

APPLICAZIONE DEGLI ULTRASUONI AL TRATTAMENTO DELLE LEGHE ALLO STATO LIQUIDO

A. Arrighini

Nella produzione industriale di leghe metalliche da fonderia l'ottenimento di una struttura a grano fine ed omogeneo, povera in porosità ed irregolarità, è traducibile in un incremento delle proprietà meccaniche. Ad oggi queste caratteristiche sono ricavate tramite l'utilizzo di ben consolidati processi produttivi e tramite l'aggiunta di elementi affinanti e modificanti, i quali comportano tuttavia onerose spese aggiuntive, gravanti in modo cospicuo sul costo dei pezzi prodotti.

Nuove tecnologie stanno inoltre nascendo, al fine di migliorare o sostituire quelle già esistenti: ne è un esempio la produzione di leghe aventi caratteristiche tixotropiche, ove l'ottenimento di una lega allo stato semi-solido permette di riempire lo stampo con moto laminare e non turbolento, garantendo compattezza ed uniformità del fronte di avanzamento con conseguente riduzione della quantità di gas intrappolato (da cui hanno origine le porosità, una delle problematiche principali in fonderia) [1].

L'applicazione di onde ultrasonore direttamente al bagno liquido (trattamento US), potrebbe rappresentare una svolta nella produzione di leghe metalliche, portando all'ottenimento di pezzi ad elevate caratteristiche meccaniche senza l'utilizzo di costosi elementi migliorativi. Alcuni studi condotti presso centri universitari esteri, ma non ancora applicati industrialmente, mostrano infatti come questo tipo di onde inducano fenomeni di tipo cavitativo all'interno del metallo liquido, favorendo un affinamento del grano ed una riduzione delle porosità [2-3]. Scopo del presente studio è stato quello di analizzare ed ottimizzare questa nuova tecnologia, applicando onde ultrasonore opportunamente generate a leghe metalliche fuse, onde studiarne l'effetto sulla microstruttura e sulle proprietà meccaniche.

Obiettivo finale della ricerca è stato l'ottenimento di una lega con microstruttura globulare, utilizzabile per applicazioni in semisolido [4].

PAROLE CHIAVE: ultrasuoni, affinamento, degasaggio, tixocasting

SOLIDIFICAZIONE DI LEGHE METALLICHE ATTRAVERSO TRATTAMENTO AD ULTRASUONI

Da studi effettuati è stato dimostrato che applicando onde ultrasonore a bassa frequenza nel trattamento di leghe metalliche allo stato liquido si creano dei fenomeni cavitativi, i quali assumono un ruolo di fondamentale importanza durante la fase di nucleazione e conseguente solidificazione del metallo. Infatti:

I) la cavitazione pulisce le superfici delle inclusioni non metalliche, scarsamente bagnabili dal metallo liquido, aumentandone la bagnabilità (ed aumentando quindi i centri di nucleazione) con una conseguente riduzione della dimensione dei grani;

II) La cavitazione fa sì che si formino delle bolle gassose nel

bagno liquido i cui diametri aumentano molto rapidamente; questo fenomeno provoca una riduzione della temperatura delle bolle sotto la temperatura di equilibrio, causando una situazione di sotto-raffreddamento sulla loro superficie ed aumentando quindi la probabilità di nucleazione;

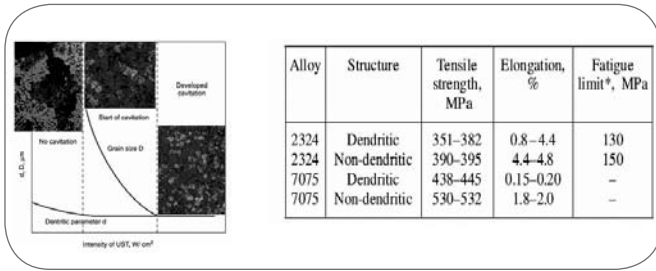
III) la cavitazione ultrasonora favorisce la nucleazione per fenomeni compressivi, in quanto il collasso delle bolle genera delle pressioni che possono raggiungere valori di 100 MPa; queste onde impattive frammentano i grani (e le dendriti) già formati, aumentando ulteriormente il numero di centri di nucleazione.

La presenza di cavitazione provoca quindi non solo un affinamento del grano ma anche la formazione di una nuova struttura non-dendritica, con conseguente aumento delle proprietà meccaniche [2-3].

