

Trattamento termico della lega EN AC-42100 all'interno di forni industriali: effetto dei parametri di trattamento sulle proprietà meccaniche

M. Merlin, E. Baroni, A. Fortini, C. Soffritti, F. Feggi

In fonderia, la lega di alluminio EN AC-42100 è quella maggiormente utilizzata per i processi di colata in conchiglia o bassa pressione in virtù dell'ottimo compromesso tra colabilità e proprietà finali dei getti. Le proprietà meccaniche di getti per impiego strutturale possono essere ottimizzate sia attraverso specifici trattamenti della lega liquida preliminari alle fasi di colata sia tramite trattamenti termici eseguiti sui getti a valle del processo stesso di colata. L'obiettivo ultimo è poter garantire al cliente finale la combinazione ottimale di proprietà meccaniche definita sulla base di specifiche tecniche. La progettazione del ciclo di trattamento termico per nuovi componenti può presentare delle criticità ed in genere richiede una procedura iterativa per la definizione dei corretti parametri di processo. Inoltre, ogni forno ha caratteristiche tecniche e strutturali proprie, per cui eseguire lo stesso trattamento su forni di produttori differenti può fornire risultati significativamente diversi. In questa memoria sono presentati i risultati di uno studio sperimentale condotto in collaborazione con l'Azienda HTT – Heat Treatment Torri avente lo scopo di investigare la correlazione tra parametri di trattamento termico e proprietà meccaniche di getti sperimentali prodotti per gravità in conchiglia e successivamente trattati in forni industriali. In particolare, in una prima fase è stato studiato l'effetto della variazione dei tempi di solubilizzazione a parità di parametri di invecchiamento, individuando tramite prove meccaniche di trazione e durezza un tempo ideale di solubilizzazione. Nella fase successiva, mantenendo costante il tempo di solubilizzazione precedentemente individuato, sono state studiate diverse combinazioni di tempi e temperature di invecchiamento allo scopo di massimizzare sia le prestazioni sia la produttività in base a specifiche tecniche richieste a capitolato.

PAROLE CHIAVE: LEGA DI ALLUMINIO EN AC-42100, TRATTAMENTO TERMICO, PROPRIETÀ MECCANICHE, MICROSTRUTTURA

INTRODUZIONE

Le leghe di alluminio rivestono da sempre un ruolo fondamentale in svariati settori dell'industria grazie ad una serie di vantaggi che le contraddistinguono come la resistenza meccanica specifica, le elevate conduttività termica ed elettrica, la buona formabilità e la propensione al riciclo [1]. Le leghe del sistema Al-Si si prestano egregiamente ad essere utilizzate nei processi di fonderia grazie alla loro eccellente fluidità, alla ridotta tendenza alla formazione di cricche a caldo e all'azione efficace del Si nella riduzione dei ritiri in fase di solidificazione. Tra di esse, la lega ipoeutettica AlSi7Mg0.3 è una di quelle di maggior interesse nell'ambito della fonderia [2,3]. Si tratta di una lega in grado di offrire buone caratteristiche meccaniche e tecnologiche e trova largo impiego nel

