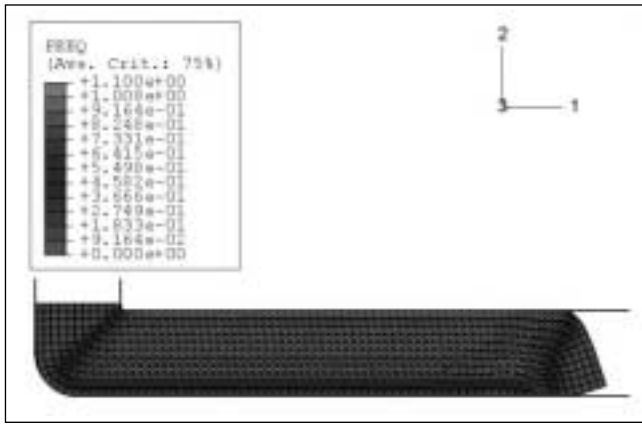


Fig. 4 – Deformazione plastica (PEEQ) sulla sezione longitudinale della billetta per $\phi=90^\circ$ e $\psi=35^\circ$.

Fig. 4 – Plastic equivalent strain (PEEQ) on longitudinal workpiece section, 2D ideal case with $\phi=90^\circ$ and $\psi=35^\circ$.

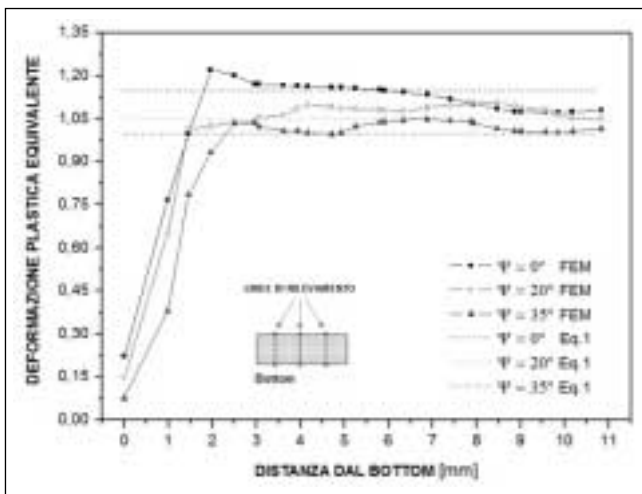


Fig. 5 – Distribuzione media della deformazione plastica equivalente su tre linee nodali di rilevamento, sulla sezione longitudinale delle billette al variare di ψ . Confronto con gli andamenti previsti dall'Eq. 1.

Fig. 5 – Plastic equivalent strain curves (average on three reference node lines) on longitudinal workpiece section for each investigated ψ value. In comparison what expected from Eq. 1 is plotted as straight line in each case.

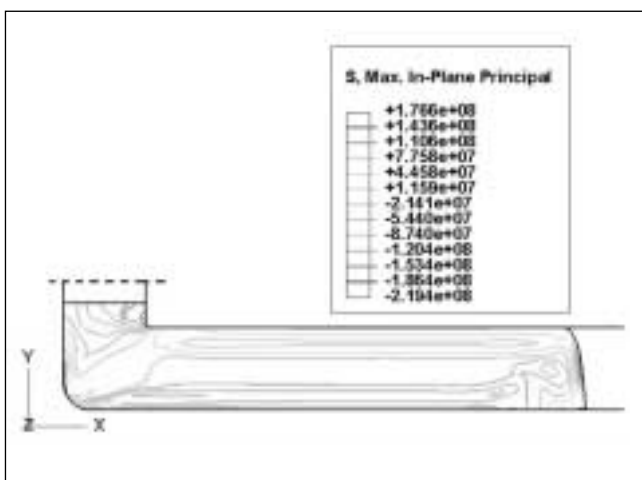


Fig. 6 – Asimmetria dello stato tensionale cui sono sottoposte le superfici della billetta durante L'ECAP ($\psi=20^\circ$).

Fig. 6 – Maximum principal stresses on longitudinal workpiece section for $\psi=20^\circ$. Asymmetry in distribution is evinced.

