

INFLUENZA DELLA MICROSTRUTTURA SULLE PROPRIETÀ MECCANICHE DI UNA LEGA DI MAGNESIO AZ91D PRODOTTA PER THIXOMOLDING®

Fabrizio D'Errico^{1,a}, Marco Boniardi^{1,b}, Silvia Barella^{1,c}, Silvia Cincera^{1,d} Cristian Corna^{1,e}

¹Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica, Via La Masa 34, 20156 Milano

e-mail: ^afabrizio.derrico@polimi.it, ^bmarco.boniardi@polimi.it, ^csilvia.barella@polimi.it,

^dsilvia.cincera@mecc.polimi.it, ^ecristian.corna@polimi.it

SOMMARIO

L'impiego delle leghe di magnesio prodotte per processi semisolidi (quali il processo Thixomolding®) in alternativa a quelle prodotte mediante tradizionali processi di pressocolata (HDPC) si sta ampliando rapidamente negli ultimi anni. Diversi sono, infatti, i vantaggi derivanti da questo processo di fabbricazione, quali ad esempio: a) la semplicità di un processo altamente automatizzato (caratteristica tipica del processo similare di stampaggio a caldo di materiali polimerici); b) l'elevata produttività (cicli di fabbricazione più brevi); c) una maggiore durata degli stampi, grazie a temperature di processo più basse e minore aggressività del materiale semisolido; d) ripetibilità del processo; e) formatura di manufatti near-net-shape.

Poiché il materiale che viene processato si trova allo stato semisolido, questo avanza nelle cavità dello stampo in regime laminare. Inoltre, le proprietà tixotropiche tipiche delle leghe di magnesio semisolide conferiscono una viscosità bassissima.

Entrambe questi fattori sono fondamentali per l'abbattimento del grado di turbolenza del flusso di materiale, e permette di ridurre drasticamente (spesso di eliminare) la porosità residua tipica di una pressocolata. Il basso tasso di porosità si traduce in un sensibile miglioramento delle caratteristiche meccaniche del materiale thixomolding (in particolar modo quelle di resistenza alla fatica).

Durante le azioni di taglio generate dal movimento della vite senza fine (contenuta all'interno della camera di riscaldamento) sulla massa semisolido, le dendriti di solidificazione della frazione liquida vengono di volta in volta frantumate in piccole particelle sferoidali.

Al termine della solidificazione la microstruttura è praticamente equiassica, con caratteristiche meccaniche migliori, soprattutto in termini di duttilità, rispetto a una microstruttura di tipo dendritico.

In questo lavoro una lega AZ91D prodotta per Thixomolding® è stata caratterizzata in condizioni statiche e a fatica assiale ($R=0.1$), sia allo stato di fornitura che dopo un trattamento termico (trattamento Tx) sviluppato appositamente per ridurre la presenza del composto intermetallico $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ (o fase- \square che tende a formarsi al contorno della struttura globulare (o fase \square di solidificazione). La fase- \square è la principale responsabile della perdita di caratteristiche duttili delle leghe ad elevato tenore di Al, quali appunto la AZ91, elemento aggiunto per incrementare le caratteristiche resistenziali del materiale.

Sono state condotte, inoltre, analisi microfrattografiche al fine di interpretare i meccanismi di danneggiamento in presenza ed in assenza del trattamento Tx.

1.INTRODUZIONE

Negli ultimi anni si è assistito ad un notevole sviluppo e alla larga diffusione della tecnologia di produzione in fase semisolido per la realizzazione di parti strutturali in lega leggera. Uno dei più

innovativi processi utilizzati è il cosiddetto Thixomolding[®], sviluppato negli anni '70 presso i laboratori del MIT (Massachusetts Institute of Technology, USA); questo processo permette di realizzare componenti in lega di magnesio utilizzando una tecnologia del tutto simile a quella del tradizionale stampaggio a iniezione delle materie plastiche.

