

MICROSTRUTTURA DI UNA LEGA EN-AW 6082 DOPO LAMINAZIONE ASIMMETRICA

S. Farè, M. Mariani, M. Vedani, G. Angella

Nel presente lavoro è stata valutata la possibilità di utilizzare la laminazione asimmetrica per l'affinamento del grano cristallino in una lega EN-AW 6082. Sono state svolte diverse laminazioni per valutare l'influenza dal rapporto di asimmetria, definito come il rapporto tra la velocità tangenziale del cilindro superiore e di quello inferiore, sulla diminuzione della dimensione media del grano. Il materiale laminato è stato sottoposto a prove di microdurezza per valutare l'evoluzione delle proprietà meccaniche, a osservazioni in microscopia ottica ed elettronica in trasmissione (TEM) per monitorare i cambiamenti microstrutturali. A differenza delle altre tecniche di deformazione plastica severa, la laminazione asimmetrica sarebbe pronta per lo sfruttamento industriale e in questa ottica si inquadra questo lavoro di indagine.

PAROLE CHIAVE: alluminio e leghe, laminazione, microscopia elettronica

INTRODUZIONE

Nel settore automotive il tema della riduzione di peso delle strutture e dei veicoli assume una importanza sempre maggiore. Per questo motivo, lo sfruttamento di leghe di alluminio ha portato a una progressiva e parziale sostituzione dei comuni acciai. Tuttavia, questa sostituzione risulta spesso irrealizzabile a causa di proprietà meccaniche non paragonabili e problematiche legate alla formabilità dell'alluminio [1]. In particolare, la tessitura dominante dopo deformazione plastica a freddo e ricottura (ovvero la cube texture) risulta dannosa per la formabilità delle lamiere. Questa evidenza sperimentale ha dato il via a numerosi studi con l'intento specifico di migliorare questa importante proprietà tecnologica.

Una tecnica che si è dimostrata promettente proprio per risolvere questo problema spinoso è la laminazione asimmetrica [2]. La laminazione asimmetrica è una tecnica che sfrutta condizioni di asimmetria nell'imposizione della deformazione plastica tra i due cilindri di laminazione. L'asimmetria del processo può esercitarsi sfruttando, ad esempio, diametri dei cilindri di laminazione differenti; oppure, [3] imponendo differenti condizioni di attrito tra i cilindri e il laminato. Una strategia altrettanto efficace è quella di imporre differenti velocità di rotazione ai due cilindri. Per quantificare questo effetto sovente si utilizza il rapporto di asimmetria,

ovvero il rapporto tra le velocità periferiche dei due cilindri, per caratterizzare lo scostamento da una situazione convenzionale.

Sono stati svolti diversi studi in tutto il mondo per fare chiarezza su di una tecnica che appare assai promettente. Jin e Lloyd [4] hanno dimostrato che un effetto importante di questa tecnica è la riduzione della stabilità della tessitura cube, tanto dannosa in stampaggio. Un altro risultato importante è rappresentato dal netto miglioramento del parametro di Lankford [4] e dalla realizzazione di una tessitura preferenziale: la shear texture [3].

Questa tecnica di laminazione, tuttavia, riscuote notevole interesse in campo industriale anche per un altro importante motivo. È stato infatti dimostrato [5] che l'asimmetria varia in maniera sensibile la forza e la coppia associate al processo di deformazione. Risulta infatti che all'allontanarsi dalle condizioni di simmetria (e quindi dal caso di laminazione convenzionale), la richiesta di coppia da parte della gabbia di laminazione diminuisce sensibilmente. Anche la curvatura dei prodotti laminati può essere vantaggiosamente eliminata regolando adeguatamente i parametri di processo.

Infine, ma non per questo meno importante, la concreta possibilità di creare una struttura ultrafine nei materiali processati, è una possibilità affascinante considerate le proprietà che questi materiali esibiscono [6].

In questo lavoro si analizza l'influenza del rapporto di asimmetria sulla microstruttura di una lega di alluminio di particolare interesse industriale, la EN-AW 6082, cercando di comprendere quali siano i parametri ottimali del processo al fine di ottenere una struttura ultrafine nel materiale.

PROCEDURE SPERIMENTALI

In questo lavoro è stato utilizzata una lega di alluminio EN-AW

S. Farè, M. Mariani, M. Vedani
Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica
G. Angella

Consiglio Nazionale delle Ricerche
Istituto per l'Energetica e le Interfasi



▲
Fig. 1
Vista del laminatoio asimmetrico utilizzato per le prove.
View of the rolling mill used for the investigation.

