

# Effetto del trattamento T5 e T6 sulla deformazione a freddo di una lega di alluminio ottenuta per tixoformatura

E. Cerri, E. Evangelista, M. Cabibbo

*La lega studiata è una Al6Si3CuMg prodotta per tixocasting sotto forma di billette di circa 200 mm di lunghezza e 20 mm di diametro. La struttura globulare è stata ottenuta per agitazione elettromagnetica lineare (brevetto Pechiney). Questa lega è stata inizialmente introdotta per aumentare il carico di rottura alla trazione, la durezza e la resistenza a temperature elevate, anche a costo di una duttilità ridotta.*

*In questo lavoro sono stati esaminati gli effetti che i trattamenti termici di invecchiamento (T5) e di solubilizzazione più invecchiamento (T6) producono sulle proprietà meccaniche.*

*Il trattamento di solubilizzazione è stato eseguito a 500°C per 4 ore; questo tempo è stato suggerito dalle risposte a 160°C del materiale solubilizzato per tempi diversi. I trattamenti di invecchiamento alle temperature di 170 e 220°C sono stati eseguiti su campioni solubilizzati e non.*

*Le misure di durezza e conducibilità elettrica hanno permesso di seguire i fenomeni di precipitazione nel materiale. I provini trattati nelle diverse condizioni sono stati sottoposti a trazione a temperatura ambiente e le proprietà meccaniche di resistenza a rottura, resistenza di snervamento e allungamento sono state messe in relazione con il trattamento termico subito. I risultati dimostrano che esiste una differenza minima tra il comportamento meccanico dopo T6 e T5 (i campioni T6 hanno una resistenza leggermente più elevata). Però queste lievi differenze non giustificano i maggiori costi in termici economici che un T6 vanta rispetto ad un T5.*

**Parole chiave: tixocasting, Al-Si-Cu, proprietà meccaniche, caratterizzazione microstrutturale**

## INTRODUZIONE

Una lega di alluminio tixotropica utilizzata in una frazione liquida del 50% circa, presenta rispetto alla sua omologa liquida al 100% utilizzata nella pressofusione o nella colata e fucinatura convenzionali, tre differenti caratteristiche fisiche fondamentali: a) una viscosità più elevata, che rende possibile la iniezione del metallo tixotropico a velocità relativamente alte, mantenendo un flusso laminare e la produzione di pezzi più sottili di quelli prodotti con colata e fucinatura; b) un contenuto termico inferiore, che consente un notevole aumento del ritmo di produzione; c) una minore contrazione durante la solidificazione che riduce i problemi di materozzamento. Infine la struttura di solidificazione è fine in tutto il pezzo e non dipende dallo spessore locale. Quindi sono in genere garantite ottime proprietà meccaniche [1]. Da un punto di vista economico la tixoformatura richiede un ingente investimento di capitale, ma consente ritmi di produzione sostenuti. Per cui è particolarmente indicato nella produzione di pezzi in larga scala, soprattutto nell'industria automobilistica.

La lega studiata è del tipo Al6Si3CuMg ed è stata messa punto dalla casa madre (Pechiney) per aumentare il carico di rottura a trazione, la durezza e la resistenza a temperature elevate anche a costo di una duttilità inferiore [1]. Le condizioni tempo-temperatura dei trattamenti di invecchiamento derivano dalle leggi di precipitazione delle fasi di indurimento e sono comuni agli altri processi di fusione. Nel caso particolare,

non sono raccomandabili sottoinvecchiamenti perché portano ad una elevata sensibilità alla tensocorrosione. Il trattamento T5 è particolarmente interessante per la tixoformatura. Infatti la elevata velocità di solidificazione porta ad una struttura fine oltre che ad un elevato contenuto di Mg (e possibilmente di Cu) nella soluzione solida. Questo permette ad un semplice trattamento di invecchiamento di combinare elevata resistenza e duttilità.

Lo scopo di questo lavoro è di studiare l'effetto dei trattamenti termici T6 e T5 sulla struttura e proprietà meccaniche della lega 319 tixoformata e di correlare i risultati alla microstruttura.