È stato osservato che il trattamento ad ultrasuoni può rappresentare inoltre un metodo alternativo per attuare un degasaggio nell'alluminio liquido: la rapida crescita delle bolle gassose all'interno del bagno liquido infatti fa sì che le

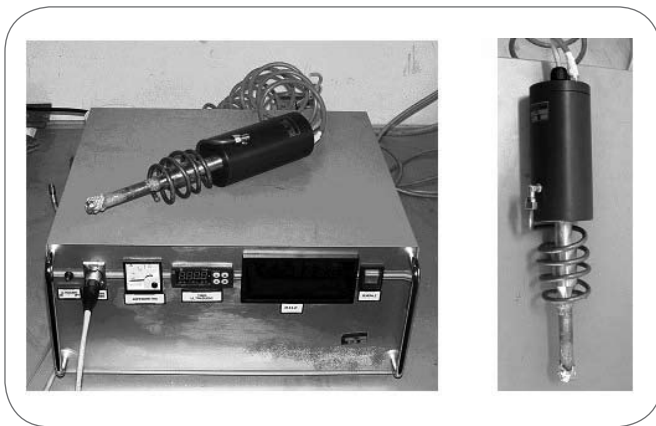
Alberto Arrighini

Memoria vincitrice del Premio Aldo Daccò 2008



▲
Fig. 1

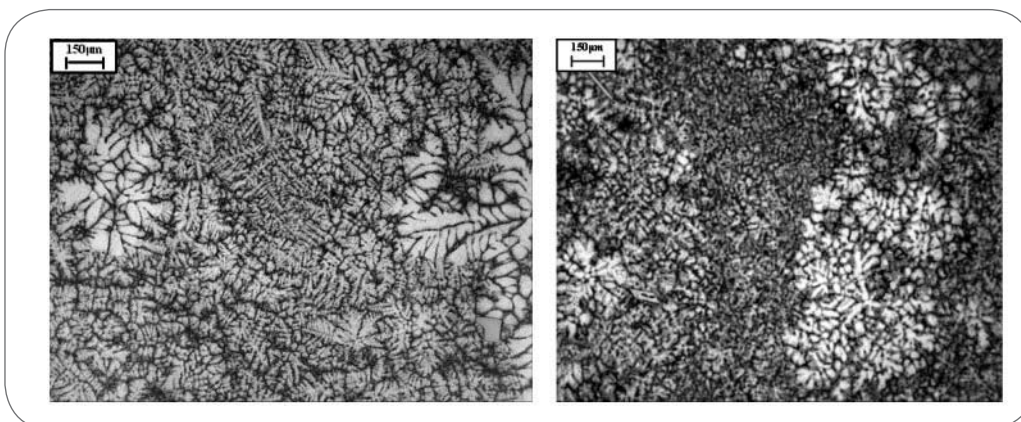
Effetto dell'intensità ultrasonora sulla microstruttura finale (sinistra) e influenza della microstruttura sulle proprietà meccaniche (destra).
Ultrasound intensity effect on the microstructure (left) and microstructure influence on the mechanical properties (right).



▲
Fig. 2

La strumentazione utilizzata, composta dal corpo centrale e dal trasduttore (sonotrodo).
Experimental instrumentation.

stesse coalescano fino alla dimensione richiesta per la loro flottazione sulla superficie del metallo liquido; grazie a ciò la quantità di idrogeno contenuto nel fuso può diminuire



▲
Fig. 3

Campione di ZA27 non trattato (a sinistra) e stessa lega trattata per 2 min. con ultrasuoni (destra).
ZA27 samples not treated (left) and treated for 2 minutes with ultrasound (right).

di due/tre volte rispetto a quella iniziale, senza necessità di utilizzare i tradizionali trattamenti di degasaggio (insufflaggio nel bagno di Ar o N, costosi e pericolosi al tempo stesso).

LA STRUMENTAZIONE

A causa della natura sperimentale di questo lavoro, il primo problema affrontato è stato quello di procurarsi un'adeguata strumentazione per effettuare le prove. Essendo questo infatti un campo della metallurgia ad oggi ancora ampiamente sconosciuto, non sono presenti sul mercato apparecchiature in grado di trattare leghe metalliche fuse con degli ultrasuoni.

È stato quindi necessario realizzare uno strumento composto da un unico trasduttore magnetostrittivo con specifiche caratteristiche ed il cui terminale fosse in grado di resistere alle alte temperature ed all'attacco chimico, data l'elevata aggressività dei metalli fusi.

Prove sperimentali

Dopo una fase iniziale di collaudo e messa a punto dell'apparecchiatura, sono state effettuate varie prove applicando gli ultrasuoni a due leghe metalliche ampiamente diffuse, una lega Alluminio-Silicio (A356) ed una lega Zinco-Alluminio (ZA27).

La metodica di prova ha previsto l'applicazione delle onde ultrasonore direttamente al metallo liquido contenuto nel crogiolo di fusione, immergendo il terminale dello strumento per un tempo variabile a seconda del piano di colata prescelto. Successivamente è stata condotta una campagna di prove meccaniche e analisi metallografiche.

A fronte di queste analisi sono stati infine definiti i parametri che maggiormente influenzano il trattamento, concentrando l'attenzione soprattutto sul tempo di applicazione (in quanto è risultato il fattore che, a parità di potenza, maggiormente influenza il trattamento).

