

## Effetto della velocità di raffreddamento dopo solubilizzazione nei trattamenti termici T6 e T7 sulle proprietà meccaniche della lega EN AC-42000

D. Cico, E. Gianotti

Lo scopo di questo lavoro è evidenziare l'influenza della velocità di raffreddamento della lega EN AC-42000 durante la fase di spegnimento successivo alla solubilizzazione ed invecchiamento come prevista nei processi denominati T6 (Solubilizzazione ed invecchiamento artificiale) e T7 (Solubilizzazione e sovra-invecchiamento) e la conseguente caratterizzazione dello stato metallurgico ottenuto mediante prove meccaniche, prove di durezza Brinell, prova di trazione uniaassiale, analisi micrografica ed analisi della frattura mediante microscopia elettronica a scansione. Sono state prese in considerazione le seguenti procedure di spegnimento dopo tempra di solubilizzazione:

- . raffreddamento in aria forzata
- . raffreddamento in acqua nebulizzata (doccia)
- . spegnimento in acqua

**PAROLE CHIAVE:** TRATTAMENTO TERMICO - PROPRIETÀ MECCANICHE - MICROSTRUTTURA

### INTRODUZIONE

Le leghe di alluminio hanno visto negli ultimi anni un forte incremento nell'utilizzo in campo automobilistico per l'eccellente resistenza rapportata al peso dei manufatti prodotti. Difatti, una delle principali sfide nel campo automotive è l'alleggerimento del veicolo in virtù dell'impatto ambientale delle autovetture. I materiali leggeri, ed in particolare l'alluminio, offrono la possibilità concreta di venire incontro alle richieste di vetture più leggere che comportano di conseguenza minori consumi di combustibile e, quindi, minore immissione di gas combustibili nell'atmosfera. Le leghe fonderia tra cui per esempio le Al-Si (e derivate Al-Si-Mg) scelte per la loro eccellente colabilità, sono fabbricate tramite diversi processi di colata, tra i quali quello in conchiglia oppure sotto pressione. Successivamente tali leghe sono sottoposte a trattamento termico per massimizzare le proprietà meccaniche ottenibili. Il tutto viene effettuato attraverso un indurimento per solubilizzazione e precipitazione. Il trattamento di solubilizzazione mira ad ottenere una microstruttura il più omogenea possibile, solubilizzando tutti gli elementi di lega (soluto) all'interno della matrice, ed il successivo invecchiamento induce i precipitati per nucleazione ed accrescimento, al fine di ottenere un indurimento per precipitazione.

### CARATTERIZZAZIONE DEL MATERIALE DI PARTENZA



**Fig. 1** – Sample size used for the heat treatment tests: 50x70x30 mm

**D. Cico, E. Gianotti**

TRATTAMENTI TERMICI FERIOLI & GIANOTTI  
S.p.A, Via Asti 80, 10098, Cascine Vica (TO)

# Heat treatments & coatings

Per questo lavoro abbiamo utilizzato una lega da fonderia EN-AC 42000. Le leghe alluminio silicio forniscono una buona combinazione di colabilità e proprietà meccaniche. Per tale motivo sono utilizzate ampiamente nell'industria automobilistica e aerospaziale. L'aggiunta del silicio è importante per aumentarne la fluidità e quindi la colabilità del materiale. Nelle

leghe al Magnesio, quest'ultimo, a seguito dei trattamenti T6 e T7, conferisce una elevata resistenza meccanica, sufficiente duttilità ed una buona resistenza alla corrosione.

In prima fase si è analizzata la composizione chimica della lega mediante tecnica O.E.S. (Optical Emission Spectroscopy).

**Tab. 1** – Composizione chimica della lega utilizzata / *Chemical composition of the alloy*

Fe	Si	Mn	Ni	Ti	Cu	Pb	Mg	Zn	Sn
0.14	6.97	0.007	0.012	0.13	0.002	0.002	0.323	0.004	0.002