## PARTE SPERIMENTALE

La lega 319 oggetto di questo studio è stata prodotta da Pechiney (Francia) sotto forma di barrette tixofornate di 20 cm in lunghezza e 2 cm di diametro. La produzione delle barrette è stata ottenuta per agitazione elettromagnetica (brevetto Pechiney). La composizione chimica della lega è illustrata in Tab.1.

| Si  | Cu  | Mg  | Ti   | Fe   | Mn   | Ni    | Zn   | Sr     | Al  |
|-----|-----|-----|------|------|------|-------|------|--------|-----|
| 5.8 | 2.9 | 0.3 | 0.02 | 0.13 | 0.02 | <0.01 | 0.02 | 215ppm | rem |

Tab. 1. Composizione chimica della lega 319 (peso %).

Table 1. 319 alloy chemical composition (weight %).

Il materiale è stato solubilizzato ed invecchiato. Il trattamento di solubilizzazione è stato ottimizzato dopo aver invecchiato a 160°C campioni solubilizzati a 500°C per tempi diversi. Il tempo di solubilizzazione è risultato di quattro ore, che è consistente con quanto trovato in letteratura [2,3]. Dopo solubi-

E. Cerri  
I.N.F.M., Dip. Ingegneria dell'Innovazione, Università di Lecce

E. Evangelista, M. Cabibbo  
I.N.F.M., Dip. di Meccanica, Università di Ancona

lizzazione, i campioni sono stati invecchiati a 160, 200, 220°C e a temperatura ambiente per tempi diversi. Per le misure di durezza (Rockwell F) e di conducibilità elettrica, la superficie dei campioni è stata preparata con carta abrasiva fino alla 1200. Per seguire i fenomeni di precipitazione e di rafforzamento, le misure di conducibilità elettrica sono state eseguite con una sonda Foster. Ogni misura sperimentale di conducibilità è la media di almeno cinque valori misurati sulla superficie di un campione. Dopo i trattamenti termici di solubilizzazione ed invecchiamento, si sono eseguite le prove di trazione a freddo. I campioni per la trazione con un tratto utile di 25 mm in lunghezza e 6mm in sezione trasversale, sono stati ottenuti per elettroerosione e sono stati trattati secondo alcune delle condizioni più significative dei trattamenti termici. La velocità di deformazione è stata calcolata come  $0.001 \text{ s}^{-1}$  e la tensione di snervamento calcolata allo 0.2% dell'allungamen-

to a rottura.

Per la microscopia ottica (MO) ed elettronica in scansione (SEM), i campioni sono stati preparati con tecniche tradizionali e cioè sono state utilizzate carte abrasive e lucidati sino ad ottenere una finitura di un micron. L'analisi EDS per determinare la composizione chimica delle fasi presenti è stata eseguita con un Philips XL40 dotato di un filamento di  $\text{LaB}_6$ .

RISULTATI SPERIMENTALI E DISCUSSIONE

Caratterizzazione microstrutturale ed invecchiamento

La struttura del campione tixofornato è illustrata in fig. 1. La micrografia mostra come la struttura del campione tixofornato sia composta da globuli di matrice di alluminio (che rimangono solidi durante il riscaldamento nella zona del semisoli-