La lega di magnesio viene iniettata all'interno dello stampo ad una temperatura compresa nell'intervallo liquidus-solidus cioè in uno stato semisolido (l'ampiezza di tale intervallo dipende principalmente dalla composizione chimica della lega). Partendo dal materiale in forma di pellets, il processo Thixomolding consente di ottenere in un unico passaggio, della durata non superiore al minuto, componenti di forma pressoché finita. Questa tecnica garantisce alta produttività, ottima ripetibilità delle caratteristiche microstrutturali e proprietà meccaniche omogenee in tutto il componente.

Il principio su cui si basa il processo trae origine dal particolare comportamento di alcune leghe metalliche (quali magnesio, alluminio e zinco) quando si trovano allo stato semisolido: in queste condizioni, alcune leghe mostrano un comportamento tixotropico, ovvero a crescere dell'azione meccanica (generata da un opportuno rimescolamento) decresce la viscosità.

Durante l'avanzamento nello stampo, il materiale viene continuamente rimescolato, producendo all'interno della massa semisolidi forti azioni di taglio; in presenza di tali sollecitazioni, la parte solida del composto (frazione solida) subisce una profonda mutazione dal punto di vista morfologico. Le dendriti, strutture dalla forma arborescente tipiche di un processo di solidificazione di un materiale metallico, vengono progressivamente frantumate. L'effetto finale è quello di una progressiva e pressoché completa globulizzazione della struttura di solidificazione originaria.

Inoltre l'assenza di turbolenze, garantita dal flusso laminare della lega all'interno dello stampo durante l'iniezione, riduce la presenza di gas all'interno della massa semisolidi, consentendo di eliminare le porosità tipiche dei processi fusori per pressocolata (HDPC).

Grazie a queste caratteristiche, assenza di porosità e grani equiassici, le leghe di magnesio prodotte via thixomolding sono caratterizzate da una maggiore duttilità e da una migliore resistenza alla fatica rispetto ai getti.

Per leghe alluminio-magnesio con contenuti di Al > 2% le velocità di solidificazione, tipiche di molti processi di fabbricazione commerciali, causano sovente la formazione di fasi intermetalliche fragili: tali fasi metastabili riducono notevolmente le proprietà meccaniche, in particolare la duttilità [1]. La riduzione della presenza di questi intermetallici è lo scopo ultimo dei più recenti trattamenti termici delle leghe di magnesio [2].

Recentemente è stato sviluppato un innovativo trattamento termico, chiamato Tx [3], con l'obiettivo di ottimizzare la resistenza meccanica e la duttilità di una lega AD91D fabbricata mediante un processo in semi-solido, il rheo-diecasting.

In questo lavoro sono stati testati in condizioni sia dinamiche che statiche, campioni in lega AZ91D ottenuti mediante Thixomolding[®], sia allo stato di fornitura sia dopo trattamento Tx.

2. PROCEDURA SPERIMENTALE

I principali elementi chimici presenti nella lega AZ91D sono indicati in tabella 1.

Tabella 1 - Composizione chimica (in peso) della lega AZ91D

elemento	Al	Zn	Mn	Mg
wt %	9.1	0.78	0.18	resto

Tale lega è stata fornita dalla ditta Thixomat USA sottoforma di provini di trazione di forma finita del diametro di 6mm.

I campioni sono stati ottenuti mediante il processo Thixomolding[®], con porosità media dello 0.8% e una frazione solida all'incirca dello 0.14%.

Sono state eseguite prove di trazione sia allo stato di fornitura che dopo l'esecuzione del trattamento termico Tx, che consiste in una solubilizzazione alla temperatura di 365°C per 2 ore seguita da un invecchiamento naturale.

Inoltre sono state eseguite prove di fatica monoassiale sia sui campioni trattati sia su quelli non trattati, utilizzando una macchina di trazione universale idraulica MTS 100 (il rapporto di fatica utilizzato è pari a R=0.1 e il numero di cicli è stato maggiore di 5·10⁶).