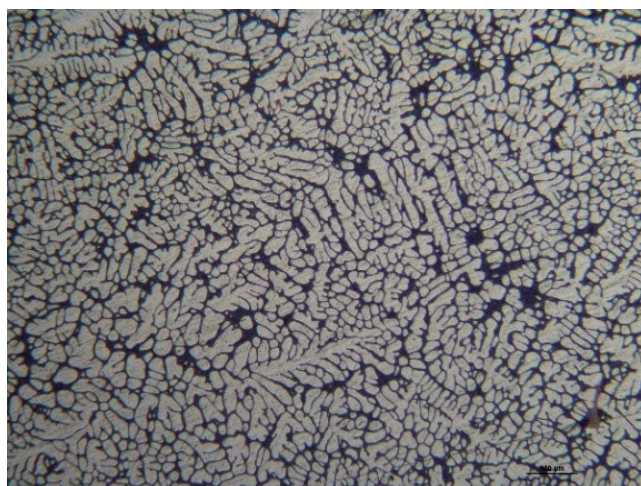
Le proprietà meccaniche dei getti sono strettamente legate alla microstruttura del materiale che è determinata da composizione chimica e condizioni di colata del getto.

È quindi importante valutare i parametri strutturali del getto di partenza.

Abbiamo eseguito una misura preliminare dello SDAS (secondary dendrite arm spacing), distanza tra i rami dendritici secondari ben individuabili nella fase primaria  $\alpha$ -alluminio dei getti. Il valore dello SDAS è strettamente correlato al tempo di solidificazione, ovvero al diminuire del tempo di solidificazione si

ha una diminuzione dello SDAS e quindi una struttura più fine. Lo SDAS medio misurato sui campioni in esame è stato rilevato intorno ai 20-25 micron.

La qualità delle proprietà ottenute dal trattamento termico sono strettamente legate alla qualità della fusione del materiale di partenza è quindi importante valutarne la presenza di difetti. Durante l'analisi del materiale di partenza non sono state rilevati particolari difetti all'interno del getto (cavità ritiro, microporosità da gas o presenza di fasi indesiderate) [5].



**Fig. 2** – Microstruttura della lega allo stato di colata. Per valutazione SDAS e individuazione eventuali difetti / *Microstructure of the alloy in the as-cast state. For SDAS evaluation and identification of possible defects.*

## Trattamento termico

Per valutare l'effetto della velocità di spegnimento dopo solubilizzazione sono stati eseguiti dei trattamenti T6 (tempra di solubilizzazione ed invecchiamento artificiale) e T7 (tempra di solubilizzazione e sovra-invecchiamento) per valutare le differenze riguardanti le proprietà meccaniche. Per le prove di trattamento è stato utilizzato un forno continuo di classe 4 con uniformità di  $\pm 10^\circ\text{C}$  dotato di tre sistemi per il raffreddamento dopo solubilizzazione (tempra in acqua, sistema di doccia mediante

acqua nebulizzata, sistema di raffreddamento in aria forzata.). In seguito alla solubilizzazione i particolari vengono trasportati automaticamente nella camera di preriscaldamento del forno di invecchiamento in classe 2 uniformità di  $\pm 6^\circ\text{C}$ . Il trattamento eseguito sui campioni è composto da un primo processo di solubilizzazione  $530^\circ\text{C}$  per 8 h seguito da invecchiamento artificiale di  $160^\circ\text{C}$  per 5 ore (trattamento T6) e invecchiamento di  $230^\circ\text{C}$  per 5 ore (trattamento T7).

## Trattamento di tempra di solubilizzazione

La tempra consiste in un raffreddamento rapido della lega da una temperatura determinata fino alla temperatura ambiente. La temperatura di solubilizzazione viene scelta al gradiente ottimale per solubilizzare la massima parte possibile dell'elemento indurente. L'obiettivo di tale trattamento è massimizzare il tenore in soluzione degli elementi di lega il cui trattamento successivo di invecchiamento farà precipitare finemente all'interno della matrice di alluminio. La permanenza alla temperatura di solubilizzazione deve essere sufficientemente lunga da permettere di solubilizzare la totalità degli elementi in lega. Tale parametro deve tenere conto del tipo di lega e delle fasi di processo precedenti di fabbricazione quali fusione, pressofusione, lavorazione plastica e dimensione dei pezzi [6] [2].