M. Merlin, D. Gramigna,
E. Baroni, A. Fortini

Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara

F. Feggi

HTT Heat Treatment Torri Srl

settore automotive, principalmente per la realizzazione di telai e sospensioni con processi in sabbia, in conchiglia o in bassa pressione (LPDC). Al fine di ottimizzare le proprietà meccaniche dei getti prodotti con tale lega, risulta quasi sempre necessaria l'esecuzione di una sequenza di operazioni termiche che prevedono tempra di soluzione e successivo invecchiamento artificiale, nel complesso note come trattamento termico T6 [4]. La prima fase del trattamento consiste infatti in una solubilizzazione ad alta temperatura seguita da un rapido raffreddamento in acqua opportunamente additivata e termostata tra i 60 e i 70 °C. Nella successiva fase di invecchiamento i pezzi solubilizzati vengono nuovamente riscaldati a una temperatura fissata, sensibilmente inferiore a quella di solubilizzazione, in modo da ottenere la precipitazione fine e dispersa delle fasi intermetalliche rinforzanti. Lo scopo del trattamento di solubilizzazione è quello di mandare in soluzione solida la maggior parte delle fasi intermetalliche grossolane, specialmente quelle contenenti Mg, generatesi in fase di prima solidificazione [4]. Ciò è reso possibile solo grazie al mantenimento del materiale per tempi mediamente compresi tra le 4 e le 8 h ad una temperatura superiore ai 500 °C [2]. Durata e temperatura di solubilizzazione, secondo studi di letteratura, risultano avere inoltre un'influenza diretta sulla morfologia del Si eutettico delle leghe Al-Si e di conseguenza sulle proprietà meccaniche finali dei getti [5]. La tempra, ovvero il raffreddamento che viene eseguito al termine della permanenza alla temperatura di solubilizzazione, è la fase in cui si pone l'obiettivo di raffreddare il materiale quanto più rapidamente possibile fino a temperatura prossima a quella ambiente al fine di ottenere una soluzione solida sovrassatura [6-7]. La terza ed ultima fase di trattamento termico T6 è quella di invecchiamento eseguito artificialmente riscaldando il materiale per alcune ore generalmente oltre i 150 °C. La finalità dell'invecchiamento è quella di ottenere precipitati semi-coerenti con il reticolo della fase primaria α -Al, in modo da massimizzare le proprietà meccaniche sfruttando la precipitazione come meccanismo di rinforzo.

La gestione e l'ottimizzazione dei parametri di trattamento termico nelle fasi di solubilizzazione ed invecchiamento, al fine di ottenere l'ottimale compromesso tra le varie caratteristiche meccaniche richieste sui getti, da molti anni risulta essere questione di grande interesse scientifico ed

industriale. La temperatura di solubilizzazione, ad esempio, deve essere compresa tra i 500 ed i 550 °C: maggiore è la temperatura, maggiore è la possibilità di ottenere proprietà meccaniche migliori, ma anche quella di favorire la fusione di composti basso fondenti a bordo grano compromettendo di conseguenza l'integrità del materiale. È noto, inoltre, che anche nella fase di invecchiamento, tempo e temperatura non sono tra loro interdipendenti al fine della determinazione della condizione ottimale di indurimento della matrice. Difatti, all'aumentare della temperatura si è visto come il punto di massimo delle proprietà meccaniche (carico a snervamento e a rottura) sia raggiungibile per tempi di mantenimento inferiori, ma è altresì vero che ad uno stesso aumento corrisponde un picco di entità via via minore [8]. Tali evidenze e correlazioni, che si riscontrano in letteratura, sono tuttavia frutto di sperimentazioni condotte all'interno di forni in scala dimensionale ridotta rispetto a quelli industriali, ovvero in forni da laboratorio, trascurando così l'effetto scala dei forni industriali così come l'incidenza della massa termica delle ceste di campioni e delle eventuali dispersioni.

Il presente lavoro, frutto di una collaborazione con l'Azienda HTT – Heat Treatment Torri, si pone l'obiettivo di ottimizzare i parametri di processo nelle diverse fasi del trattamento termico T6 in forni di tipo industriale. La ricerca è stata condotta prevedendo due fasi, ovvero si è dapprima indagata l'influenza di diversi tempi di solubilizzazione a parità di temperatura sulle proprietà meccaniche di una lega di alluminio EN AC-42100, sottoposta a trattamenti di tempra e invecchiamento a parametri fissati. Una volta determinata la condizione di solubilizzazione ideale come risultato della prima fase, la seconda fase ha previsto l'individuazione dei parametri ottimali per l'esecuzione del trattamento di invecchiamento artificiale. Le diverse combinazioni di temperatura e tempo di mantenimento sono state scelte sulla base di lavori presenti in letteratura [8,9] e dell'esperienza della Azienda, ed è stata poi valutata la loro influenza sulle proprietà meccaniche e microstrutturali della lega oggetto di studio.