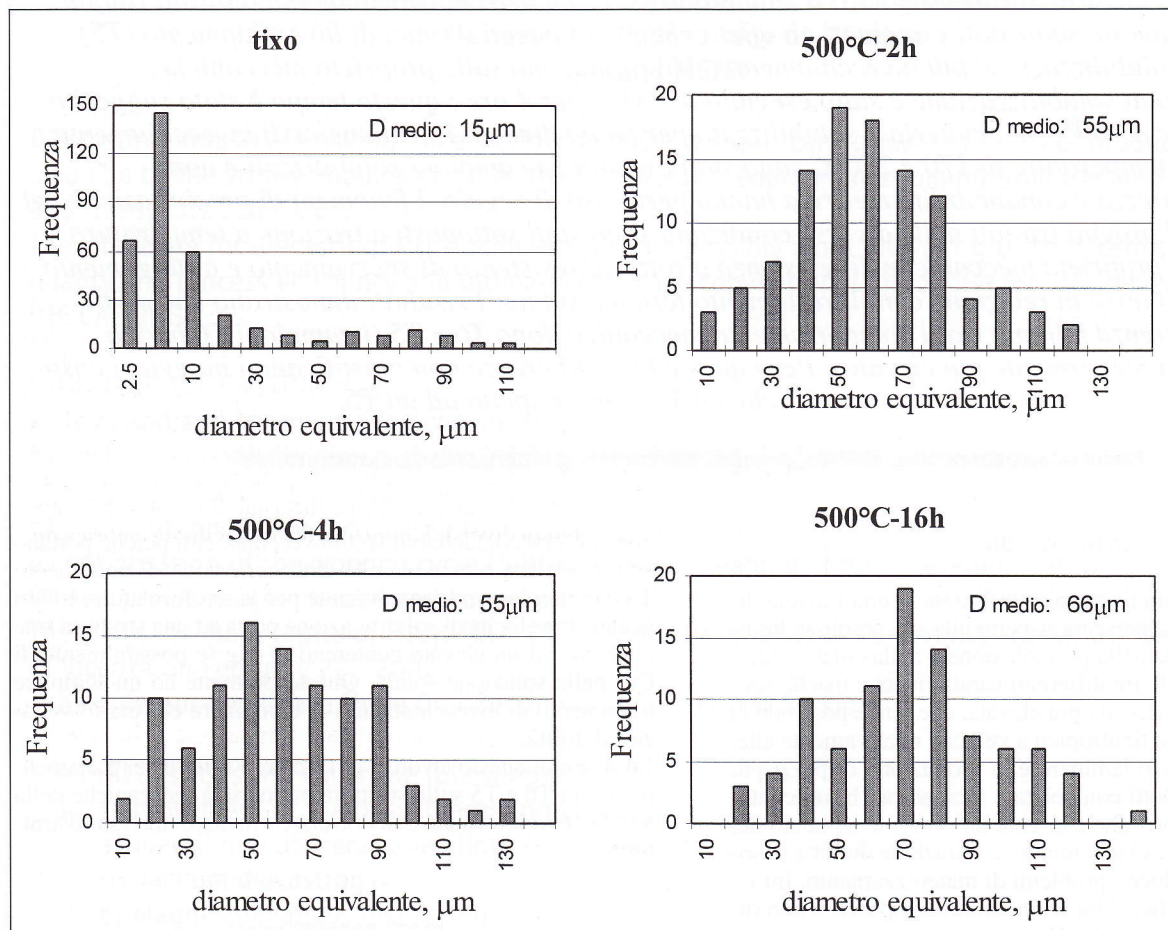


Fig. 3. Statistica della dimensione dei globuli solidi durante l'esposizione a 500°C.

Fig. 3. Statistical evaluation of solid globules during exposure at 500°C.

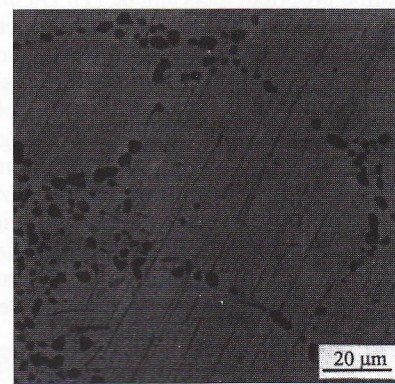
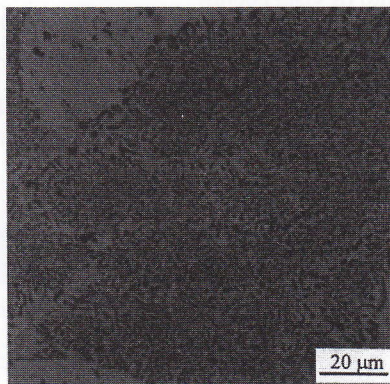
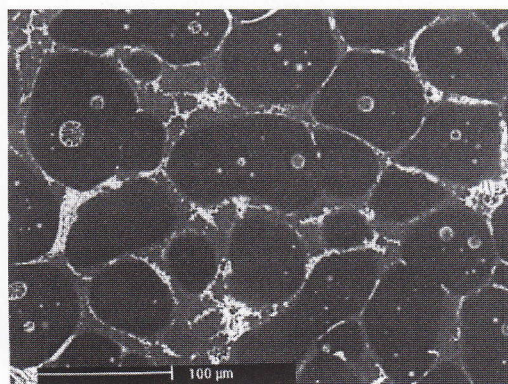


Fig. 1. Struttura del campione tixofornato: a) struttura globulare e b) particolare della zona eutettica.

Fig. 1. Thixocast microstructure: a) globular structure and b) eutectic zone.

Fig. 2. Struttura del campione solubilizzato a 500°C-4h.

Fig. 2. Solution treated sample (500°C-4h).

do) circondati da una zona eutettica (liquida in regime semi-solido). Nel sistema ternario Al-6Si-3Cu, l'eutettico è costituito da particelle di Si e di Al<sub>2</sub>Cu in una matrice di Al. La forma di questi costituenti è allungata e irregolare come in una tipica struttura eutettica. Ad ingrandimenti più elevati si può notare che una parte di eutettico rimane intrappolata anche dentro i globuli. L'analisi EDS rivela che la composizione dei globuli consiste principalmente di Al con solo l'1% di Cu, in quanto la maggior parte degli elementi si concentrano nella zona eutettica.