## Invecchiamento artificiale

Il processo di invecchiamento artificiale consiste nel mantenimento di una lega allo stato di soprassaturazione ad una certa temperatura tale da indurre precipitazione critica dei componenti solubilizzati. L'indurimento avviene secondo le seguenti fasi: 1) formazione agglomerati atomici di soluto detti "zone GP (Guiner e Preston), 2) formazione di agglomerati più densi e precipitati stabili indurenti a partire dalle zone GP, 3) generazione a partire dalla fase precedente di un precipitato semi coerente con la matrice di alluminio che per fenomeno microstrutturale di rafforzamento produce durezza e l'aumento delle caratteristiche meccaniche. Il prolungamento eccessivo di que-

sto processo incide sulle dimensioni dei precipitati in modo tale da produrre un decadimento dell'effetto di indurimento [2]. Il massimo dell'indurimento viene quindi ottenuto quando la concentrazione di zone di GP e precipitati fini in dispersione critica per unità di volume è massima. Ciò avviene per effetto dei movimenti delle dislocazioni esercitato da tali disomogeneità. In conclusione l'indurimento dovuto al processo di invecchiamento di una lega soprassatura è una conseguenza di fenomeni di riprecipitazione di composti caratterizzati da proprietà indurenti in ragione della propria natura e della possibilità di precipitare con le modalità descritte in precedenza. Anche variazioni piccole dei componenti di alligazione possono indurre a non lievi variazioni sull'andamento delle curve relative alle caratteristiche fisico meccaniche ottenibili [2] [4].

Le leghe nello stato metallurgico T7 sono definite sovra invecchiate. Tale trattamento viene utilizzato nei casi in cui risulta particolarmente critica la stabilità dimensionale e termodinamica soprattutto per particolari operanti ad alte temperature e per minimizzare eventuali stress residui e quindi ottimizzare le lavorazioni meccaniche successive e diminuire l'ingrassamento del componente [7]. Il controllo dei trattamenti termici è avvenuto mediante l'inserimento di termocouple annegate all'interno dei quattro campioni sistemati ai vertici ed al centro del "Rack" sottoposto al trattamento termico. Le velocità di tempra misurate risultano di 8 minuti per raffreddamento in aria forzata (Fig.3), 1' 04" per acqua nebulizzata (Fig.4) e 13" per lo spegnimento in acqua (Fig.5).

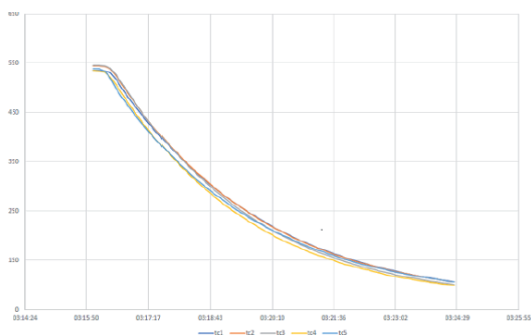


Fig.3 Velocità di raffreddamento dei campioni sottoposti a spegnimento in aria forzata