6082. Sono stati ricavati campioni di sezione 30 x 10 mm e 100 mm di lunghezza da un prodotto piano. Le billette hanno subito un trattamento di ricottura della durata di 3 ore a 450°C per omogeneizzare la struttura del materiale.

Il processo di laminazione asimmetrica è stato condotto con un laminatoio da laboratorio. Questo impianto (Fig. 1), progettato ad hoc per un'attività di ricerca, permette un controllo autonomo e indipendente della velocità di rotazione di entrambi i cilindri (del diametro di 150 mm); inoltre, grazie a un'elettronica dedicata, è

campione #	spessore (mm)	riduzione (%)
S1	8,00	20,00
S2	6,40	36,00
S3	5,12	48,80
S4	4,10	59,04
S5	3,28	67,23
S6	2,62	73,79
S7	1,97	80,34
S8	1,47	85,25
S9	1,11	88,94
S10	0,72	92,81
S11	0,47	95,33
S12	0,23	97,66

▲
Tab. 1
Routine di processo imposta durante la laminazione.
Rolling schedule used during rolling process.

possibile l'acquisizione in tempo reale dei parametri di coppia e potenza assorbite per ciascun cilindro.

È stata progettata una routine di processo che prevede l'imposizione di una riduzione del 20% per ogni passata, in 12 passate, per ridurre lo spessore da 10 a 0,23 mm (98% di riduzione totale), come mostrato in Tab. 1.

In corrispondenza degli spessori S3, S6, S9 e S12 sono stati prelevati dei campioni per monitorare il processo da un punto di vista metallurgico.

Con la medesima routine di processo è stata svolta una seconda serie di laminazioni durante la quale, in corrispondenza di ogni step, la billetta subiva una rotazione di 180° intorno al proprio asse longitudinale e questa modalità è stata chiamata route B (Fig. 2), differenziandola dalla laminazione convenzionale, definita route A.

Il parametro di processo più importante che è stato investigato è il rapporto di asimmetria, ovvero il rapporto tra le velocità tangenziali del cilindro superiore e inferiore. Per selezionare alcune condizioni di asimmetria, si è resa necessaria la valutazione della deformazione di taglio efficace (ovvero effective shear strain) che può essere trasmessa al materiale in laminazione. Nello specifico, sono state incise delle linee verticali sulla superficie laterale dei campioni da laminare e se ne è misurata l'inclinazione dopo laminazione. Con tecniche di analisi dell'immagine è stato possibile ricavare l'angolo formato dalle incisioni rispetto alla condizione indeformata.

Il materiale è stato analizzato con tecniche di microscopia elettronica (TEM) ed ottica, oltre a una caratterizzazione meccanica mediante prove di microdurezza.

I campioni per l'analisi al TEM sono stati assottigliati meccanicamente sino a uno spessore di circa 85 µm e da queste lamine sottili sono stati ricavati dischi da 3 mm di diametro. Successivamente, utilizzando un sistema di assottigliamento elettrolitico twin jet commerciale è stata ottenuta una zona utile di osservazione dello spessore di un centinaio di nanometri. La soluzione elettrolitica utilizzata è stata acido nitrico (30%) in metanolo ad una temperatura di -35°C ed una tensione applicata di 18 V.

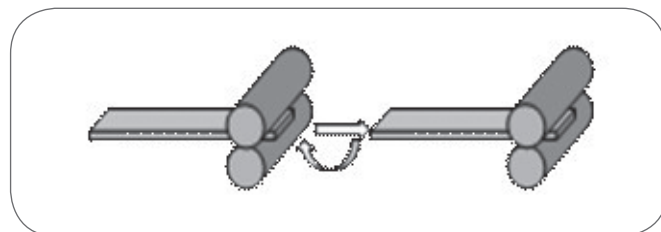
I campioni per la microscopia ottica hanno subito la seguente procedura di preparazione: essi sono stati spianati e lappati meccanicamente, utilizzando dapprima carte abrasive di granulometria decrescente (da 120 a 2500) e successivamente panni con soluzioni di particelle abrasive, sino a 1 µm. Infine, si è proceduto con un attacco elettrochimico Barker con tensione pari a 25 V per 180 secondi.

La prova di microdurezza è stata condotta con un carico sul penetratore di 100 gf, applicato per 15 secondi.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Valutazione della deformazione tangenziale effettiva

In Fig. 3 si mostra la superficie laterale di una billetta. Come si



▲
Fig. 2
Schematizzazione della modalità route B.
Scheme of route B.