Durante il trattamento di solubilizzazione a 500°C avvengono alcune trasformazioni fisiche. In primo luogo la sferoidizzazione e coalescenza delle particelle di Si e la coalescenza di particelle contenenti il Cu. Infatti 500°C rappresenta una temperatura alla quale non tutta la fase Al<sub>2</sub>Cu è andata in soluzione solida in quanto in questo sistema la temperatura di solubilizzazione è leggermente superiore (all'incirca 506°C) [4], per cui dopo il trattamento di solubilizzazione la si nota ancora di dimensioni maggiori (0.3-0.5µm) ma con una densità molto inferiore. Per quanto riguarda le particelle di Si, esse raggiungono dimensioni di 3-4µm di diametro (fig. 2). Una dimostrazione della evoluzione delle particelle di Si si può ottenere osservando l'evoluzione dei globuli solidi. La fig. 3 riporta la statistica delle dimensioni dei globuli solidi in funzione del tempo di solubilizzazione partendo dalla condizione iniziale, e cioè il campione tixofornato. Si può notare come il diametro medio dei globuli aumenti con il tempo di solubilizzazione, a causa dell'accrescimento e coalescenza delle particelle di Si che si trovano nella zona eutettica. Nel campione solubi-

lizzato si trovano anche altri tipi di particelle contenenti Fe che sono Al<sub>5</sub>FeSi di forma irregolare (5µm) e AlFeSiCu (15µm) di forma allungata. Dopo solubilizzazione, la quantità di Cu presente dentro i globuli è salita al 5%. Le fasi contenenti Fe e cioè basate su AlFeSi possono essere di tipologie differenti in funzione della esatta composizione della lega e sono di solito responsabili dell'impovertimento delle proprietà meccaniche [5].

La fase β, nominalmente Al<sub>5</sub>FeSi è la più dannosa e appare come aghetti nella struttura. L'aggiunta di Mn è utile per ridimensionare la morfologia delle particelle e quindi migliorare la colabilità e le proprietà meccaniche. Il rapporto Mn:Fe maggiormente favorevole e più frequentemente usato è 1:2.

La fig. 4 rappresenta la variazione della durezza e della conducibilità elettrica durante il trattamento di solubilizzazione. La durezza raggiunge un minimo dopo circa un'ora di trattamento a causa della coalescenza delle particelle di Si. Il seguente aumento è attribuito alla presenza in soluzione solida di elementi ad elevata solubilità come il Cu, Mg e anche parzialmente il Si ad elevate temperature. Dopo 4 h la durezza si assesta su valori costanti comparabili con quello iniziale. Un andamento speculare è illustrato dalla variazione della conducibilità elettrica che conferma i meccanismi sopra citati.

Dopo il trattamento di solubilizzazione, i campioni sono stati invecchiati sia naturalmente che artificialmente a diverse temperature, come illustrato in fig. 5. Le curve di durezza mostrano il classico comportamento con la presenza di un picco di durezza che varia sia con il tempo che con la temperatura di invecchiamento. In particolare a 220°C, il picco è raggiunto dopo 60 min, mentre a T ambiente la durezza continua ad aumentare nei tempi considerati. A 200°C, il sovrainvecchiamento inizia dopo 240 min, mentre a 170°C dopo circa 24h. Il sostanziale rafforzamento che si nota, dalle curve di durezza, anche a T ambiente è dovuto alla precipitazione di Al<sub>2</sub>Cu e Mg<sub>2</sub>Si presenti nelle loro forme metastabili e stabili a temperature e tempi diversi. L'aumento di conducibilità elettrica durante l'invecchiamento, anche dopo il raggiungimento del picco di durezza, può indicare che lo stadio della coalescenza dei precipitati non è ancora iniziato, mentre è ancora attiva la fase di crescita dei precipitati con del soluto rimasto ancora in soluzione solida. La conducibilità elettrica a T ambiente rimane costante nel tempo anche se la durezza aumenta, perché la misura è insensibile alla iniziale formazione delle zone di Guinier-Preston. Si nota un aumento per tempi superiori a 24h.