Prove effettuate su Zama ZA27

Nella start-up phase è stata utilizzata la lega ZA27, scelta attuata per due motivi principali: partendo da conoscenze quasi nulle del processo e dei suoi parametri (temperature, tempi, leghe ...) e non avendo quindi idea del comporta-

mento e delle eventuali problematiche in cui era possibile incorrere, l'orientazione è andata verso un metallo meno aggressivo rispetto ad altri ed avente bassa temperatura di fusione.

È stato stilato uno specifico piano di prove, le quali hanno portato i migliori risultati per tempistiche di applicazione degli ultrasuoni di circa un minuto e mezzo/due minuti: in questo caso si è ottenuta una microstruttura avente un grano più fine e quasi del tutto priva di strutture dendritiche rispetto alla stessa lega non trattata con ultrasuoni, nonché una struttura globale piuttosto omogenea (Fig.

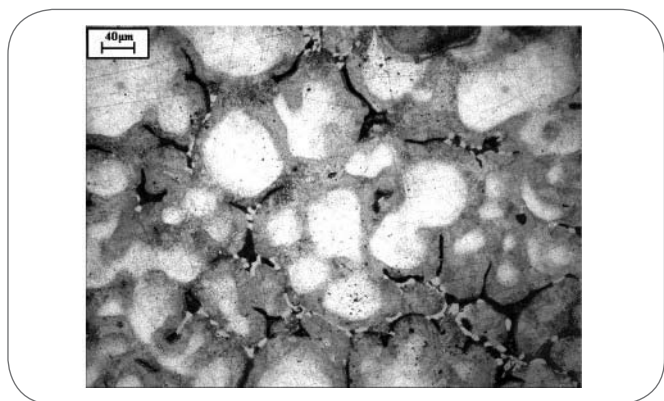


Fig. 4 *Micrografia di un campione trattato con US, con microstruttura globulare.*
Globular structure of a sample treated with ultrasound.

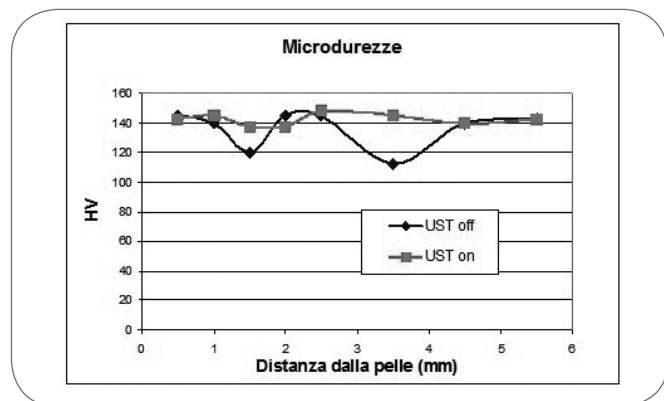


Fig. 5 *Microdurezze effettuate sulla lega ZA27. Treated and not treated ZA27 microhardness.*

3-4). Prove di microdurezza sono state poi effettuate sui campioni prodotti, le quali hanno mostrato come, sebbene l'utilizzo di ultrasuoni non produca un incremento sostanziale del valore di durezza, è riscontrabile una chiara uniformità dei valori stessi, confermando una maggior omogeneità microstrutturale fra cuore e pelle.

Prove effettuate su lega d'Alluminio A 356

Come nel caso della Zama, anche le prove sull'Alluminio sono state effettuate aumentando progressivamente i tempi di applicazione ed utilizzando diverse combinazioni dei parametri.

Uno dei risultati più significativi, come si può chiaramente osservare in Fig. 7, è la completa trasformazione della struttura dendritica in una globulare e più regolare. Questo è un risultato molto importante in quanto conferisce al materiale migliori proprietà meccaniche senza l'aggiunta di modificanti (fin ora ritenuti necessari).

Sono state effettuate prove affiancando il trattamento ad ultrasuoni a tecnologie di miglioramento della microstruttura ampiamente diffuse, quali l'utilizzo di elementi affinanti (TiB₂) ed elementi modificanti (Sr): anche in questo caso i risultati ottenuti sono stati molto soddisfacenti in quanto la microstruttura pre-

senta notevoli migliorie rispetto alla lega non trattata. Nel caso di aggiunta di TiB₂, sebbene il nucleante provveda già a fornire un grano fine, l'applicazione del trattamento