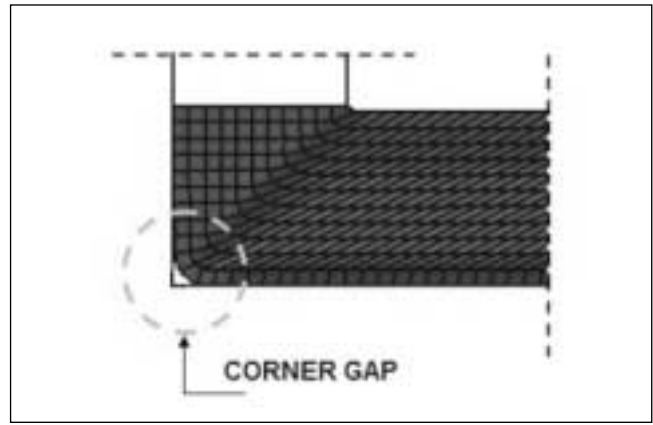


Fig. 7– Gap di riempimento dello stampo per $\psi=0^\circ$.

Fig. 7– Corner gap for $\psi=0^\circ$.

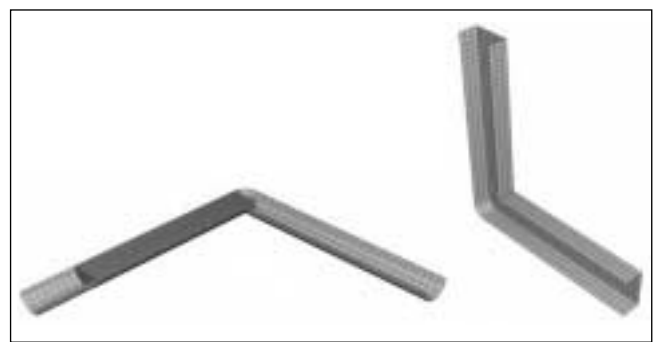


Fig. 8 – Tipologie di stampi utilizzate nel modello reale, nell'implementazione simmetrica (semistampi).

Fig. 8 – Different half die geometry in real symmetrical FEM model.

Un'analisi qualitativa delle tensioni principali massime nella sezione ha rivelato un'asimmetria dello stato tensionale, come si evince dalla Fig. 6.

Si nota il susseguirsi di stati di trazione e compressione sulle superfici della billetta. La superficie interna (Fig. 1), ovvero quella a contatto con l'angolo ϕ , passa da uno stato di compressione prima dell'ingresso nella zona di deformazione principale (regione ABC in Fig.1), ad uno stato di trazione in uscita. La superficie esterna, a contatto con l'angolo ψ , si trova in uno stato di compressione prima dell'ingresso nella zona ABC, di trazione all'interno di essa e di compressione in uscita, per la continuità del materiale [11]. Conseguentemente il quadro deformativo evolve diversamente sulla billetta e ciò giustifica i gradienti di deformazione evidenziati dalle simulazioni. Per $\psi=35^\circ$ tale gradiente è più evidente, poiché ci si allontana sempre più dalla condizione di taglio semplice a causa dell'allargamento della zona di deformazione principale ABC, inoltre la deformazione plastica è minima. Per $\psi=0^\circ$ la deformazione plastica mediamente distribuita sulla sezione assume il valore più elevato, la zona esterna risulta maggiormente deformata ma è comunque presente un gradiente. Tale gradiente è dovuto ad un gap di riempimento dello stampo, in Fig. 7, noto come "corner gap", che secondo quanto riportato in la letteratura [12], potrebbe dipendere dalle caratteristiche di incrudimento del materiale.