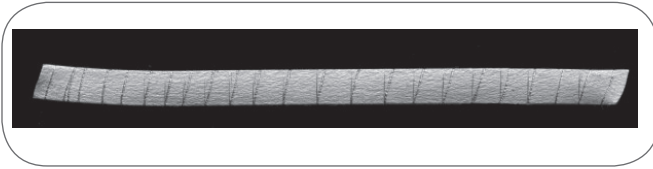


Fig. 3
Superficie laterale di un campione dopo laminazione asimmetrica.
Lateral side of a sample after asymmetric rolling.

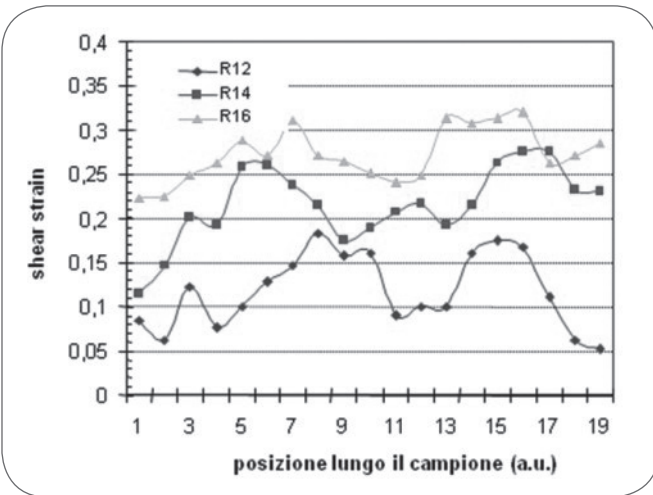


Fig. 4
Andamento dello shear strain in funzione della posizione di rilevamento lungo l'asse longitudinale del campione.
Shear strain as a function of the position along sample longitudinal axis.

vede, sono state riportate delle incisioni prima e dopo la deformazione plastica, così da evidenziare con le seconde, la variazione di pendenza delle prime. Con questa semplice metodologia è stato possibile valutare la differenza di rotazione delle linee incise al variare delle condizioni di asimmetria imposte.

Nella Fig. 4 si riporta l'andamento della deformazione tangenziale effettiva in funzione della posizione sulla billetta per diversi valori del rapporto di asimmetria. Come si vede, l'andamento dell'effective shear strain risulta assai variabile lungo la lunghezza della billetta, sintomo di condizioni di attrito non costanti durante il processo di laminazione.

Nella Fig. 5 si riporta l'andamento medio del valore di effective shear strain: appare evidente la tendenza della deformazione di taglio media ad aumentare insieme al rapporto di asimmetria fino a un valore di circa 1,6 per il materiale e le condizioni di laminazione qui esaminate. Oltre al valore di circa 1,6 la curva ha un andamento decrescente, sintomo che il materiale subisce una deformazione minore perché tende a scivolare sui cilindri di laminazione. Per questo motivo l'interesse nel seguito delle indagini si è concentrato sui valori di 1,2 e 1,4 del rapporto di asimmetria.

Microscopia ottica ed elettronica

È stata svolta un'accurata caratterizzazione della microstruttura con tecniche di microscopia ottica ed elettronica. La microscopia ottica ha fornito un buon punto di partenza per analizzare la variazione della dimensione del grano cristallino. Infatti, utilizzando

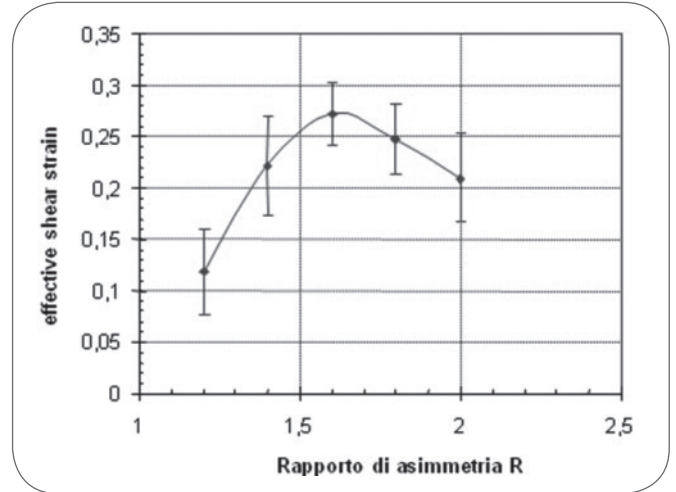


Fig. 5
Andamento dello shear strain medio in funzione del rapporto di asimmetria.
Shear strain as a function of asymmetry ratio.