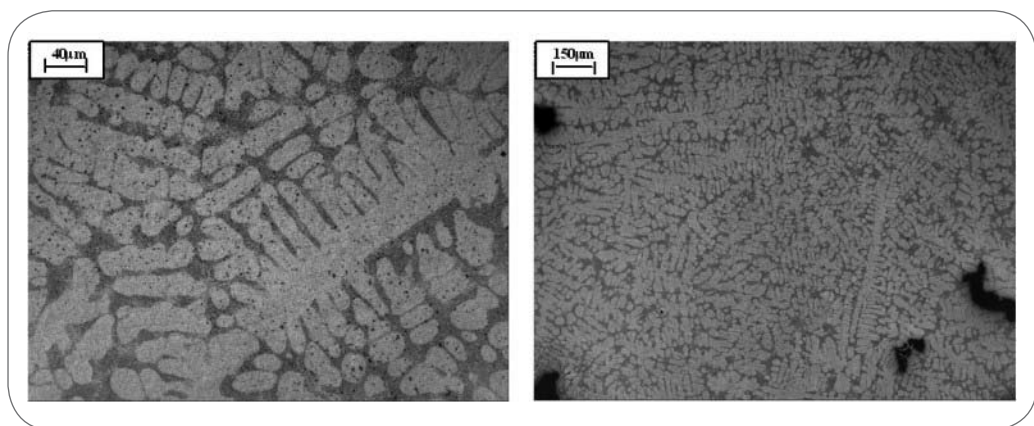


Fig. 6 *Micrografia di un campione non trattato con ultrasuoni, ove è nettamente riconoscibile la tipica struttura dendritica delle leghe di Alluminio e l'elevata presenza di porosità.*
Microstructure of a not treated Aluminium samples, where it's clearly show the dendritic structure and the presence of porosity.

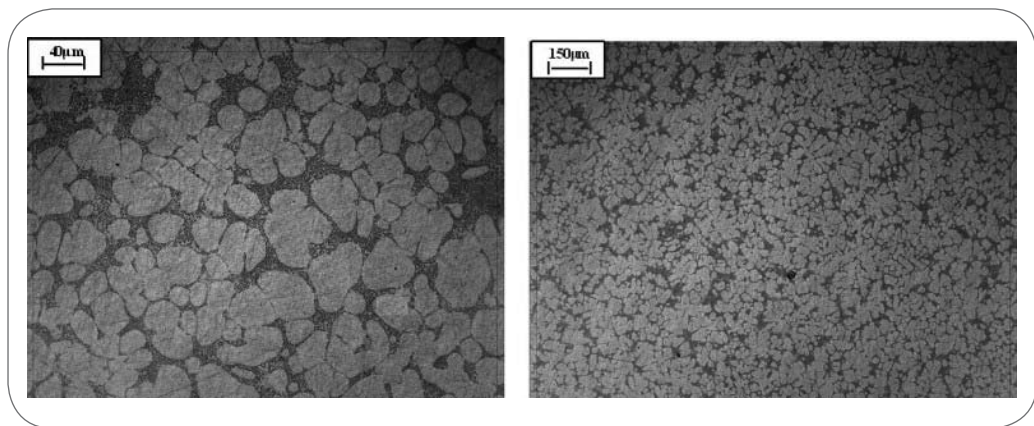
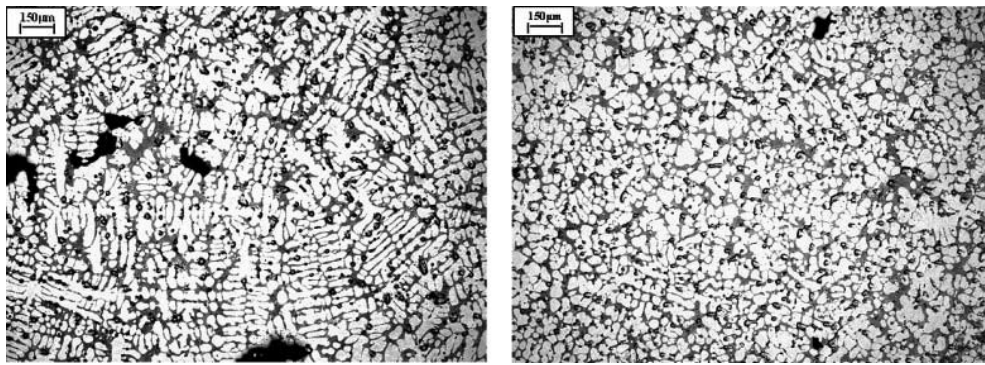
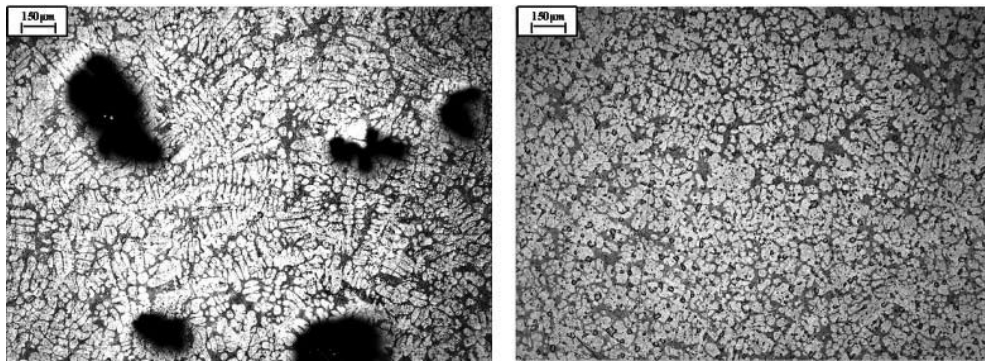