MATERIALI E METODI

I getti impiegati per lo studio sono stati realizzati in lega di alluminio EN AC-42100 dalla Fonderia S. Possidonio Srl (MO) per colata in conchiglia, utilizzando uno stampo in

acciaio. La lega liquida è stata sottoposta a trattamenti di affinazione e modifica mediante aggiunta rispettivamente di vergelle in lega Al5TiB1 e bacchette in lega madre Al-10%Sr. Per garantire conformità e omogeneità di composizione chimica, tutti i campioni sono stati colati dalla medesima siviera. La composizione chimica della lega è stata determinata mediante spettrometria ad emissione ottica (OES). La media e la relativa deviazione standard di n° 5

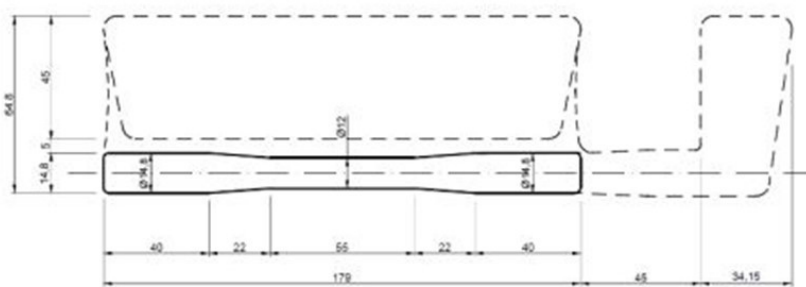
misurazioni, oltre che la composizione chimica di riferimento per la lega EN AC-42100 secondo normativa UNI EN 1706, sono riportate in Tabella 1.

Tab.1 - Composizione chimica (wt. %) della lega EN AC-42100 oggetto di studio e confronto con normativa UNI EN 1706.

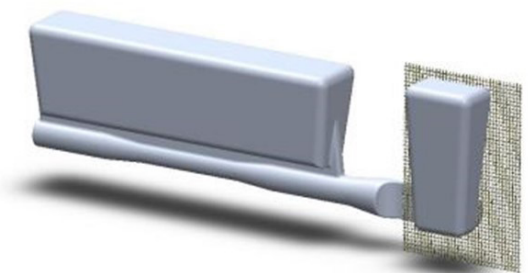
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Sr	altri	Al.
Media	6.690	0.105	0.001	0.003	0.365	0.0026	0.005	0.003	0.002	0.0005	0.117	0.026	0.0093	92.676
Dev.Std.	0.077	0.009	0.000	0.000	0.018	0.0002	0.000	0.001	0.000	0.0002	0.006	0.001	0.0011	0.062
UNI EN 1706	6.5 - 7.5	0.19	0.05	0.1	0.25 - 0.45	-	-	0.07	-	-	0.25	-	-	Rim.

I risultati evidenziano l'ottima corrispondenza tra la composizione chimica della lega in esame e quanto previsto da normativa. I tenori di Ti e di Sr sono indice dell'avvenuta esecuzione dei trattamenti, rispettivamente, di affinazione e di modifica. Con la lega così trattata sono stati colati dei getti in conchiglia, la cui geometria a

titolo esemplificativo è riportata in Figura 1 sotto forma di rappresentazione bidimensionale e tridimensione. Da ciascuno dei getti prodotti, a valle dei diversi trattamenti termici messi a punto per lo studio, è stato successivamente ricavato un provino di trazione per lavorazione meccanica.



(a)



(b)

Fig.1 - Getti in lega EN AC-42100 colati per l'attività di ricerca: a) rappresentazione 2D e b) 3D.

I trattamenti termici sono stati eseguiti dall'Azienda HTT - Heat Treatment Torri in forni industriali di diversa natura e conformazione. Per condurre i trattamenti di solubilizzazione è stato utilizzato un forno a tunnel semi-continuo costituito da n. 4 camere, di cui la prima di pretrattamento e l'ultima in cui avviene la tempra della

cesta contenente i campioni in acqua alla temperatura di 70 °C. La movimentazione da una camera all'altra è pneumatica ed è possibile solo qualora la temperatura in tutto il forno raggiunga il valore impostato e dopo il tempo di permanenza previsto. Per l'esecuzione dei trattamenti di invecchiamento è stato invece utilizzato un classico

forno di tipo batch. Al fine di garantire la corretta esecuzione dei trattamenti, mediante impiego di termocoppie e di un sistema di acquisizione e controllo sono state previste ed eseguite verifiche di uniformità di temperatura all'interno dei forni. I parametri di trattamento termico

utilizzati sono stati scelti sulla base dell'esperienza della Azienda e di lavori di letteratura basati su sperimentazioni eseguite con forni da laboratorio. Si è pertanto proceduto suddividendo l'attività sperimentale in due fasi, secondo il piano sperimentale riassunto in Tabella 2.