Fig. 3 Cooling rate of samples subjected to forced air quench

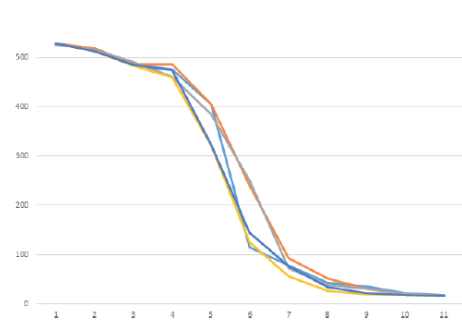


Fig.4 Velocità di raffreddamento dei campioni sottoposti a spegnimento doccia

Fig. 4 Cooling rate of samples subjected to nebulized water quench

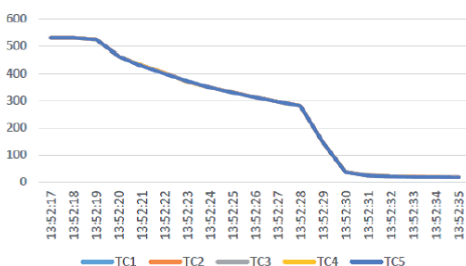


Fig.5 Velocità di raffreddamento dei campioni sottoposti a spegnimento in acqua

Fig. 5 Cooling rate of samples subjected to water quench

## Velocità di raffreddamento

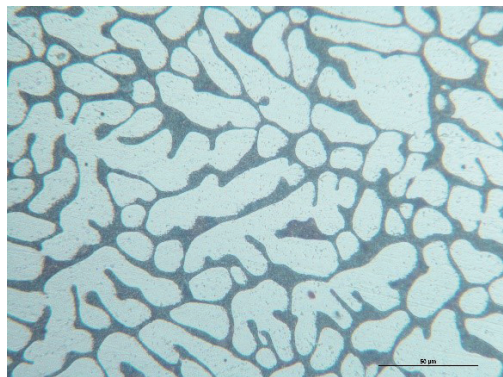
Nello svolgimento della tempra di solubilizzazione la velocità di raffreddamento gioca un ruolo fondamentale nell'ottenere una soluzione solida soprassatura senza inizio di precipitazione. Tale velocità è detta velocità critica di tempra. In funzione del metodo di spegnimento si possono sottoporre i particolari a diverse "drasticità di tempra"; la tempra mediante immersione in liquido risulta il metodo più efficiente per la dissipazione del calore accumulato, mentre si ottengono raffreddamenti più lenti con il metodo di aria forzata. In questo caso il particolare è sottoposto all'azione di un sistema di corrente d'aria che dissipa il calore per conduzione. Con quest'ultimo sistema si realizza un gradiente termico di raffreddamento modesto rispetto a quello ottenibile con tempra in liquido permettendo quindi di realizzare una tempra meno drastica. Un metodo intermedio ai due precedenti consiste nel raffreddare i pezzi estratti dal forno mediante nebulizzazione di acqua (fog quenches)[4].

La drasticità di tempra più elevata è la condizione migliore per trattenere la massima parte di costituenti attivi, conferendo così ottime proprietà meccaniche e resistenza a corrosione. Tuttavia può indurre ad elevati stati tensionali e deformazioni

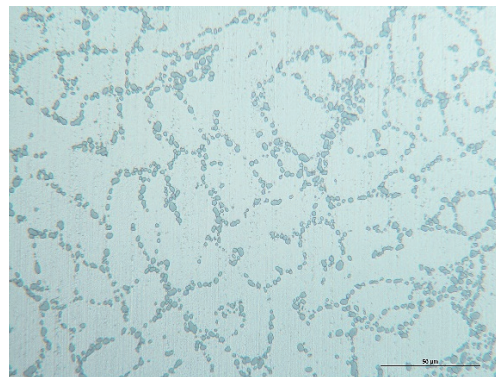
per le quali le procedure di recupero risultano a volte molto costose, quando e se applicabili. Le tensioni che si generano nelle leghe di alluminio sono esaltate dalla diversa velocità di raffreddamento tra superficie ed il cuore, fra sezioni di spessore diverso nello stesso pezzo e dal decadimento delle caratteristiche di plasticità del materiale man mano che la temperatura diminuisce [2].

## Caratterizzazione del materiale dopo trattamento termico

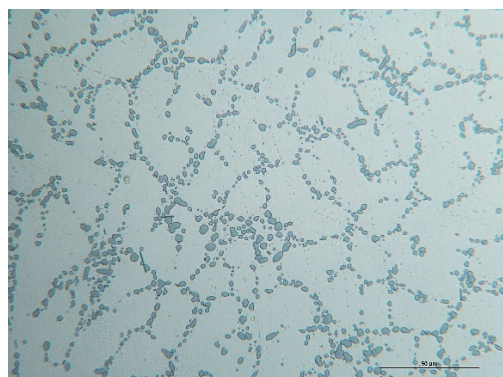
A eseguiti dei trattamenti termici eseguiti con tempre di solubilizzazione diverse si è proceduto alla verifica e comparazione dei diversi stati metallurgici della medesima lega. La microstruttura è stata riscontrata composta da  $\alpha$ -Alluminio ed eutettico alluminio-silicio. La distribuzione dell'eutettico alluminio-silicio risulta globulare ed uniforme per i tre casi. La verifica dei fenomeni di riprecipitazione viene solitamente condotta per via indiretta, mediante prove meccaniche a causa delle dimensioni dei precipitati fini responsabili dei fenomeni di invecchiamento che vanno ben al di sotto del limite risolutivo imposto dai sistemi ottici utilizzati nella metallografia ottica classica [4].