come riferimento il materiale dopo ricottura, si evince che, all'aumentare della riduzione imposta, la dimensione trasversale media dei grani allungati diminuisce. Se questo fatto non è sorprendente, appare più interessante il confronto tra una tecnologia convenzionale (laminazione con rapporto di asimmetria pari a 1) e quella innovativa (laminazioni con rapporto di asimmetria pari a 1,2 e 1,4). Nel caso della route di processo A si nota che, effettivamente, la dimensione trasversale media del grano diminuisce più rapidamente rispetto al corrispondente processo convenzionale (Fig. 6 e 7). Inol-

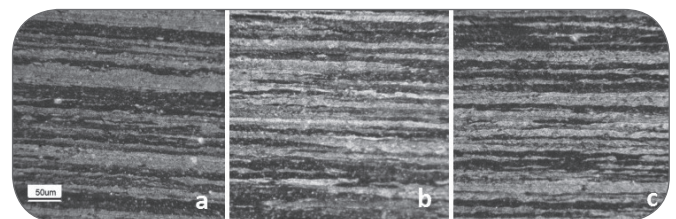


Fig. 6
Micrografie ottiche dei campioni ridotti al 49% dello spessore iniziale, con rapporti di simmetria variabili: (a) R=1; (b) R=1,2; (c) R=1,4.
Optical micrograph of 49% reduced samples, with different asymmetry ratio: (a) R=1; (b) R=1,2; (c) R=1,4.

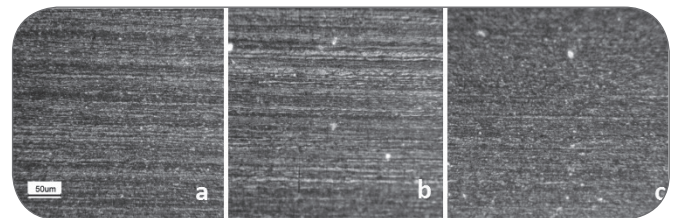
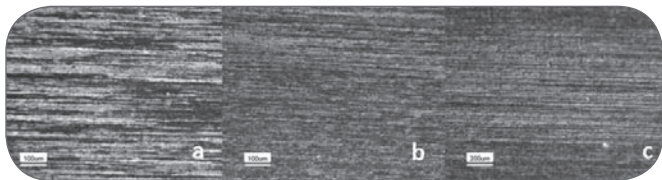
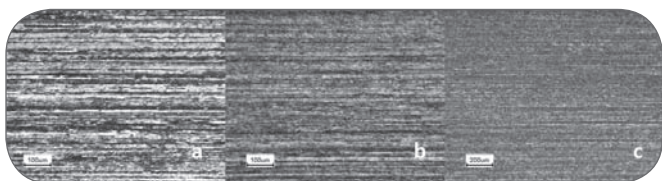


Fig. 7
Micrografie ottiche dei campioni ridotti all'89% dello spessore iniziale, con rapporti di simmetria variabili: (a) R=1; (b) R=1,2; (c) R=1,4.
Optical micrograph of 89% reduced samples, with different asymmetry ratio: (a) R=1; (b) R=1,2; (c) R=1,4.



▲
Fig. 8

Micrografie di campioni realizzati con la route A e un rapporto di asimmetria di 1,2. Sono riportate tre condizioni di riduzione (a) 49%; (b) 73%; (c) 89%.
Optical micrographs of samples rolled with route A and asymmetry ratio of 1,2. Three different reductions are reported: (a) 49%; (b) 73% (c) 89%.



▲
Fig. 9

Micrografie di campioni realizzati con la route B e un rapporto di asimmetria di 1,2. Sono riportate tre condizioni di riduzione (a) 49%; (b) 73%; (c) 89%.
Optical micrographs of samples rolled with route B and asymmetry ratio of 1,2. Three different reduction are reported: (a) 49%; (b) 73%; (c) 89%.