Tuttavia nel modello ideale il materiale elastico perfettamente plastico, non incrudente dunque, evidenzia comunque un corner gap, deformandosi esternamente con un angolo di curvatura di circa 15° (valore che diminuisce leggermente se si utilizza una mesh più fine). Si è inoltre osservato, implementando materiali con differente tendenza all'incrudimento, che il gap aumenta con tale tendenza. Da ciò segue che i

meccanismi di formazione del corner gap sono correlati sia al comportamento incrudente del materiale sia alla cinetica del flusso plastico nella zona di deformazione [9-14]. Infatti esso viene ridotto dall'attrito ($\mu \leq 0.1$), la cui azione sul materiale è simile ad una "back pressure" che limita il flusso plastico sulle superfici a contatto con lo stampo [12]. Per $\psi=0^\circ$, l'attrito tuttavia causa l'incollamento del materiale sulle pareti dello stampo e la sollecitazione di taglio viene impartita attraverso micro-steps e non in maniera continua, portando spesso a rottura la billetta [10,13,14]. Per $\psi=20^\circ$ si ha il migliore compromesso geometrico-deformativo in termini di uniformità, poiché si è ottenuta una ampia zona a stato deformativo stazionario e ridotta presenza di gradienti. Per contro la deformazione è mediamente più bassa del caso $\psi=0^\circ$ ed è quasi nulla nella zona esterna. Tale tipologia geometrica è preferibile nella pratica costruttiva, poiché elimina l'effetto negativo delle saldature di giunzione dei due canali dello stampo. Inoltre l'effetto dell'attrito non è così marcato come nel caso $\psi=0^\circ$ e l'estrusione risulta più semplice. Dal modello ideale si è quindi passati al modello reale, con le modalità di implementazione precedentemente descritte.

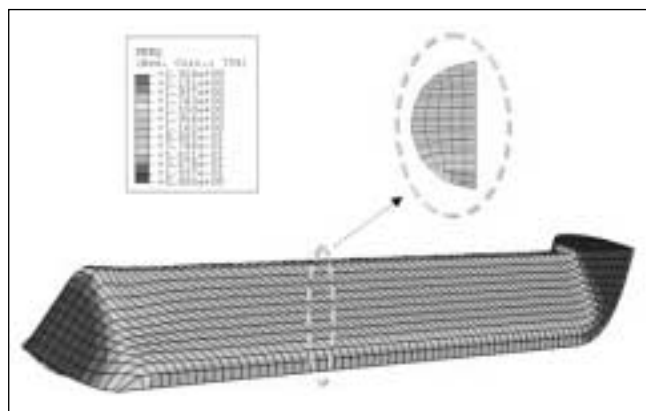


Fig. 9 – Deformazione plastica equivalente nello spazio 3D per sezione circolare e $\psi=35^\circ$. Si riporta un dettaglio dell'andamento deformativo in una sezione trasversale della semibilletta.

Fig. 9 – Plastic equivalent strain (PEEQ) in 3D real model for circular section and $\psi=35^\circ$. PEEQ on transverse section is showed.

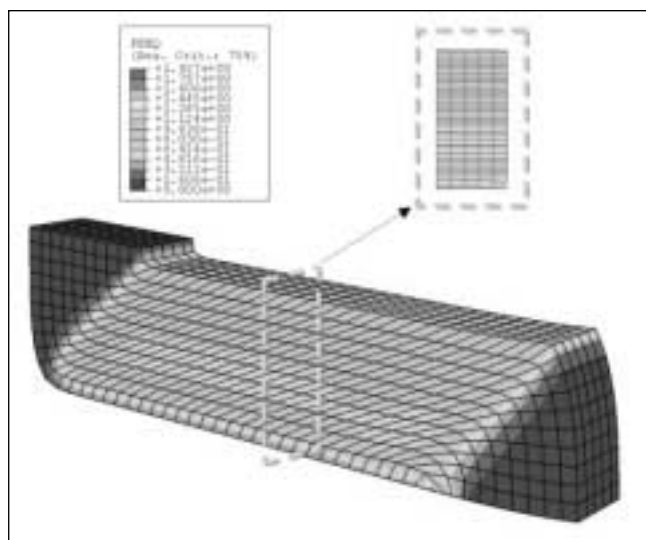


Fig. 10 – Deformazione plastica equivalente nello spazio 3D per sezione quadrata e $\psi=20^\circ$. Si riporta un dettaglio dell'andamento deformativo in una sezione trasversale della semibilletta.

Fig. 10 – Plastic equivalent strain (PEEQ) in 3D real model for square section and $\psi=20^\circ$. PEEQ on transverse section is showed.