Per quanto concerne l'invecchiamento nella condizione T5 e cioè senza solubilizzazione, è interessante notare che non sussistono differenze sostanziali nei valori di picco delle durezza rispetto al trattamento T6, ma si nota un ritardo nelle cinetiche di precipitazione, specialmente alle temperature più basse di invecchiamento e cioè 170°C tra quelle considerate. La mi-

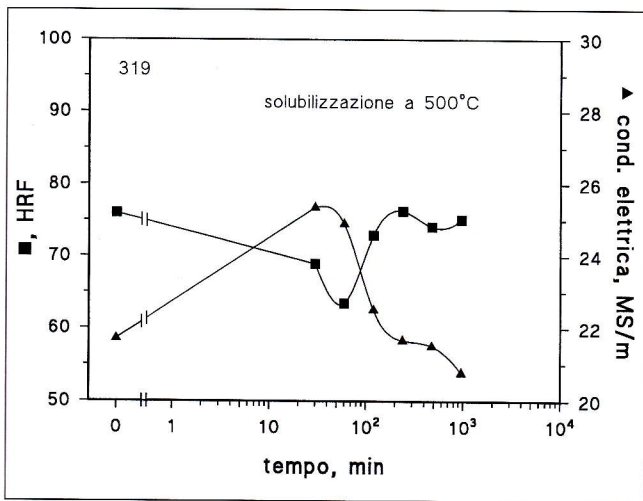


Fig. 4. Variazione della durezza e conducibilità elettrica a 500°C.

Fig. 4. Hardness and electrical conductivity during exposure at 500°C.

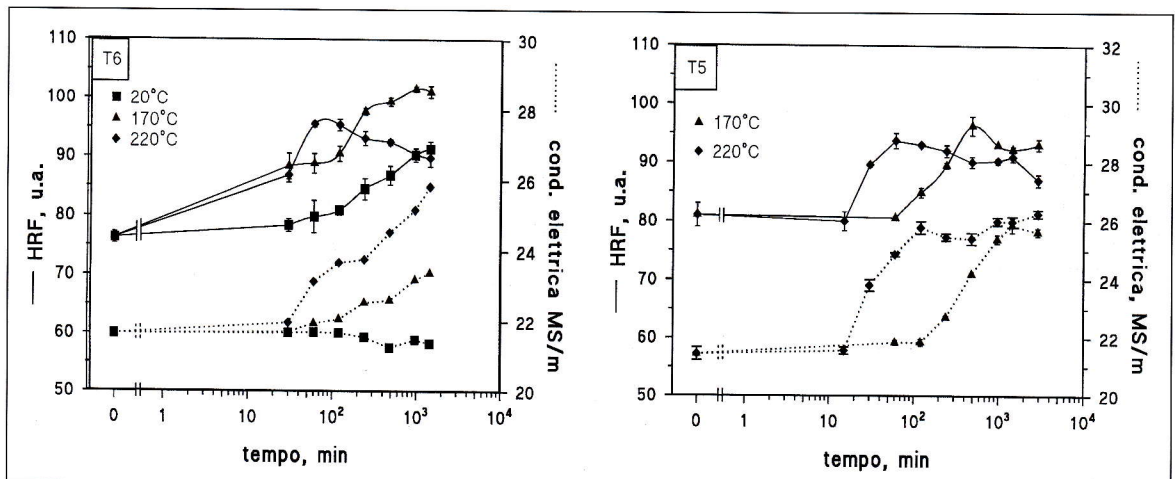


Fig. 5. Curve di invecchiamento in condizione T6 e T5.

Fig. 5. Ageing curves after T5 and T6 conditions.

nor quantità di atomi in soluzione solida disponibili per la precipitazione comporta il raggiungimento di un plateau di conducibilità elettrica in tempi inferiori rispetto alle stesse condizioni del T6.

**Comportamento meccanico a trazione**

Lo studio della risposta a trazione della lega 319 tixofornata è stato eseguito a temperatura ambiente su campioni che avevano subito un trattamento di tipo T6 o T5 ed i risultati sono riportati in fig. 6. I punti iniziali in ogni grafico rappresentano le proprietà del campione solubilizzato nel caso di un T6 o le proprietà del campione tixofornato nel caso del T5. Per i campioni trattati T6 a 170°C, si nota che le resistenze a rottura e a snervamento aumentano con il tempo di invecchiamento, mentre a 220°C diminuiscono dopo un'ora d invecchiamento. Per quanto concerne l'allungamento a trazione, a 170°C si ha una continua diminuzione con il tempo di invecchiamento, mentre alla T più elevata, la duttilità aumenta dopo aver raggiunto un minimo per un'ora di invecchiamento. Il campione solubilizzato raggiunge valori di duttilità più elevati degli altri, ma vanta i valori di resistenza minori.