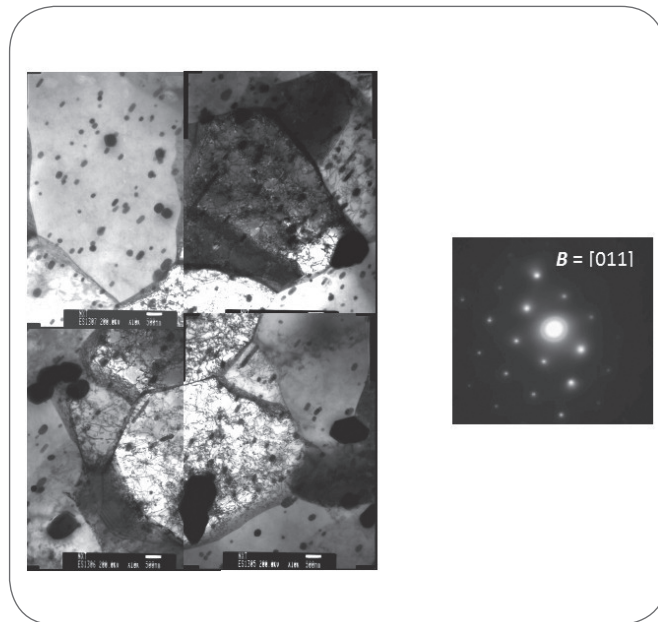
tre, all'aumentare del rapporto di asimmetria, il materiale tende ad assumere una microstruttura più fine e più rapidamente.

Quanto detto può essere esteso anche alla route di processo B (Fig. 8,9): infatti, appare verosimile che, imponendo uno stato di deformazione più severo, si abbia una diminuzione più marcata della dimensione del grano cristallino.

L'analisi delle micrografie ha però sottolineato la necessità di utilizzare un altro strumento di caratterizzazione microstrutturale al fine di raccogliere informazioni più precise sulla struttura del materiale. A questo proposito, con l'ausilio della microscopia elettronica in trasmissione, è stato possibile indagare la sottostruttura dislocativa dei campioni prodotti nelle diverse modalità. Come di consueto, la prima analisi ha riguardato il materiale di partenza, in modo da avere un riferimento per le analisi successive. In seguito, si è focalizzata l'attenzione sui campioni più pesantemente deformati, ovvero quelli con una riduzione complessiva del 98%.

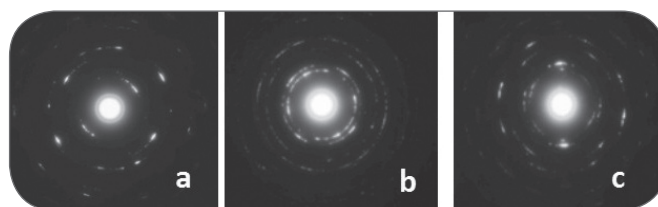
Il materiale di partenza presenta una struttura con bordi di grano ben definiti, all'interno dei quali si distingue una struttura dislocativa, riportata in figura 10, di alcuni micron ed a basso angolo di disallineamento cristallografico. La relativa figura di diffrazione è ottenuta mediante un diaframma di selezione di area, cosicché la figura fornisce informazioni relative alla struttura cristallina interna al grano: la figura a spot è tipica di un cristallo singolo (asse di zona $B = [011]$) e testimonia la regolarità della struttura cristallografica interna al grano, in accordo con le dimensioni micrometriche delle strutture dislocative ed il relativo basso angolo di disallineamento cristallografico.

È interessante analizzare, dapprima, i diversi pattern di diffrazione ottenuti dai materiali laminati, figure realizzate mediante il medesimo diaframma di selezione d'area utilizzato nella Fig. 10 (Fig. 11 e 12). Ciò che emerge è che le figure di diffrazione non sono più a spot come nel materiale tal quale, bensì sono evolute verso figure



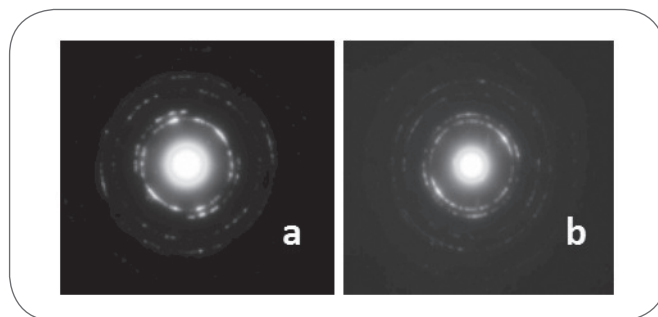
▲
Fig. 10

A lato è riportata la relativa figura di diffrazione ottenuta mediante diaframma di selezione area (selected area diffraction pattern): asse di zona $B = [011]$.
TEM micrograph of starting material and select area diffraction pattern with zone axis $B = [011]$.



▲
Fig. 11

Pattern di diffrazione di campioni laminati secondo la route A e rapporti di asimmetria: (a) $R=1$; (b) $R=1,2$; (c) $R=1,4$.
Selected area diffraction pattern of samples rolled with route A and different asymmetry ratio: (a) $R=1$; (b) $R=1,2$; (c) $R=1,4$.