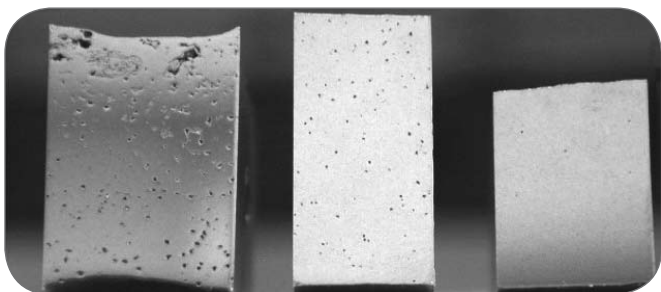
Fig. 7 *Micrografia di un campione trattato con ultrasuoni per tre minuti non consecutivi.*
Microstructure of a sample treated for 3minutes, not consecutive

▲
Fig. 8

Micrografia di un campione proveniente da lega con aggiunta di TiB₂, non trattato (sinistra) e trattato per un minuto e mezzo (destra).
TiB₂ added samples not treated (left) and treated for 1.5 minutes (right).

▲
Fig. 9

Confronto fra un campione colato senza utilizzo di ultrasuoni (sinistra) ed uno trattato per 2 minuti (destra): è chiaramente visibile la riduzione di porosità.
Comparison between a not treated samples (left) and a 2 minute treated sample (right), where it's clear the porosity reduction.

▲
Fig. 10

Confronto fra un campione colato senza ultrasuoni (a sinistra), uno colato dopo applicazione di ultrasuoni per 1 minuto (al centro) ed uno colato con sovrapposizione degli effetti ultrasonori (a destra).
Comparison between a not treated (left), treated for 1 minute (center) and treated with overlap effect (right) samples.

US assicura la scomparsa della struttura dendritica a favore di una globulare ed omogenea (Fig. 8); si nota inoltre (Fig. 9 e 10) una sostanziale riduzione della porosità nei campioni trattati, a seguito del degasaggio attuato dagli ultrasuoni.

Nel caso di leghe trattate con ultrasuoni in concomitanza all'aggiunta di Stronzio si è osservata una morfologia della fase eutettica ancor più fine ed omogenea rispetto ai campioni con sola aggiunta di Stronzio, migliorando ulteriormente i benefici di quest'ultimo [Fig. 11].

Sono state effettuate infine delle prove di durezza, le quali hanno mostrato come gli ultrasuoni applicati a leghe di alluminio non solo provocano un incremento di durezza, ma favoriscono anche una omogeneizzazione dei valori fra pelle e cuore [Fig. 12].

OTTENIMENTO DI LEGHE CON PROPRIETÀ TIXOTROPICHE TRAMITE TRATTAMENTO AD ULTRASUONI

La tixotropia è una proprietà posseduta da alcune leghe metalliche sotto determinate condizioni, che consiste in una diminuzione di viscosità del materiale se sottoposto ad uno sforzo di taglio; le leghe che posseggono questa caratteristica

si presentano in uno stato semi-solido, avente una frazione di solido variabile indicativamente fra il 20% ed il 50%. Se si considera per esempio un processo di pressocolata, la possibilità di iniettare con successo nella cavità dello stampo un materiale "pastoso", e quindi di riempire lo stampo in moto laminare e non turbolento, si deve solamente a questa proprietà; questo garantisce compattezza ed uniformità del fronte di avanzamento riducendo notevolmente l'intrappolamento di gas da cui hanno origine le porosità presenti in gran parte dei componenti ottenuti mediante il processo tradizionale.

Le minori temperature di esercizio consentono, inoltre, di aumentare la vita utile degli stampi e limitare i ritiri di solidificazione rendendo particolarmente promettente l'applicazione industriale del semisolido sia da un punto di vista qualitativo che economico.

Ad oggi esistono diverse metodologie per ottenere leghe con caratteristiche tixotropiche, la principale delle quali consiste in un'agitazione meccanica della lega durante la fase di solidificazione, procedimento che comporta però di-