Nella condizione T5, i campioni raggiungono valori di resistenza leggermente inferiori rispetto a quelli invecchiati in condizioni analoghe al T6, mentre l'allungamento è paragonabile dopo invecchiamento a 220°C e per alcuni tempi a 170°C.

La fig. 6c illustra la variazione della resistenza della lega in funzione dell'allungamento a rottura. Il comportamento dei campioni invecchiati secondo il T6 è alquanto differente dai T5. Infatti, la resistenza diminuisce con l'aumentare della duttilità nel caso dei T6 per entrambe le temperature di invecchiamento, mentre nel caso dei T5 a 220°C rimane costante e a 170°C il comportamento risulta alquanto irregolare. Questo comportamento è da mettere in relazione con la microstruttura che controlla il meccanismo di frattura. Nei

campioni che contengono il Si eutettico infatti, la rottura inizia con la frattura delle particelle di Si eutettico o altre fasi intermetalliche come Al<sub>2</sub>Cu e fasi contenenti il Fe [6]. Inoltre, i microcostituenti delle condizioni T6 hanno subito un processo di accrescimento e sferoidizzazione durante la solubilizzazione, mentre i campioni T5 contengono ancora le strutture eutettiche di forma allungata ed irregolare della regione che si era liquefatta.

Se si considera la resistenza allo snervamento in funzione dell'allungamento a rottura, si nota una continua diminuzione all'aumentare della duttilità, a tutte le temperature di invecchiamento considerate. I valori di R<sub>0,2</sub> in condizione di T6 sono sempre più elevati delle curve relative alla condizione T5.

In fig. 7 sono illustrate le variazioni della duttilità e resistenza a trazione per tre diversi processi di formatura e cioè il semisolido, la colata in sabbia e la pressocolata. La resistenza a trazione per il semisolido risulta circa il 50% più elevata rispetto al minimo riportato negli altri due casi [2]. Un comportamento analogo è evidente anche per la duttilità per la quale risulta che nelle condizioni di formatura semisolidi i valori sono più che raddoppiati rispetto alla colata in sabbia e alla pressocolata. La condizione T6 riportata genericamente in fig. 7 si deve intendere 170°C-4h per i campioni tixofornati, mentre per gli altri metodi di formatura la letteratura considera una T di invecchiamento inferiore di circa 15-20°C.

La micrografia SEM di fig. 8 mostra la superficie di frattura del campione solubilizzato a 500°C per 4h. L'esame delle superfici di frattura eseguito anche su campioni invecchiati in condizione T6 ha dimostrato che la frattura del campione di trazione avviene sempre in corrispondenza delle particelle di Si o di particelle intermetalliche contenenti Fe. In fig. 8 si può notare che il tipo di frattura è caratterizzato dalla presenza di cavità denotando un tipo di frattura duttile. Le dimensioni delle cavità risultano comparabili con le dimensioni delle particelle di Si.