▲
Fig. 12

Pattern di diffrazione di campioni laminati secondo la route B e rapporti di asimmetria pari a 1,2 (a) e 1,4 (b).
Selected area diffraction pattern of samples rolled with route B and different asymmetry ratio: (a) $R=1,2$; (b) $R=1,4$.

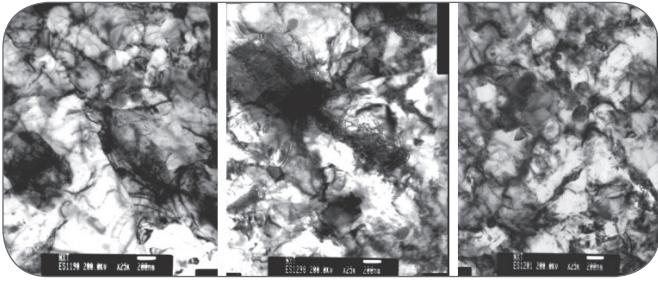


Fig. 13

Micrografie TEM di campioni laminati secondo la route A con riduzione del 98% per tre valori di asimmetria: (a) $R=1$; (b) $R=1,2$; (c) $R=1,4$.

TEM micrograph of samples rolled with route A and reduction of 98% for three values of asymmetry ratio: (a) $R=1$; (b) $R=1,2$; (c) $R=1,4$.

ad anelli: ciò è prova del fatto che i grani sono stati "frammentati" in strutture dislocative fini e con elevato angolo di disallineamento cristallografico, tendendo, per l'appunto, a immagini di diffrazione ad anelli, tipiche delle polveri. Inoltre, passando dal campione prodotto con una tecnica convenzionale a quello prodotto con le condizioni più severe (ovvero, alto rapporto di asimmetria e route B), a parità di riduzione imposta le figure di diffrazione sono ancora più prossime a figure ad anelli, testimoniando il fatto che l'evoluzione delle strutture dislocative ed i loro disallineamenti sono ancora più accentuati.

Quanto detto è confermato dalle micrografie TEM delle strutture dislocative riportate nelle Fig. 13 e 14. Mantenendo invariata la route di processo, ciò che emerge è che all'aumentare del rapporto di asimmetria, la struttura appare più fine. È altresì vero che, confrontando la route A con la più severa route B la dimensione delle celle dislocative sembra ulteriormente diminuita.

Microdurezza

Le indagini sul materiale laminato hanno compreso anche una caratterizzazione meccanica preliminare mediante prove di microdurezza. I risultati sono rappresentati in forma schematica nei grafici a seguire (Fig. 15 e 18). Sono stati svolti dei confronti tra le varie tipologie di processo (route A vs route B e convenzionale vs asimmetrico) al variare della riduzione di sezione imposta.

Oltre al consueto innalzamento di durezza con la riduzione imposta derivante dall'incrudimento del materiale, vi è da sommare un contributo nelle laminazioni asimmetriche che permette un ulteriore aumento delle prestazioni meccaniche (pari a circa il 10% tra il campione laminato in modo convenzionale e quello con il maggiore rapporto di asimmetria, entrambi nelle condizioni di massima riduzione). Se questo fatto non sorprende, ricordando la maggiore complessità dello stato di sforzo, ciò che porta un fattore di novità inaspettato è il confronto tra la route A e la route B, a parità sia di riduzione che di rapporto di asimmetria. Ciò che emerge, infatti, è che per $R=1,2$, si raggiunge una differenza nei valori di microdurezza solamente alla fine del processo di laminazione; al contrario, per $R=1,4$, le maggiori differenze si realizzano nei primi due step di laminazione (S3 e S6, pari al 48,8 e al 73,7%) per andare poi a sfumare a riduzioni più pesanti. Per concludere, si può affermare che è evidente un incremento di proprietà meccaniche sfruttando il processo di laminazione asimmetrica, soprattutto usando la route B.

CONCLUSIONI

Questo lavoro ha dimostrato le potenzialità della tecnica di lami-

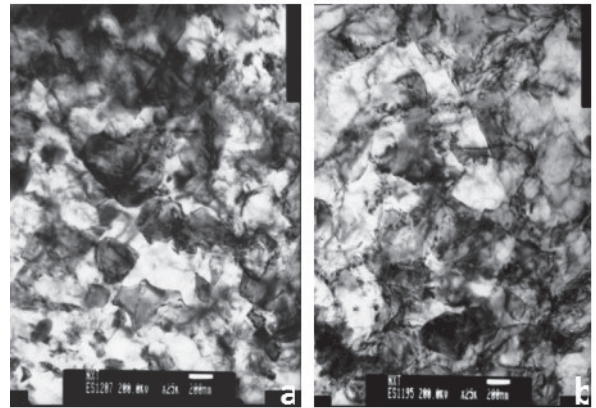


Fig. 14

Micrografie TEM di campioni laminati secondo la route B con riduzione del 98% e per due valori differenti di rapporto di asimmetria: (a) $R=1,2$; (b) $R=1,4$.