Il limite di fatica è stato stimato mediante il metodo Dixon del tipo stair-case breve [4]. L'utilizzo di un microscopio ottico LEITZ ha permesso di effettuare le analisi metallografiche su entrambi i tipi di

campione; le superfici di frattura di alcuni campioni rotti durante i test di fatica sono state successivamente analizzate mediante microscopia elettronica a scansione (SEM).

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

L'alta percentuale di alluminio (maggiore del 9%), tipica della lega AZ91D, da un lato permette di incrementare le proprietà resistenziali ma, dall'altro, è la maggior responsabile della ridotta duttilità. Le leghe AZ91, dopo un esame macroscopico, spesso mostrano una frattura fragile e la bassa duttilità è correlata all'effetto infragilente della fase β : propriamente si tratta di un composto intermetallico del tipo $Mg_{17}Al_{12}$ che viene a formarsi in prossimità dei bordi grano della fase α . Gli effetti negativi sulla duttilità sono dati sia dalla fragilità della fase β sia dalla bassa compatibilità tra le due fasi (α esagonale compatta, β cubica a facce centrate) [5].

Nella tabella 2 sono riportati i risultati delle prove di trazione e di fatica assiale condotte sulla lega nelle due diverse condizioni.

Tabella 2 - Proprietà meccaniche della lega AZ91D ottenuta per thixomolding nelle diverse condizioni

Condizione	Sforzo di rottura [MPa]	Sforzo di snervamento [MPa]	Allungamento [%]	Limite di fatica [MPa] (a)
Senza trattamento(F)	255	152	8.3	135 (b)
Tx	267	150	10.9	130 (c)

(a) Condotta con un totale di 6 provini, staircase breve

(b) Sequenza di rotture x e run-out o registrate (in parentesi lo sforzo in MPa): o (100); o (120); x (140); o (120); x (140); o (120).

(c) Sequenza di rotture x e run-out o registrate (in parentesi lo sforzo in MPa): x (140); o (120); x (140); o (120); x (140); o (120).

Nella fig.1 è riportata un'immagine al SEM dei siti dove ha avuto origine il danneggiamento; non si notano sostanziali differenze nei risultati dei test a fatica assiale sui materiali nelle due diverse condizioni. Le differenze riscontrate nei risultati dei test statici condotti sono in maggior parte dovute alla diversa microstruttura.

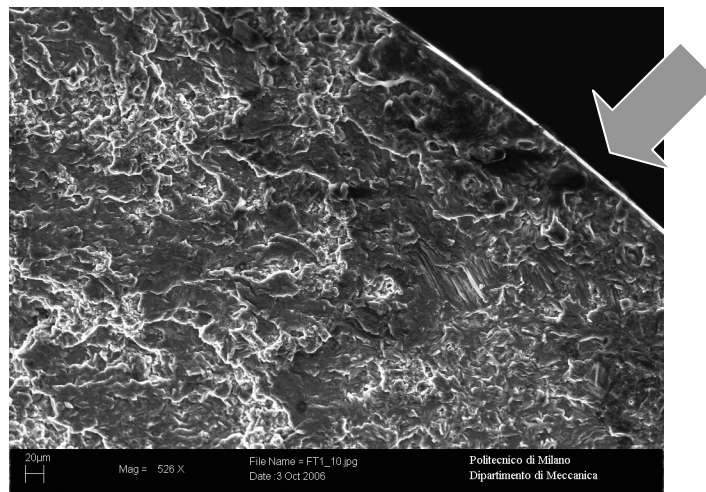


Fig. 1 – Micrografia al SEM effettuata in corrispondenza dei siti di origine del danneggiamento per fatica.

In figura 2 si può notare che, dopo il trattamento Tx, si ha una parziale dissoluzione della rete pressoché continua costituita dalla fase β attorno i grani di fase α .

Come conseguenze benefiche della dissoluzione del reticolo fragile della fase β è possibile annoverare l'aumento della duttilità e dello sforzo di rottura mentre non sono state riscontrate differenze nei carichi di snervamento.