In Fig. 8 sono riportate le due varianti geometriche degli stampi. Nelle Figg. 9 e 10 sono riassunti gli stati deformativi risultanti dalle simulazioni effettuate.

Dalle figure si osserva sostanzialmente una maggiore uniformità della deformazione nel caso dell'implementazione AA6082, pur avendo la billetta dimensioni trasversali maggiori. Il quadro deformativo è simile a quello ottenuto nel modello ideale con gli stessi valori angolari, seppur con valori leggermente maggiori di deformazione. Per questa analisi, si può dunque osservare come la deformazione prescinda in gran parte dalle proprietà meccaniche della lega e dalle dimensioni della billetta e sia principalmente correlata ai parametri geometrici di processo. Per l'implementazione 6082Zr la deformazione plastica presenta un maggior gradiente sulle sezioni della billetta e valori più bassi, proprio come ci si sarebbe atteso secondo quanto osservato nel modello ideale. Nelle Fig. 11 e 12, è riportata la media della distribuzione della deformazione plastica equivalente, sulle linee di simmetria (nel caso della sezione circolare tali linee sono diametri) di tre sezioni trasversali equidistanti comparata con l'andamento previsto dalla formulazione analitica (Eq. 1).

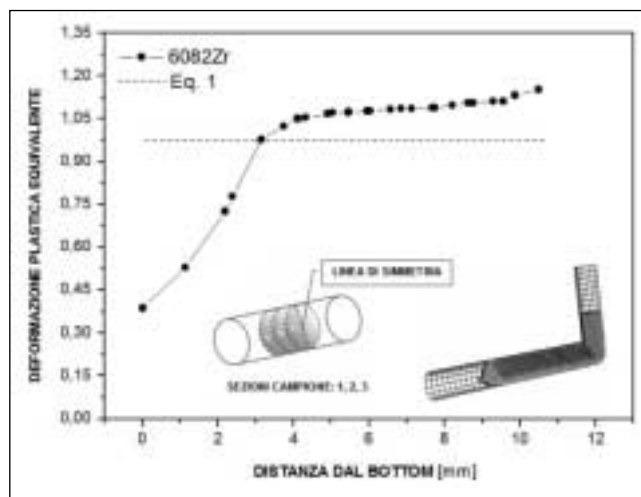


Fig. 11 – Deformazione plastica equivalente nell'implementazione 6082Zr, nelle sezioni trasversali campione.

Fig. 11 – Average plastic equivalent strain in 6082Zr workpiece transverse section.

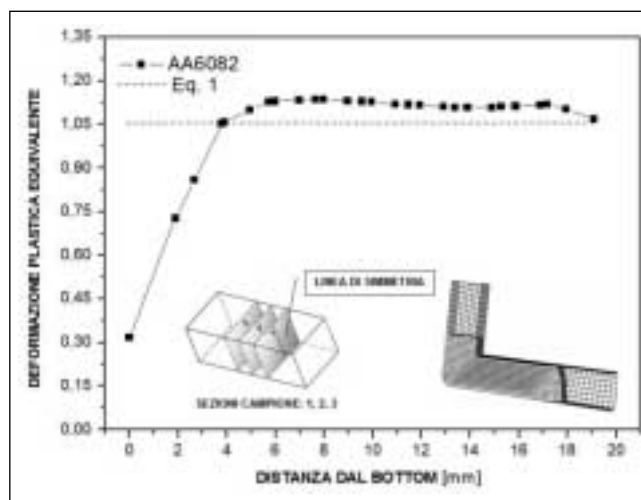


Fig. 12 – Deformazione plastica equivalente nell'implementazione AA6082, nelle sezioni trasversali campione.

Fig. 12 – Average plastic equivalent strain in AA6082 workpiece transverse section.