Tab.1 - Deviazioni massime dell'ovalità e del diametro nominale secondo lo Standard EN10060:2003 [7].

	Solubilizzazione		Invecchiamento	
	Temperatura [°C]	Durata [min]	Temperatura [°C]	Durata [min]
Fase 1	535	120	160	300
		240		
		360		
Fase 2	535	Durata ideale ottenuta come risultato dalla Fase 1	135	120
				240
				360
			160	180
				240
				360
			200	120
				180
				240

In una prima fase (Fase 1) è stata indagata l'influenza della durata del trattamento di solubilizzazione (120 min, 240 min e 360 min) a parità di temperatura (535 °C) per poi eseguire un invecchiamento standard a 160 °C per 300 min. Nella seconda fase (Fase 2) è stato invece valutato l'effetto di diverse combinazioni di durata e temperatura di invecchiamento (n. 9 in totale) su provini solubilizzati secondo i parametri ottimizzati nella Fase 1. Per ciascuna condizione indagata sono stati analizzati n. 5 getti al fine di garantire la significatività del dato, per un totale di n. 60 getti. Per garantire che le prove fossero quanto più conformi possibile alla realtà, le ceste in cui sono stati trattati i getti sono state riempite con pezzi di scarto fino ad ottenere una quantità di materiale tale da riprodurre una normale carica di un forno di trattamento ed eseguire rampe di riscaldamento e mantenimenti con una certa regolarità e riproducibilità. Dopo la tempra di soluzione delle diverse ceste, i getti sono stati estratti e conservati

alla temperatura di -18 °C per non incorrere in fenomeni di invecchiamento naturale prima dell'esecuzione dei trattamenti di invecchiamento artificiale. Una volta eseguiti tutti i trattamenti prefissati, dai getti sono ricavati per lavorazione meccanica i provini di trazione utilizzati per indagare le proprietà meccaniche della lega trattata secondo le diverse combinazioni di parametri. Le prove di trazione sono state eseguite mediante macchina QUASAR 50 (Galdabini S.p.a., Cardano al Campo (VA), Italia) con cella di carico pari a 50 kN e rispondente alla normativa UNI EN ISO 6892-1. Per il confronto tra le diverse condizioni di trattamento sono stati considerati il carico di rottura (R_m), il carico di snervamento ($R_{p0.2}$) e l'allungamento percentuale a rottura ($A\%$). Sono state inoltre effettuate prove di durezza Brinell (HBW2.5/62.5), mediante durometro Ernst AT130D, al fine di ottenere una ulteriore conferma sperimentale della variazione delle proprietà meccaniche in relazione ai trattamenti eseguiti.

Un controllo della microstruttura è stato infine effettuato a valle della Fase 1 dell'indagine sperimentale. Sono stati sezionati n. 3 campioni di trazione per ciascuna dei tre tempi di solubilizzazione indagati ed i saggi estratti sono stati inglobati a caldo in resina fenolica. Dopo opportuna preparativa metallografica i saggi sono stati osservati mediante microscopio ottico metallografico Leica DMi8 A (Leica Microsystem, Wetzlar, Germania), dotato di

software di acquisizione di immagine LAS v4.13.

RISULTATI E DISCUSSIONE

I risultati delle prove di trazione, eseguite sui provini a valle dei trattamenti termici previsti dalla Fase 1, sono mostrati in Tabella 3; in particolare, sono riportati i valori medi e relative deviazione standard di R_m , $R_{p0.2}$ e $A\%$.

Tab.3 - Prove di trazione: valori di carico di rottura, carico di snervamento e allungamento a rottura per diversi tempi di solubilizzazione (Fase 1).