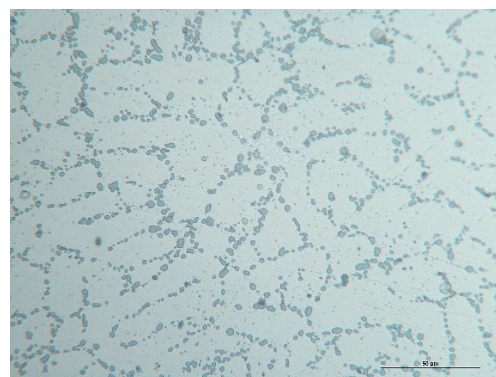
**Fig. 6** – Microstruttura del campione nello stato di colata / *Microstructure of the alloy in the as-cast state.*



**Fig. 7** – Microstruttura del campione dopo trattamento T6 (con spegnimento in doccia) / *Microstructure of the sample after T6 treatment (with nebulized water cooling after solubilization)*



**Fig. 8** – Microstruttura del campione dopo trattamento T6 (con spegnimento acqua) / *Microstructure of the sample after T6 treatment (with cooling in water tank after solubilization)*



**Fig. 9** – Microstruttura del campione dopo trattamento T6 (con spegnimento in aria forzata) / *Microstructure of the sample after T6 treatment (with colling in forced air system)*

# Trattamenti termici e rivestimenti

**Tab. 2** – Prove di trazione eseguite sui provini sottoposti a trattamento termico (T6 / T7) al variare del metodo di raffreddamento dopo solubilizzazione / *Tensile tests performed on specimens subjected to heat treatment (T6 / T7) as the cooling method varies after solubilization.*

Campioni (stato T6)	Rm	Rp 0,2	A%
Spegnimento in acqua	325	253	13.8
Spegnimento doccia	260	162	16.5
Spegnimento aria forza	244	156	14.3

Campioni (stato T7)	Rm	Rp 0,2	A%
Spegnimento in acqua	233	183	15.2
Spegnimento doccia	221	170	14.6
Spegnimento aria forza	219	170	13.8

**Tab. 3** – Prove di trazione eseguite sui provini sottoposti a trattamento termico (T6 / T7) al variare del metodo di raffreddamento dopo solubilizzazione / *Tensile tests performed on specimens subjected to heat treatment (T6 / T7) as the cooling method varies after solubilization.*

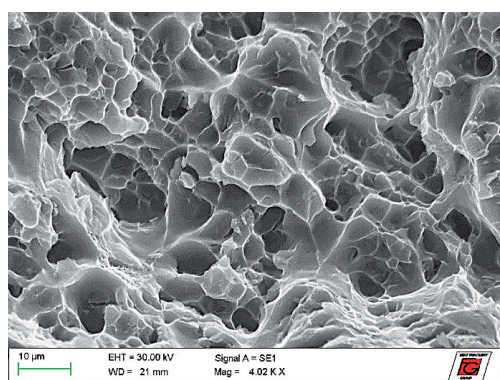
Campioni (stato T6)	HBW
Spegnimento in acqua	103-105
Spegnimento doccia	79-81
Spegnimento aria forza	76-77

Campioni (stato T7)	HBW
Spegnimento in acqua	73-76
Spegnimento doccia	71-74
Spegnimento aria forza	70-73

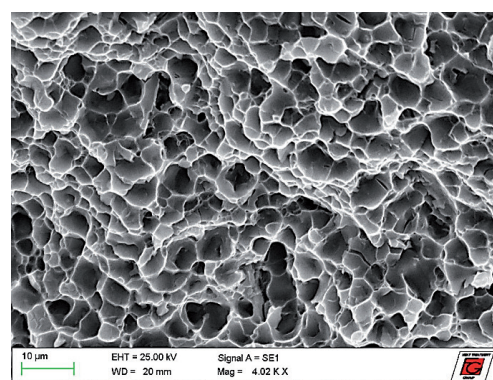
## Morfologia di frattura mediante Microscopio elettronico a scansione SEM (presso Laboratorio metallurgico TT Ferioli Gianotti SpA)

Abbiamo osservato la superficie di frattura di due provini dopo le prove meccaniche di trazione mediante microscopio elettronico a scansione per valutare la morfologia della frattura e valutarne eventualmente le differenze. Entrambi i provini sotto-

posti all'esame presentano una morfologia di tipo misto (Brittle ductile - cellular fracture) ovvero presentano simultaneamente elementi tipici sia del clivaggio sia della frattura plastica. Questo tipo di frattura è tipico delle leghe leggere soggette a modifica allo stato solido o trattate termicamente. La morfologia a frattura di tali leghe è fortemente influenzata dalla frazione in volume, dalla distribuzione e forma del silicio [3].