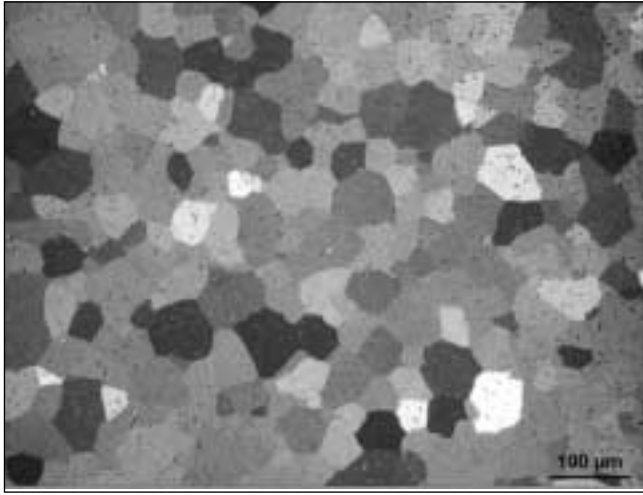


Fig. 13 – Micrografia ottica in luce polarizzata incrociata della lega 6082Zr tq, 200X.

Fig. 13 – Optical micrograph (crossed polarized light) of as received 6082Zr alloy microstructure, 200X.

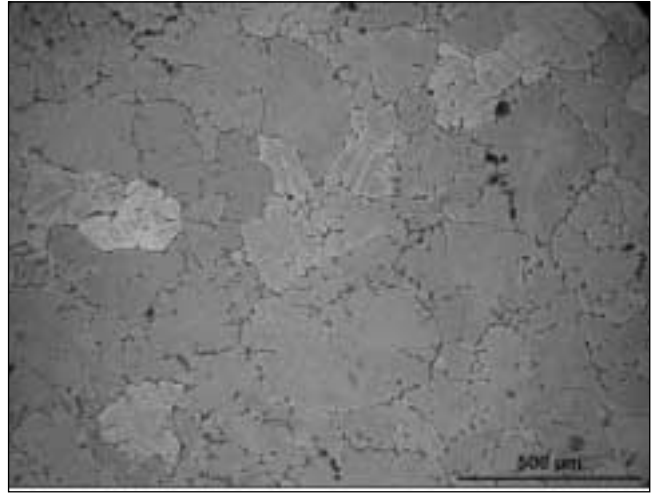


Fig. 14 – Micrografia ottica in luce polarizzata incrociata della lega AA6082 tq, 100X.

Fig. 14 – Optical micrograph (crossed polarized light) of as received AA6082 alloy microstructure, 100X.

Dal punto di vista microstrutturale, è stata realizzata una verifica dello stato deformativo sul materiale dopo una singola estrusione ECAP (N=1). In Fig. 13 è riportata una micrografia ottica della lega 6082Zr nello stato come ricevuto effettuata sulla sezione perpendicolare a quella di estrusione. Si osserva una microstruttura a grani equiassici e l'assenza dunque di orientazioni preferenziali. La dimensione media dei grani è inferiore ai 100 µm.