	535 °C x 120 min	535 °C x 240 min	535 °C x 360 min
R_m [MPa]	291.2 ± 13.8	309.1 ± 3.9	315.0 ± 2.7
$R_{p0.2}$ [MPa]	222.2 ± 5.4	231.3 ± 6.3	241.9 ± 1.9
$A\%$ [#]	7.35 ± 2.55	9.90 ± 1.41	9.00 ± 1.37

Dai risultati ottenuti è possibile notare come R_m e $R_{p0.2}$ aumentino all'aumentare del tempo di solubilizzazione pur senza mostrare variazioni particolarmente importanti tra una condizione e l'altra. Una possibile spiegazione di questo fenomeno può essere trovata in studi di letteratura. È stato infatti dimostrato da Zhang et al. [9] che l'incremento delle proprietà meccaniche della lega si ottiene in seguito ai fenomeni di diffusione nella lega

che avvengono nei primi 30 min di solubilizzazione. Per quanto riguarda l'allungamento percentuale a rottura, è possibile notare come il valore più alto sia stato ottenuto nei provini di trazione ricavati da getti solubilizzati per 240 min. In Tabella 4 sono invece riportati i risultati delle prove di durezza Brinell HBW2,5/62,5 eseguite sugli stessi campioni.

Tab.4 - Valori di durezza HBW2,5/62,5 della lega trattata secondo i processi di solubilizzazione descritti (Fase 1).

	535 °C x 120 min	535 °C x 240 min	535 °C x 360 min
Media	94.6	95.8	98.8
Dev.Std.	3.4	2.9	2.6

Tenendo conto delle deviazioni standard, è stato possibile constatare che anche la durezza non è variata in maniera considerevole all'aumentare della durata del trattamento di solubilizzazione, pur mostrando in analogia alle caratteristiche meccaniche un trend crescente dei valori medi al crescere del tempo di solubilizzazione. A valle delle prove di trazione, si è proceduto inoltre con una analisi della microstruttura. In Figura 2 si riportano le micrografie, ottenute a microscopio ottico ad un ingran-

dimento di 500x, rappresentative delle diverse condizioni di solubilizzazione. La microstruttura consiste in tutti i casi di dendriti di α -Al e di una struttura eutettica in cui il Si appare correttamente modificato. È stato rilevato un contenuto relativamente basso di intermetallici a base Fe.

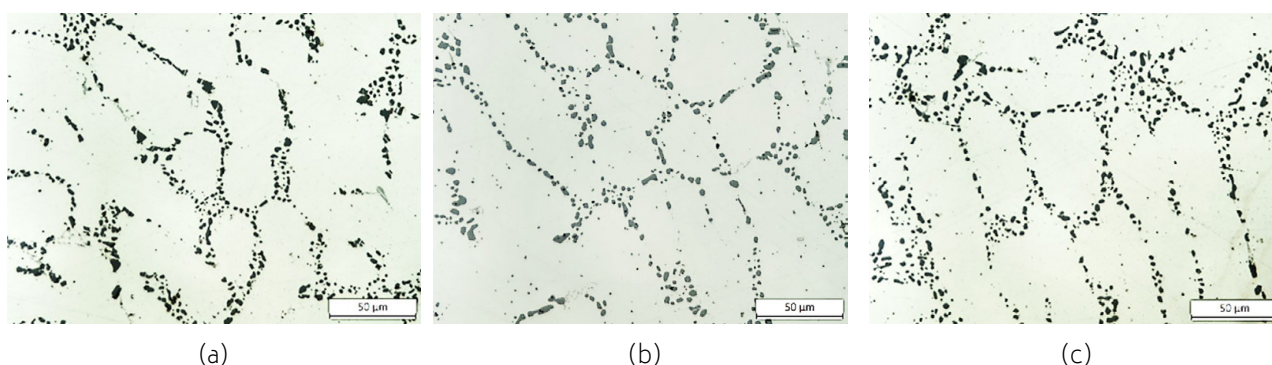


Fig.2 - Micrografie rappresentative delle diverse condizioni di solubilizzazione a 535 °C e a) 120 min, b) 240 min e c) 360 min.