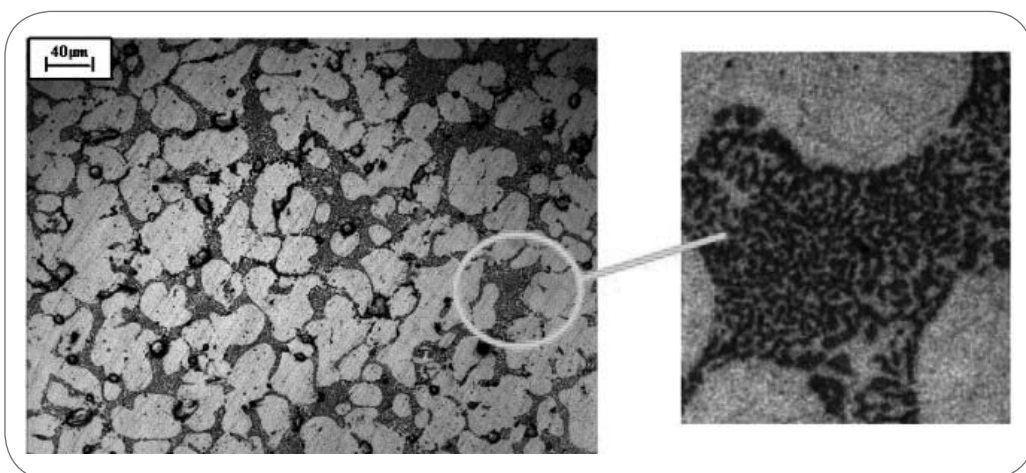


Fig. 11 *Micrografia di un campione trattato con ultrasuoni per 1.5 minuti con eutettico modificato tramite aggiunta di Sr e Ultrasuoni. Sr added alloy, treated for 1.5 minutes.*

verse problematiche [5]. Sulla scorta dei risultati ottenuti, applicando gli US a leghe allo stato liquido, sono stati effettuati dei test per valutare la possibilità di sostituire ai metodi tradizionali di agitazione della lega il sistema US. Per entrambe le leghe trattate con tempi di applicazione superiori al minuto, si è potuto osservare a fine trattamento un comportamento tixotropico sostanzialmente identico a quello ottenibile con metodologia tradizionale. Le micrografie effettuate successivamente su campioni opportunamente preparati, hanno confermato quanto ci si attendeva, mostrando una microstruttura globulare

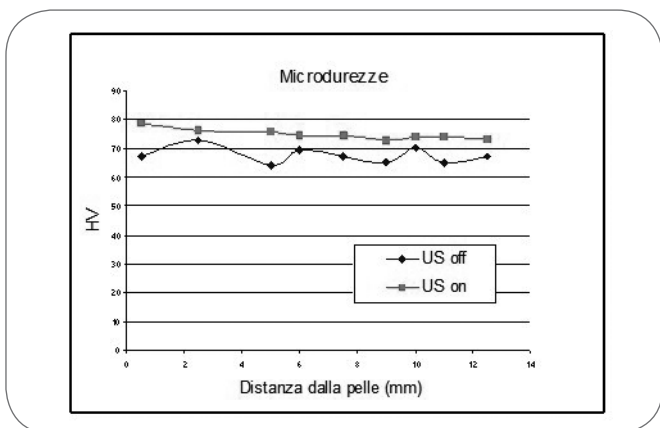


Fig. 12 *Microdurezza di una lega di Alluminio (A356) non trattata e di una trattata ad ultrasuoni. Treated and not treated A356 microhardness.*



Fig. 13 *Sequenza del "taglio" della lega ottenuta con proprietà tixotropiche. Tixotropic behaviour of the treated alloy.*

omogenea, tipica di un materiale con caratteristiche tixotropiche (Fig.14). Successive indagini metallografiche hanno inoltre permesso di confrontare i campioni ottenuti mediante ultrasuoni con quelli prodotti con agitazione meccanica, mostrando molte similitudini morfologiche, e in alcuni casi addirittura la microstruttura del metallo trattato con US è apparsa più fine ed omogenea (Fig.15).

APPLICAZIONE DEL TRATTAMENTO AD ULTRASUONI IN COLATA SEMI-CONTINUA DI LEGHE DI ALLUMINIO

Un tentativo di applicazione industriale della tecnologia è stato sperimentato su una linea di colata semi-continua di leghe di Alluminio, grazie alla collaborazione con un'azienda specializzata nella produzione di impianti per la produzione di manufatti in alluminio. Lo strumento ad US è stato