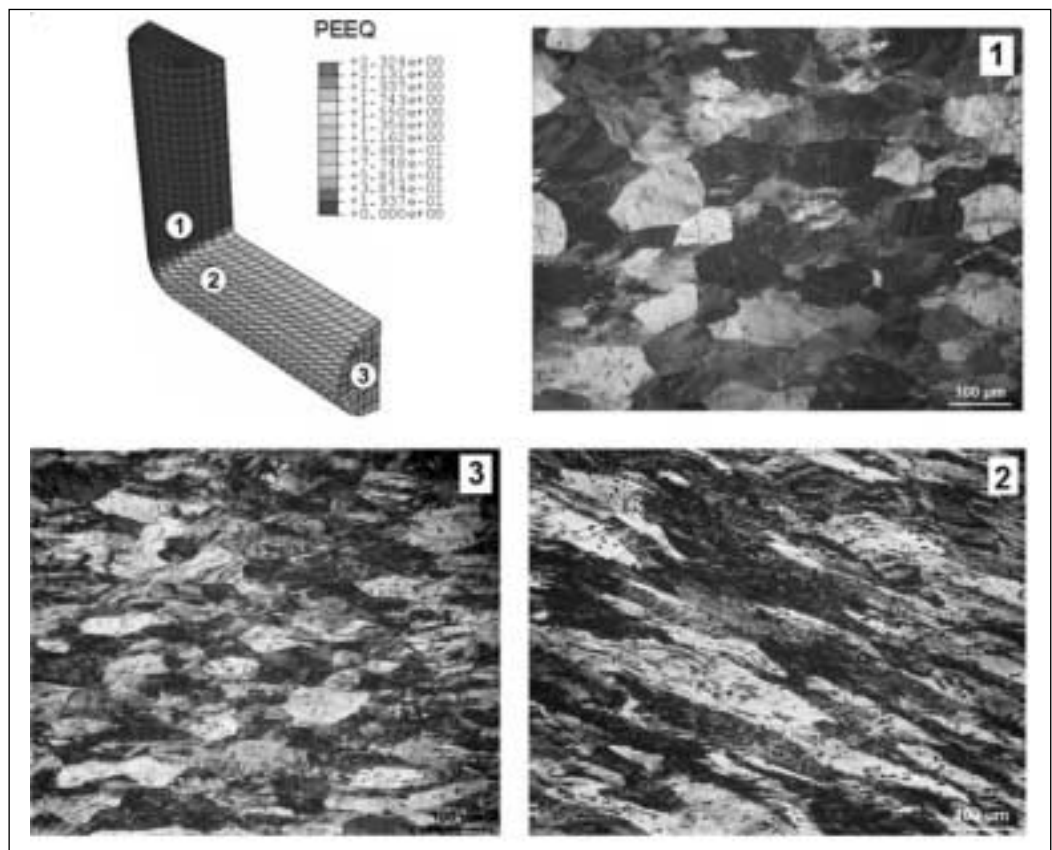
In Fig. 14, analogamente, è riportata una micrografia ottica della lega AA6082 nello stato come ricevuto effettuata nella sezione perpendicolare alla direzione di colata. L'analisi statistica individua una dimensione media dei grani di 214 µm ±54. E' evidente la struttura dendritica di solidificazione e la presenza di segregazione sia dendritica che a bordo grano. Nelle Fig. 15 e 16 sono illustrati alcuni dei risultati dell'ana-

lisi microstrutturale condotta su sezioni e zone differenti delle billette sottoposte ad ECAP. Nelle figure è anche rappresentata la microstruttura delle zone risultate meno deformate nel modello FEM, come ad esempio il fronte della billetta, la base o bottom e la zona immediatamente precedente il piano di taglio, detta coda (zona 1, Fig. 15).

Per la lega 6082Zr l'indagine microstrutturale ha evidenziato la presenza di grani allungati lungo il piano di taglio nella zona della billetta che ha attraversato il piano stesso (zona 2 in Fig. 15). Prima del piano di taglio i grani appaiono solo leggermente compressi ma la morfologia è molto simile a quella del campione indeformato (Fig. 13). Per la lega AA6082 (Fig. 16) i grani della superficie di base (zona 1) della zona del fronte e della superficie laterale (zona 2) della stessa zona non presentano praticamente né deformazione

Fig. 15 – Lega 6082Zr deformazione plastica equivalente (PEEQ) e (1) microstruttura di coda (zona 1); (2) microstruttura zona oltre il piano di taglio (zona 2); (3) microstruttura sezione trasversale del campione deformato (zona 3).

Fig. 15 – PEEQ on 6082Zr workpiece and microstructure after one pass (1) just before the shear plane (zone 1), (2) just after the shear plane (zone 2), (3) on the cross section (zone 3).