TEM micrograph of samples rolled with route B and reduction of 98% for two values of asymmetry ratio: (a) $R=1,2$; (b) $R=1,4$.

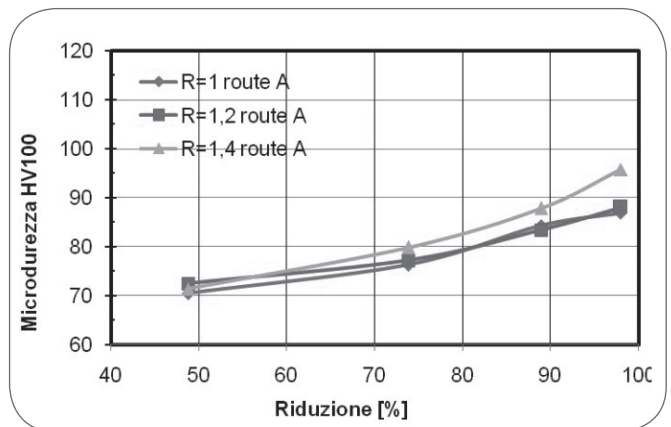
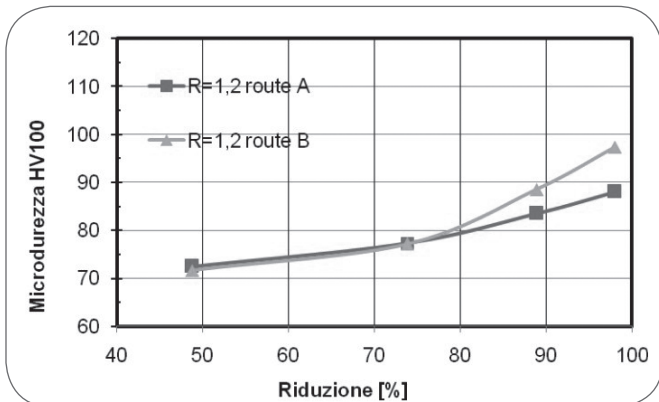


Fig. 15

Variatione della microdurezza in funzione della riduzione imposta, per tre rapporti di asimmetria nella modalità route A.

microhardness as a function of rolling reduction, for three different asymmetry ratios (route A).

nazione asimmetrica nella regolazione della microstruttura del materiale laminato. Inoltre, l'imposizione di uno stato di sforzo assai più complesso rispetto alla laminazione convenzionale, permette di aumentare significativamente la deformazione equivalente subito dal materiale, tanto da poter annoverare la laminazione asimmetrica applicata a forti riduzioni di sezione tra le tecniche di deformazione plastica severa. Questa evidenza comporta, come mostrato dai risultati della microscopia, sia ottica che elettronica, una affinazione spinta della microstruttura, che costituiscono un ottimo presupposto per raggiungere proprietà meccaniche interessanti per la maggior parte delle applicazioni ingegneristiche. Inoltre, nel confronto con una tecnologia convenzionale, si nota che si ottengono prestazioni simili con riduzioni sensibilmente inferiori. Un'altra evidenza importante riguarda le route di processo: se la



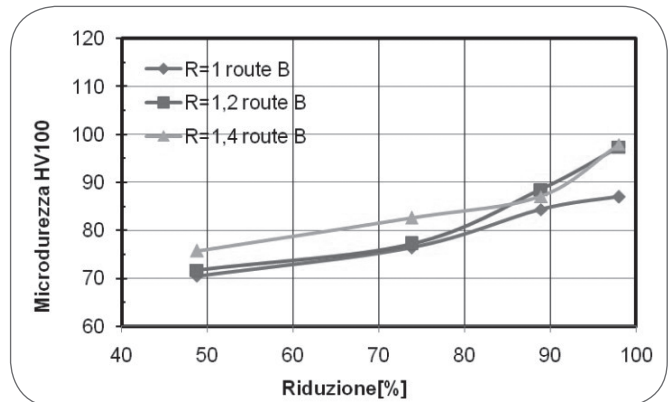
▲
Fig. 17

Confronto della variazione di microdurezza in funzione della riduzione imposta, per un valore di $R=1.2$ nelle due route investigate.
microhardness as function of rolling route (A vs B) for asymmetry ratio of 1,2.

route A si è dimostrata efficace, ancora di più lo è stata la route B, intensificando ulteriormente l'affinamento del grano. Infine, vantaggio non trascurabile per future applicazioni industriali, questa tecnologia è facilmente trasferibile dall'attività di ricerca a una linea di produzione industriale.