Sulla base dei risultati ottenuti dalla caratterizzazione meccanica e microstrutturale in Fase 1, si è deciso di optare per il trattamento di solubilizzazione a 535 °C per 240 min come il migliore per le proprietà meccaniche garantite e per il rapporto prestazioni/prezzo più conveniente per la Azienda rispetto a tempi più lunghi di trattamento. Pertanto, in Fase 2 è stata indagata l'influenza sulle

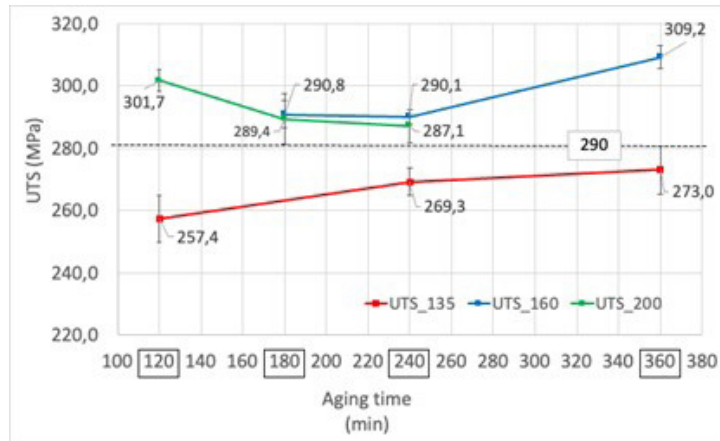
proprietà meccaniche di diverse combinazioni di tempi e temperature di trattamento di invecchiamento, a parità di trattamento di solubilizzazione (535 °C per 240 min). In Tabella 5 sono riportati i valori medi e relative deviazioni standard di R_m , $R_{p0.2}$ e $A\%$ al variare dei parametri di invecchiamento.

Tab.5 - Prove di trazione: valori di carico di rottura, carico di snervamento e allungamento a rottura per diversi tempi e temperature di invecchiamento (Fase 2).

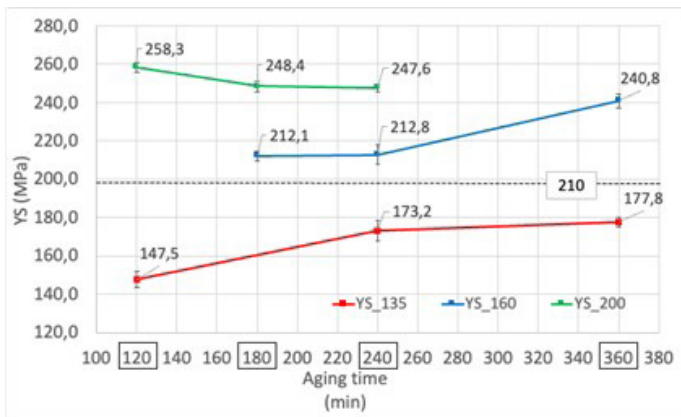
	135 °C x 120 min	135 °C x 240 min	135 °C x 360 min
R_m [MPa]	257.4 ± 7.5	269.3 ± 4.3	273.0 ± 7.8
R_{p0.2} [MPa]	147.5 ± 4.2	173.2 ± 5.4	177.8 ± 7.8
A% [#]	13.9 ± 3.1	12.3 ± 2.1	11.0 ± 3.9
	160 °C x 180 min	160 °C x 240 min	160 °C x 360 min
R_m [MPa]	290.8 ± 4.4	290.1 ± 2.4	309.2 ± 3.6
R_{p0.2} [MPa]	212.1 ± 2.6	212.8 ± 5.2	240.8 ± 3.8
A% [#]	10.5 ± 2.5	10.2 ± 1.7	8.4 ± 1.4
	200 °C x 120 min	200 °C x 180 min	200 °C x 240 min
R_m [MPa]	301.7 ± 3.5	289.4 ± 8.0	287.1 ± 5.3
R_{p0.2} [MPa]	258.3 ± 2.7	248.4 ± 2.9	247.6 ± 1.9
A% [#]	7.2 ± 1.1	5.5 ± 2.0	6.2 ± 2.1

Al fine di facilitare lettura e comprensione dei dati, i valori di R_m , $R_{p0.2}$ e $A\%$ sono stati rappresentati anche graficamente in Figura 3. È possibile notare che, per le più basse temperature di trattamento (135 °C e 160 °C), le migliori proprietà meccaniche (R_m e $R_{p0.2}$) sono state raggiunte per i tempi più lunghi di trattamento; nonostante ciò, per tutti gli invecchiamenti condotti a 135 °C i valori soglia di 210 MPa e 290 MPa, rispettivamente per $R_{p0.2}$ e R_m ,