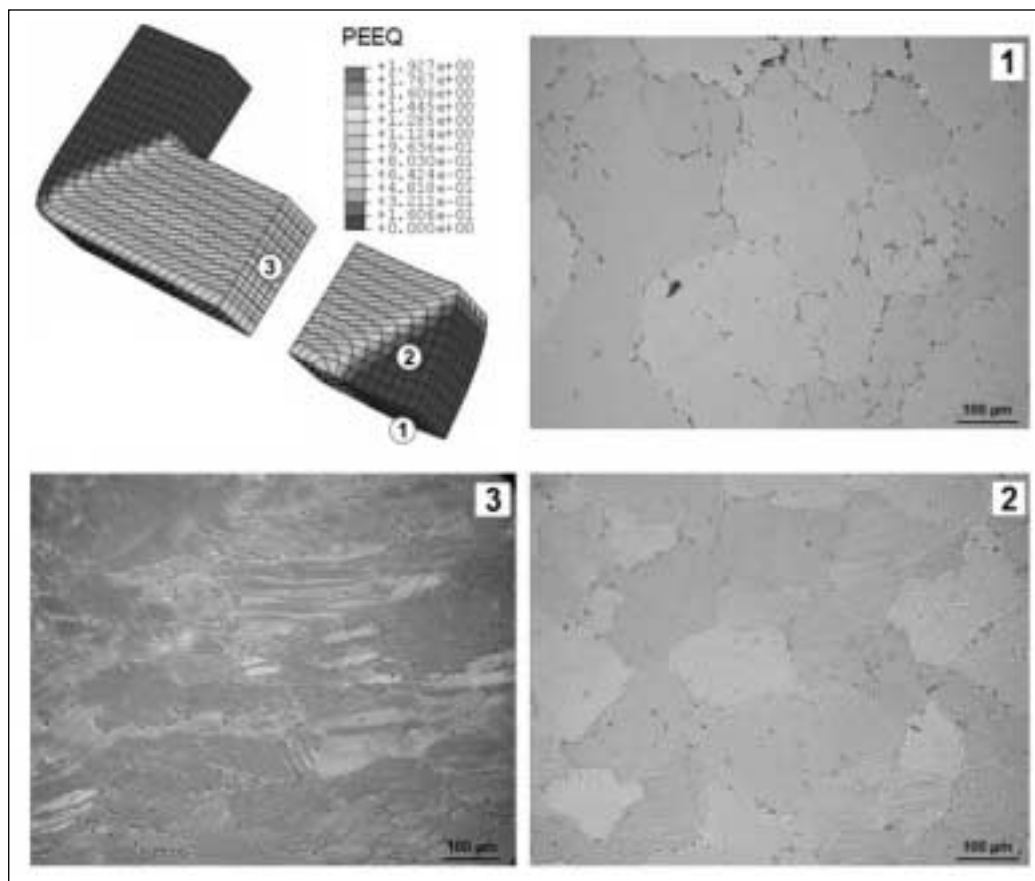


Fig. 16 – Lega AA6082 deformazione plastica equivalente (PEEQ) e (1) microstruttura della base del fronte (zona 1); (2) microstruttura del fronte (zona 2); (3) microstruttura sezione trasversale del campione deformato (zona 3).

Fig. 16 – PEEQ on AA6082 workpiece and microstructure after one pass on (1) front end bottom surface (zone 1), (2) front end longitudinal surface (zone 2), (3) cross section (zone 3).

evidente né orientazioni particolari. Tali microstrutture appaiono infatti molto simili a quelle del materiale non deformato e sono in accordo con quanto previsto dall'analisi FEM.

CONCLUSIONI

Dalle configurazioni geometriche dello stampo prese in esame si può concludere, in accordo con la trattazione analitica, che il valore più elevato della deformazione plastica si ha per $\psi=0^\circ$.

Si è ricavato inoltre che la deformazione plastica mediamente presente sulle sezioni delle billette diminuisce con l'aumentare di tale angolo. Poiché l'omogeneità della deformazione si traduce in omogeneità microstrutturale è necessario avere bassi gradienti di deformazione per una qualità accettabile dell'estruso.

In tutte e tre le configurazioni angolari è presente una zona a deformazione stazionaria mentre il gradiente di deformazione, minimo per $\psi=20^\circ$, tende ad aumentare per $\psi=0^\circ$ e $\psi=35^\circ$.

Le simulazioni FEM hanno evidenziato che allontanandosi, lungo la linea di taglio, dalla zona d'azione dell'angolo ϕ , la deformazione imposta si allontana sempre più dalla natura di taglio semplice per la comparsa di componenti flessionali.

La flessione può instaurarsi sia per la presenza di un corner gap sia per l'aumento del valore di ψ . Nel modello reale la situazione migliore in termini di uniformità e valore della deformazione plastica si è avuta per stampo e billetta a sezione quadrata, grazie anche al minor valore di progetto dell'angolo ψ .