**Fig. 10** – Superficie di frattura campione sottoposto a prova di trazione (trattamento T6 spegnimento in acqua) / *Surface fracture of sample subjected to tensile testing (after treatment T6 water cooling).*



**Fig. 11** – Superficie di frattura campione sottoposto a prova di trazione (trattamento T6 spegnimento in aria forzata) / *Surface fracture of sample subjected to tensile test (after treatment T6 forced air cooling).*

## Tensioni residue

Sono state effettuate delle analisi per valutare le tensioni residue dei campioni dopo trattamento termico mediante tecniche non distruttive di diffrazione a raggi X (XRD). La tecnica si basa sul principio secondo il quale un metallo presenterà una distorsione del reticolo cristallino se sottoposto ad uno sforzo. La valutazione viene elaborata sfruttando la misura degli angoli di diffrazione e l'ampiezza del picco di diffrazione che permettono la valutazione delle tensioni residue. Le tensioni residue rilevate risultano in trazione di 7 MPa per il campione con spegnimento in acqua e 5 MPa per campione con spegnimento in aria forzata.

## Conclusioni

La tempra in acqua ha presentato migliori caratteristiche meccaniche sui particolari sottoposti a trattamento termico, ma può presentare controindicazioni riguardo le tensioni residue

interne e le distorsioni nel caso di geometrie complesse. I metodi di spegnimento in acqua nebulizzata oppure aria forzata producono proprietà meccaniche meno brillanti ma con minor rischio di rotture o tensionamenti del materiale. Riassumendo, è importante quindi conoscere la qualità strutturale del materiale di partenza in termini di difetti e finezza della microstruttura e valutare il metodo di spegnimento opportuno durante il T6 - T7 in funzione della geometria e lo spessore del particolare. Tale accorgimento è necessario per ottenere il miglior compromesso possibile tra caratteristiche meccaniche/stabilità alla corrosione ed eventuali variazioni dimensionali.

Possiamo quindi concludere che la scelta del trattamento T6 - T7 con diverse opportunità di velocità di raffreddamento a seguito della solubilizzazione è subordinata alla complessità della figura della fusione, ai rischi di deformazione ed alle tensioni residue a seconda della criticità del componente costruito in lega di alluminio.

## BIBLIOGRAFIA

- 1] Veschi D. L'alluminio e le leghe leggere, Milano, 2014, 51-58 p.
- 2] Cabibbo M. Leghe e metalli non ferrosi, 2016, 67-74 p.
- 3] Warmuzek M. Aluminium Silicon Casting Alloys. Atlas of Microfractographs, ASM International, 2004 16-126 p.
- 4] Panseri C. Manuale di fonderia dell'alluminio III Ed, Milano, 1996, 158-184 p.
- 5] Donnini R, Montanari R, Vedani M. Tenacità e resistenza a fatica delle leghe metalliche, AIM, 2011, 285-301 p.
- 6] Gianotti E. Alluminio e le sue leghe, Classificazione e trattamenti termici, 2006 Torino, Available from: <https://www.gianottielio.it/pubblicazioni-59910.php.html>
- 7] AA.VV. ASM Handbook, Volume 4 Heat Treating, ASM International, 1991, 1923-1924 p.

# Effect of the cooling rate after solubilization in the T6 and T7 heat treatments on the mechanical properties of the EN AC-42000 alloy

The aim of this work is to highlight the influence of the cooling speed on the EN AC-42000 alloy after the execution of the T6 treatments (solubilization and artificial aging) and T7 (solubilization, and artificial over-aging) and the subsequent characterization of the metallurgical state obtained by means of mechanical tests: Brinell hardness tests, uniaxial traction test, micrographic analysis and fracture's analysis with scanning electron microscopy on the tensile test specimen following uniaxial traction test. The following procedures of cooling rate after solution quench have been taken into consideration: forced air, nebulized water (shower), and in water tank quench.

**KEYWORDS:** HEAT TREATMENT – MECHANICAL PROPERTIES – MICROSTRUCTURE