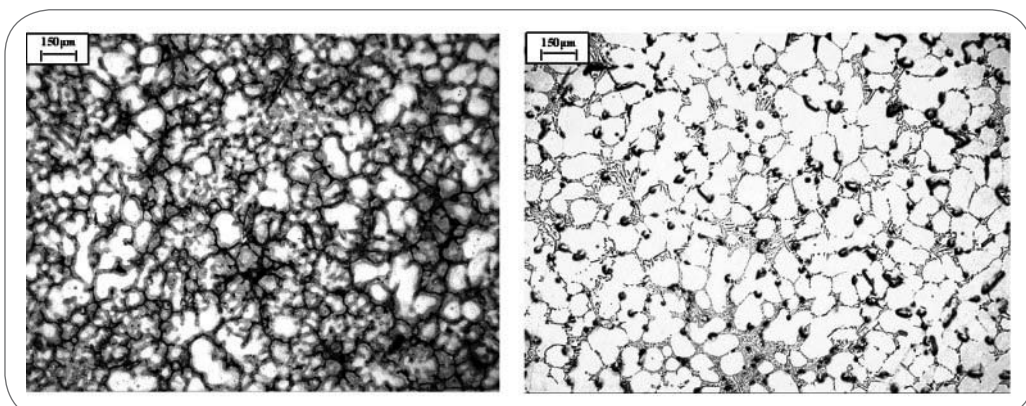
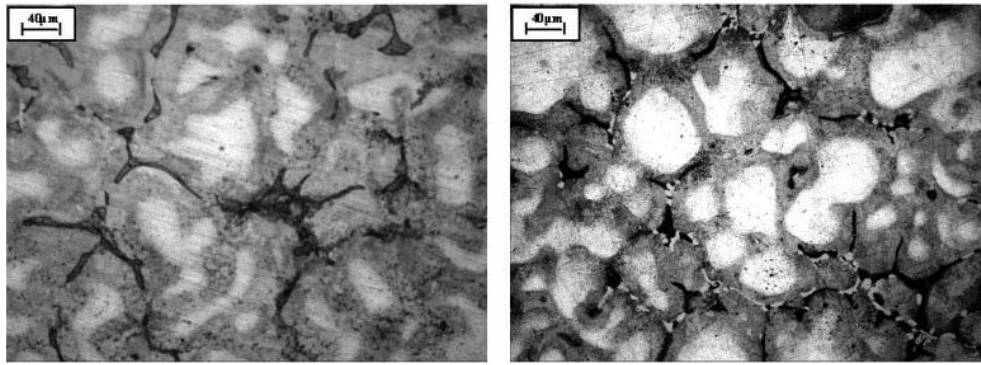
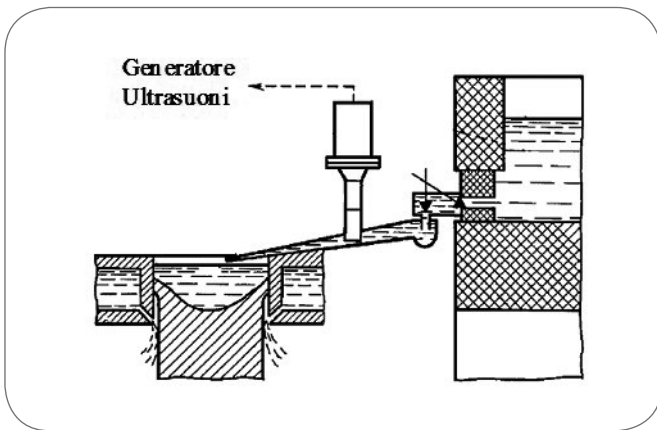


Fig. 14 *Struttura globulare di un campione di ZA27 (sinistra), e di un campione di A356 (destra) entrambi trattati con US. Globular microstructure of a ZA27 samples (left) and an A356 sample (right) both treated with US.*



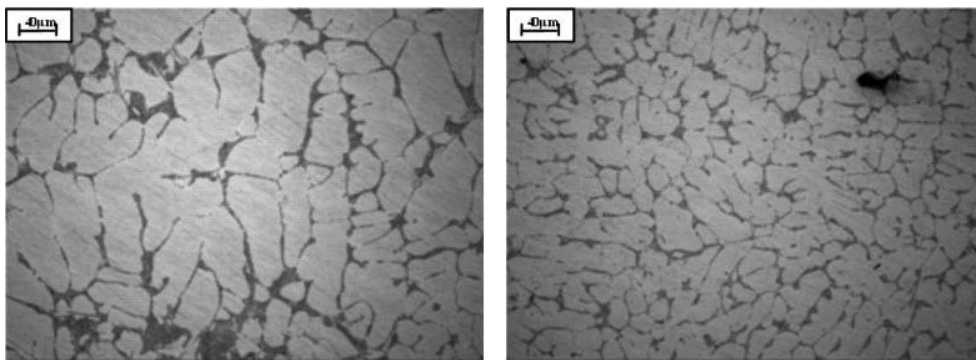
▲
Fig. 15

Micrografia di un campione ottenuto con metodologia tradizionale (sinistra) e di uno ottenuto con trattamento ad ultrasuoni (destra).
Sample's microstructure obtained by traditional method (left) and by US treatment (right).



▲
Fig. 16

Posizionamento dello strumento sul canale di colata dell'impianto semi-continuo.
Placement of the instrument on the semi-continuous casting plant.



▲
Fig. 17

Micrografie della lega colata tradizionalmente (sinistra) e con l'impiego di US (destra).
Microstructure of the alloy casted by traditional way (left) and casted after US treatment (right).

installato su di un impianto pilota presente nella ditta, in grado di produrre billette in Alluminio da 6,7 pollici di diametro e 2 metri di lunghezza; il posizionamento è avvenuto lungo il canale di colata, facendo in modo che le onde ultrasonore interessassero tutta la lega passante in esso, secondo lo schema riportato in Fig.16.

Le prove condotte hanno seguito un ben preciso piano di colata, il quale prevedeva quattro diverse condizioni per analizzare l'effetto degli ultrasuoni anche in combinazione con tecnologie già utilizzate in ambito industriale, quale lo stirrer elettromagnetico.