Nella pratica sperimentale la sezione quadrata è risultata più semplice da gestire soprattutto nelle passate multiple (miglior controllo dell'angolo di rotazione della billetta tra una passata e l'altra) mentre la billetta cilindrica ha presentato qualche problema di estrazione dallo stampo al termine di

ogni passata, come riscontrato anche in letteratura [14]. Infine, l'analisi metallografica ha confermato la presenza delle zone a bassa deformazione plastica previste dall'analisi FEM sulle superfici di base delle billette estruse e sui fronti delle stesse.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Segal V. M., "Plastic working of metals by simple shear", Russ. Metall. (English translation) 1, 1981, 99-105.
- [2] Furukawa M., Horita Z., Nemoto M., Langdon T. G., "Processing of metals by equal-channel angular pressing", Journal of materials science 36, 2001, 2835-2843.
- [3] Segal V. M., "Equal channel angular extrusion: from macromechanics to structure formation", Mater. Sci. Eng., A271, 1999, 322-333.
- [4] Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., "Enhanced superplasticity of ultrafine-grained alloys processed by severe plastic deformation", Mater. Sci. Forum 304-306 (1999) 39-46.
- [5] Segal V. M., "Materials processing by simple shear", Mater. Sci. Eng., A197, 1995, 157-164.
- [6] Hall E. O., in Proc. Roy. Soc., B 64, 1951, 747.
- [7] Iwahashi Y., Wang Z., Horita Z., Nemoto M., Langdon T. G., "Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials", Scripta Mater. 35(2), 1996, 143.
- [8] Yang Y. L., Lee S., "Finite element analysis of strain conditions after equal channel angular extrusion", Journal of Materials Processing Technology 140, 2003, pp. 583-587.
- [9] Prangnell P.B., Harris C., Roberts S.M., Finite element modelling of ECAE, Scripta Mater. 37 (1997) 983-989.
- [10] C.J. Luis-Pérez, R. Luri-Irigoyen, D. Gastón-Ochoa,

- “Finite element modelling of an Al–Mn alloy by equal channel angular extrusion (ECAE)”, *Journal of Materials Processing Technology* 153–154 (2004) 846–852.
- [11] Kim H. S., “Finite element analysis of equal channel angular pressing using a round corner die”, *Materials Science and Engineering A315* (2001) 122–128
- [12] Kim H. S., Seo M. H., Hong S. I., “Plastic deformation analysis of metals during equal channel angular pressing”, *Journal of Materials Processing Technology* 113, 2001, 622–626.
- [13] Oh S.J., Kang S.B., “Analysis of the billet deformation during equal channel angular pressing”, *Mater. Sci. Eng. A343* (2003) 107–115.
- [14] Segal V. M., “Engineering and commercialization of equal channel angular extrusion”, *Mater. Sci. Eng., A386* (2004) 269–276

— A B S T R A C T —

**FEM AND MICROSTRUCTURAL ANALYSIS
OF Al-Mg-Si ALUMINUM ALLOYS
PROCESSED BY EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING (ECAP)**

Keywords: *aluminium and alloys, extrusion, modelling*

Equal channel angular pressing (ECAP) is process capable of imparting a severe plastic deformation in a metal workpiece. Such deformation is achieved by simple shear during an extrusion into a die, without changing the specimen cross section. The ECAP purpose is obtaining the ultra-fine grained bulk materials. For practical application, die geometry, material properties and process conditions influence the magnitude of plastic deformation imposed and its homogeneity. These factors play a fundamental role in resulting mi-

crostructure and mechanical properties of processed material.

In this study FEM analysis made possible a better understanding of process and of its related operative parameters, both for tools both for material strain hardening behaviour. The investigation aim was to obtain the most intense and uniform plastic strain on workpiece, hence two and three dimensional FEM analysis on two different aluminum alloys and different tools geometry were carried out. FEM results were compared with workpieces really processed by one pass ECAP and supported by metallurgical techniques. This has evidenced the optimal practical process setup, the real stress conditions involved during the extrusion and finally the effect of others variables (friction and corner gap) on plastic strain homogeneity.