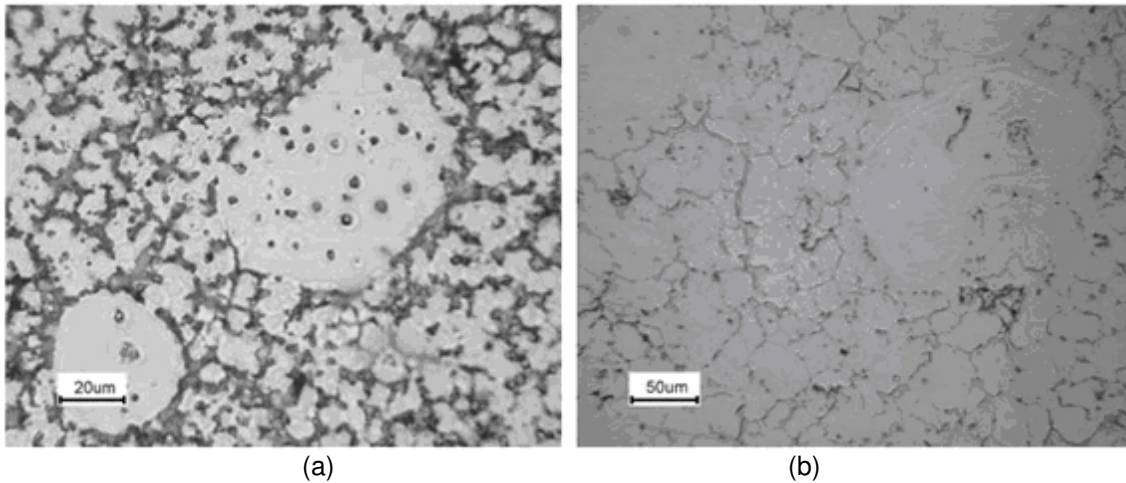


Fig. 2 – Microstrutture della lega AZ91D, prodotta per thixomolding nello stato: a) non trattato e b) dopo trattamento termico Tx.

Le migliori proprietà meccaniche sono correlate a un duplice effetto sulla microstruttura data dal trattamento Tx. Da un lato, la duttilità cresce grazie all'interruzione della fase β quasi continua vicina ai bordi grano rispetto al non trattato termicamente. Inoltre si ha una piccola crescita del grano come effetto secondario del trattamento termico. Quest'ultimo fenomeno porta ad un incremento di plasticità nel materiale prima della rottura, grazie al maggior cammino libero medio delle dislocazioni. Inoltre, la riduzione del contenuto di fase β incrementa il carico unitario a rottura, controbilanciando l'effetto negativo della crescita del grano. Contemporaneamente il trattamento Tx riduce la quantità della fase β grazie alla sua parziale ri-dissoluzione nella matrice, ottenuta mediante la riattivazione dei processi di diffusione dell'alluminio dalla fase β verso i globuli di fase α [3].

4. CONCLUSIONI

Il miglior comportamento della lega AZ91D Tx è correlato alla diminuzione dell'effetto infragilente connesso alla presenza di una rete di fase β , tipica dei getti delle leghe Al-Mg-Zn; Gli elevatissimi valori di resistenza alla fatica (molto vicini allo sforzo di snervamento) sono legati al basso livello di porosità residua del materiale ottenibile dal processo thixomolding.

BIBLIOGRAFIA

- [1] I.J. Polmear, in: *Light Alloys, metallurgy of the light metals*, 3rd ed., edited by Butterworth-Heinemann, Oxford (1995)
- [2] ASM, ASM Speciality Handbook, in: *Magnesium and Magnesium Alloys*, edited by ASM International, Metal Park, Ohio (1999)
- [3] Y. Wang, G.Liu and Z. Fan: *Scripta Materialia* Vol. 54 (2006), p. 903
- [4] W.J. Dixon, A.M. Mood: *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 43 (1948) p.109
- [5] S. Barbagallo, E. Cerri E.: *Engineering Failure Analysis* Vol.11 (2004), p.127