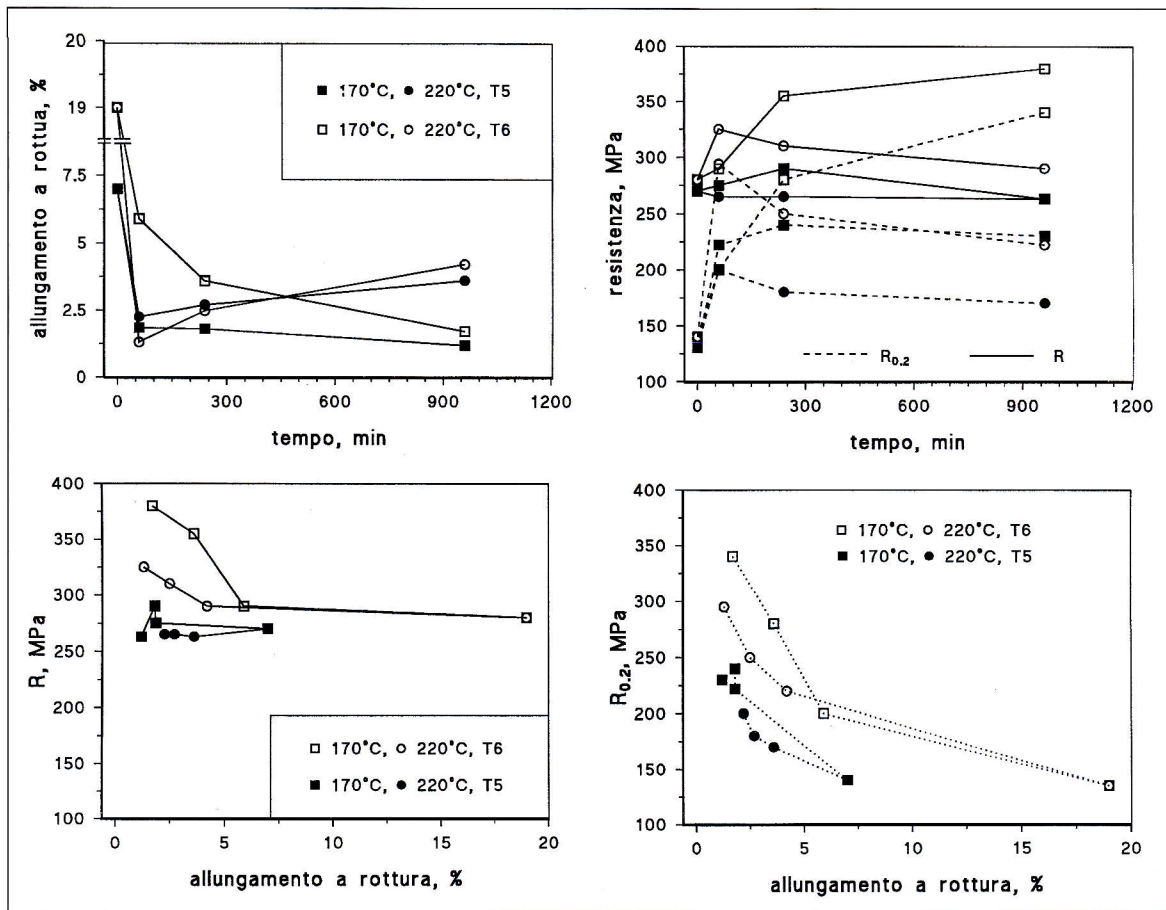


Fig. 6: proprietà meccaniche della lega 319 tixofornata.

Fig. 6: Mechanical properties of the thixocast alloy.

CONCLUSIONI

In questo lavoro è stato studiato il comportamento meccanico di un lega di alluminio (319 tixocolata) in seguito a trattamenti termici di tipo T5 e T6 e la microstruttura prodotta in seguito a tali trattamenti. Sono state eseguite prove di trazione, di durezza e misure di conducibilità elettrica per seguire la precipitazione. Le osservazioni al microscopio ottico e al microscopio elettronico a scansione hanno permesso di evidenziare la struttura formata in seguito ai trattamenti termici. Le conclusioni si possono così riassumere:

- il trattamento T5 consente di ottenere dei risultati soddisfacenti per la duttilità, anche se la condizione di maggiore allungamento rimane quella del campione solubilizzato, mentre la resistenza a trazione è sempre leggermente inferiore ai valori riportati per la condizione T6.

- La frattura dei campioni sottoposti a trazione si sviluppa sempre nella zona eutettica ricca di particelle di Si, indipendentemente dal tipo di trattamento termico. In particolare, le particelle di Si si rompono perpendicolarmente all'asse di trazione e non si nota decoesione all'interfaccia.

In generale si può affermare che la lega 319 prodotta per tixocolata presenta delle buone proprietà meccaniche se paragonata a leghe dello stesso tipo prodotte con tecniche convenzionali.

BIBLIOGRAFIA

- 1) M. GARAT, W. LOUE', Alluminio Al, September (1997), pp.83-88
- 2) DAVIS, J. R., "ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys". ASM International, Materials Park, Ohio, (1993)
- 3) BROOKS, C. R., "Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys", American Society for Metals, Metals Park, Ohio, (1982).
- 4) SAMUEL A, SAMUEL F., Journal of Material Science 30, 1995
- 5) A.M. SAMUEL, F.H. SAMUEL, H.W. DOTY, Journal of Materials Science 31, (1996), pp.5529-5539
- 6) A.M.SAMUEL AND F.H.SAMUEL, Metall. and Mat. Trans. 26A, 1995, 2359-2372