Dai confronti effettuati si è notato che la lega trattata con ultrasuoni presenta delle differenze microstrutturali rispetto a quella non trattata, confermando il loro effetto affinante (Fig 17).

Per quanto riguarda le prove effettuate con combinazione di stirrer più ultrasuoni si è osservato che l'utilizzo simultaneo dei due sistemi consente di ottenere il risultato migliore in termini di riduzione della dimensione media del grano.

CONCLUSIONI

Le prove effettuate mediante l'applicazione degli ultrasuoni nel trattamento di leghe metalliche allo stato liquido hanno fornito ottimi risultati, in quanto hanno permesso di osservare marcate migliorie microstrutturali, in termini di affinamento del grano e riduzione delle porosità, sia nel caso delle leghe di zinco che nel caso delle leghe di alluminio.

A seguito delle diverse prove condotte è emerso come, a parità di potenza, sia il tempo di trattamento l'elemento che maggiormente influenza la qualità dei pezzi ottenuti.

Le leghe trattate hanno inoltre mostrato proprietà tixotropiche: applicando gli ultrasuoni al metallo in fase di solidificazione, è possibile ricavare una lega semisolida, molto simile a quella ottenibile con i metodi tradizionali.

A completamento dello studio sviluppato è stata dimostrata la possibilità di applicazione del trattamento ad ultrasuoni su un impianto di colata semicontinua per la produzione di billette di alluminio.

BIBLIOGRAFIA

1] Atkinson, H.V. - Modelling the semisolid processing of metallic alloys - Progress in

Materials Science Vol. 50 (2005), 341-412.

2] Eskin, G.I. – Ultrasonic treatment of light alloy melts - AllRussia institute of light alloy, Moscow, Russia - Gordon and Breach science publisher.

3] Baladin, G.F. (1973) - Formirovanie kristallicheskogo stroenya otlivok (Formation of Crystalline Structure of Ingot) - Moscow, Mashinostroyenie.

4] Michel Suery - Microstructure of semi-solid alloys and properties - Proceeding S2P 8th International Conference, September 21-23 2004, Limassol, Cyprus.

[5] A. Pola, D. Furloni, E. Bertoli, R. Roberti, Design and production of new aluminium thixotropic alloys for the manufacture of structural components by semisolid die casting, proceeding S2P 2006, Korea.

ABSTRACT

ULTRASOUND TREATMENT OF LIQUID ALLOYS

Keywords: ultrasound, refinement, degassing, thixocasting

The obtainment of a microstructure free of porosity and characterized by fine grains ensures high mechanical performances of casting components. High pressure die-casting pieces, moreover, suffer from porosity induced by the fluid flow turbulences originated in the injection phase: for this reason different technologies, as semisolid process, have been studied in order to avoid, or at least reduce, air entrapment during die filling, enhancing castings quality.

Ultrasound waves applied to fluids create cavitation phenomena: in liquid metals they cause an increase of the number of the solidification nuclei, with the subsequent obtainment of a fine grain microstructure that involves higher mechanical properties.

The aim of this study is to demonstrate how the application of ultrasonic waves, characterized by proper frequency, on liquid aluminium (A356) and zinc alloys (ZA27) can strongly modify their microstructure, in terms both of grain refinement, without addition of expensive inoculants (as TiB₂), and of gas porosity reduction. Cavitation phenomena, in fact, can enact a degassing, because of the coalescence of gas bubbles inside the liquid that, increasing in their size, can easily escape from the melt.

Moreover, ultrasound treatment was tested during solidifying phase to verify its applicability in producing feedstock materials for thixocasting as an alternative and environmental safe system to the commercial ones.

An ultrasonic equipment was properly manufactured in order to allow

the treatment of liquid metals; different tests were carried out on the molten alloys, changing working temperatures, ultrasound application times, moulds etc... All the produced samples were completely characterized by metallographic investigations in order to evaluate the effect of process parameters on castings quality.

The UST samples showed a better microstructure, characterized by very fine grains and homogeneous structure, without the appears of dendrites, in both case of Zinc and Aluminium alloys (Fig. 3-7). Moreover in the treated metals was clear the gas porosity reduction, as a consequence of the ultrasonic waves (Fig. 9-10).

Hardness tests were also made on the treated and not-treated samples, that show how the UST effect can improve this property, increasing and overall homogenized theirs value (Fig.12).

UST was used to produced feedstock materials for thixocasting, characterized by a globular microstructure, in order to define a new and alternative technology for the semisolid industry.

Comparisons between samples produced via mechanical and ultrasonic stirring were performed in order to evaluate the potentiality of the new technology used. Metallographic analysis made on semisolid samples showed, finally, a better microstructure, in terms of globule shape and size, for the ultrasound treated castings than those produced by traditional method (Fig.14-15).

Finally tests were also conduced on an aluminum continuous casting plant, applying the US waves directly on the Running system: even in this case the treatment have been cause a finer and more homogeneous microstructure (Fig.16-17).