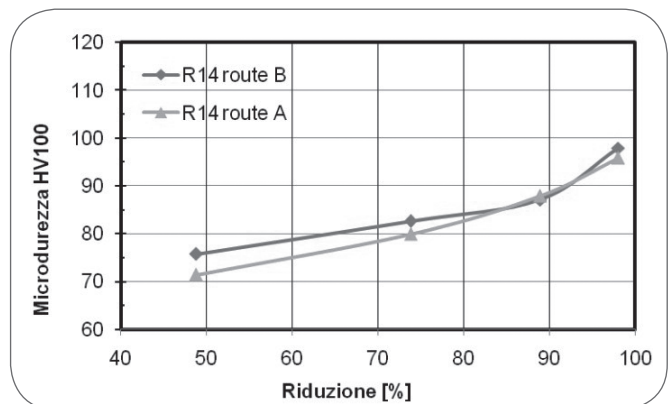
BIBLIOGRAFIA

- 1] S. B. Kang, B. K. Min, H. W. Kim, D. S. Wilkinson, J. Kang, Effect of Asymmetric Rolling on the Texture and Mechanical Properties of AA6111-Aluminum Sheet - Metallurgical and Materials Transactions A Volume 36 A, (2005) 3141-3149;
- 2] K. H. Kim, D. N. Lee, Analysis of deformation textures of asymmetrically rolled aluminum sheets, Acta Mater. 49 (2001) 2583 - 2595;
- 3] H. Utsunomiya, T. Ueno, Scripta Materialia, 57 (2007) 1109-1112
T. Sakai, Improvement in the r-value of aluminum sheets, by differential-friction rolling;
- 4] H. Jin, D.J. Lloyd, Evolution of texture in AA6111 aluminum alloy after asymmetric rolling with various velocity ratios between top and bottom rolls, Materials Science and Engineering A, 465 (2007) 267-273;
- 5] J. Markowski, H. Dyja, M. Knapin'ski, A. Kawalek, Theoretical analysis of the asymmetric rolling of sheets on leader and finishing stands, Journal of Materials Processing Technology, 138 (2003) 183-188;



▲
Fig. 16

Variazione della microdurezza in funzione delle riduzione imposta, per tre rapporti di asimmetria nella modalità route B.
microhardness as a function of rolling reduction, for three different asymmetry ratios (route B).



▲
Fig. 18

Confronto della variazione di microdurezza in funzione della riduzione imposta, per un valore di $R=1.4$ nelle due route investigate.
microhardness as function of rolling route (A vs B) for asymmetry ratio of 1,4.

- 6] Q. Cui, K. Ohori, Grain refinement of high purity aluminium by asymmetric rolling, Materials science and technology, (2000) 1095-1101

ABSTRACT

MICROSTRUCTURE OF AN EN - AW 6082 ALUMINUM ALLOY PROCESSED BY ASYMMETRIC ROLLING

Keywords: aluminum and its alloys, rolling, electron microscopy

The possibility of refining the grain structure of commercial Al-Mg-Si alloys was evaluated using the asymmetric rolling technique in the severe plastic deformation (SPD) regime. Bars of annealed alloy having a thickness of 10 mm were rolled at room temperature down to a thickness of 0,2 mm with a laboratory rolling mill featuring the possibility of independently modifying the rotational speed of its two rolls. Trials were performed

with speed ratio ranging from 1 (conventional rolling) to 2 (the upper roll rotates at a speed that is twice as that of the lower roll). Analyses on the severely deformed samples were mainly focused on the distribution of hardness and the evolution of microstructure along their thickness as a function of rolling conditions. Experimental tests were carried out by optical and transmission electron microscopy (TEM) and hardness microindentations. The investigation demonstrated that asymmetric rolling can readily promote the achievement of an ultrafine grained structure (UFG) in the Al-Mg-Si alloy with an improved homogeneity of hardness and microstructure along thickness. This rolling technique therefore represents a promising route for the production of UFG long products such as strips, plates and bars in continuous industrial processing plants.