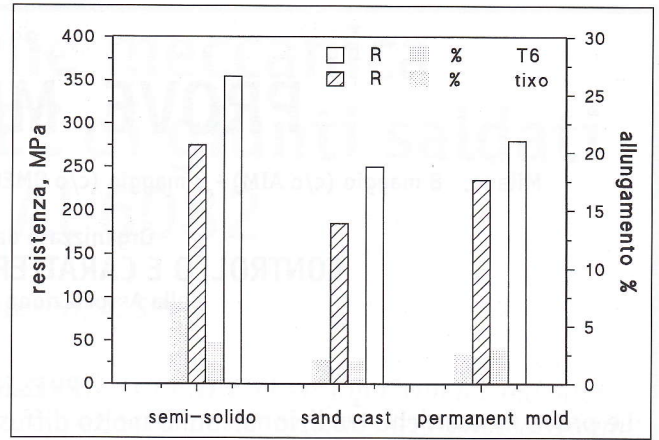


Fig. 7. Variazione della duttilità e resistenza a trazione con i processi di formatura per la lega 319.

Fig. 7. Strength and ductility variation as a function of forming processes for the 319 alloy.

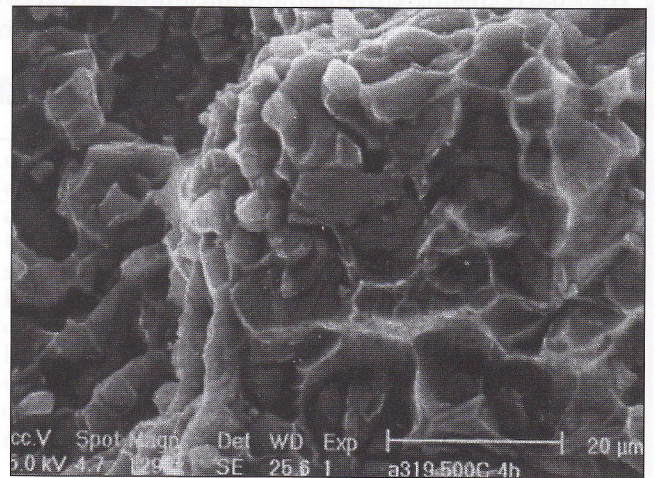


Fig. 8. Frattografia del campione solubilizzato.

Fig. 8. Fractography of the solution treated sample.

A B S T R A C T

EFFECT OF T5 AND T6 HEAT TREATMENTS ON COLD DEFORMATION OF A THIXOCAST ALUMINIUM ALLOY

Among cast aluminium alloys, 319 ranks as one of the commercially important alloys used in automotive applications, on account of its excellent casting characteristics and good mechanical properties [1,2,3]. For these reasons, the 319 is one of the candidate alloys to perform the shaping of aluminium alloys in the semisolid state or thixocasting. In fact a thixotropic aluminium alloy presents some advantages with respect to a 100% melted alloy: a much higher viscosity, permitting the injection of the material at relatively high speed, a lower thermal content and less contraction during solidification [1].

The use of this alloy is mainly justified by the search for maximum hardening obtained with T6 (at 160°C) or for stabilisation for the purposes of operation at high temperatures (220°C). In principle, under-ageing is not recommended as it results in a high sensitivity to stress corrosion. The T5 treatment is of particular interest in the case of thixocasting: the very high solidification rate leads to both a fine structure and a high Mg (and possibly Cu) content in solution in the as-cast state. This enable a simple ageing process to combine both high resistance and high ductility, avoiding the in-

convenience and costs associated with solutionizing [1]. The aim of this work was to test the mechanical behaviour of 319-thixocast alloy after different heat treatments and compare the results with cast alloy properties.

A study of the microstructure evolution during solution treatment is illustrated in figs. 1-3. A spheroidisation of Si particles is the main structural change during exposure at high temperature, together with a redistribution of the solute elements from the eutectic to the globule [4-6]. Hardness and electrical conductivity measurements have been performed on aged samples to follow the precipitation process (fig. 4-5). Hardness measurements revealed a delay in precipitation starting in T5 with respect to T6 due to the lack of supersaturation. After ageing, samples were prepared for tensile test at room temperature and the effect of thermal treatment on mechanical properties has been studied (fig. 6 and 7). T5 ageing treatment gives satisfactory results for elongation because the ductility values are comparable with the results from T6, while the UTS values are slightly lower. From this point of view T5 is preferable to T6 because of time and cost saving. The thixocast 319 alloy has definitively good mechanical properties compared to the 319 alloy produced by other casting techniques (fig. 7). Fig. 8 is a fractography of the solution sample showing the ductile-like behaviour of this specimen.