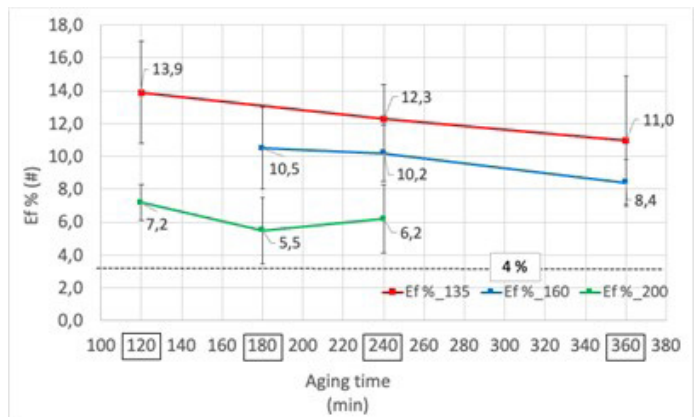
non sono stati raggiunti. Al contrario, per la temperatura più alta di trattamento (200 °C), le migliori caratteristiche meccaniche sono state raggiunte per il tempo più breve di mantenimento (120 min). Questo andamento è supportato dalla letteratura più recente [8]. È importante evidenziare che, per tutti i trattamenti eseguiti, il valore di soglia di $A\%$ pari al 4 % è stato garantito.



(a)



(b)



(c)

Fig.3 -Proprietà meccaniche al variare delle condizioni di invecchiamento: a) Rm, b) Rp0.2 e c) A%.

In Tabella 6 sono riportati i valori di durezza Brinell dei campioni analizzati nelle diverse condizioni di trattamento di invecchiamento. Gli stessi valori di durezza sono diagrammati anche in Figura 4 ed è possibile constatare che i valori più elevati della durezza sono stati raggiunti

per le combinazioni 200 °C per 120 min e 160°C per 360 min. Considerando i valori di deviazione standard dei risultati, solo quest'ultima condizione e per tutti gli invecchiamenti condotti a 200 °C è stato possibile superare il valore soglia di 90 HBW2,5/62,5.

Tab.6 - Valori di durezza HB10 della lega trattata secondo i processi di invecchiamento descritti.

	135 °C x 120 min	135 °C x 240 min	135 °C x 360 min
HBW2,5/62,5	77.2 ± 0.9	81.8 ± 1.4	84.8 ± 1.0
	160 °C x 180 min	160 °C x 240 min	160 °C x 360 min
HBW2,5/62,5	89.9 ± 2.3	90.5 ± 1.5	97.6 ± 0.8
	200 °C x 120 min	200 °C x 180 min	200 °C x 240 min
HBW2,5/62,5	97.1 ± 0.7	94.3 ± 1.2	94.5 ± 0.6

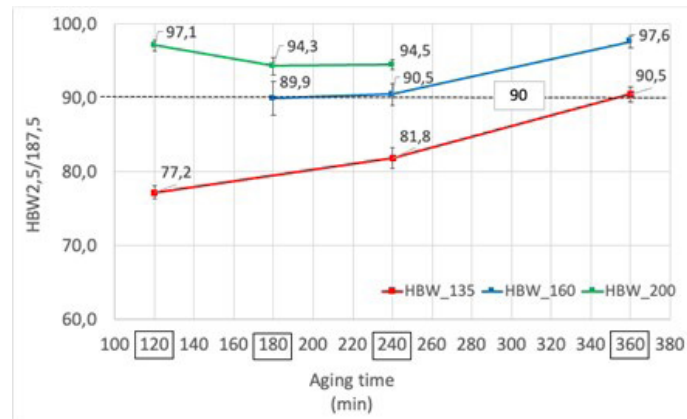


Fig.4 - Andamento della durezza Brinell in relazione ai diversi trattamenti di invecchiamento (Fase 2).

CONCLUSIONI

Il presente studio ha riguardato l'analisi dei parametri di trattamento termico T6 effettuato in forni industriali al fine di ottimizzare le proprietà meccaniche della lega EN AC-42100. In particolare, nella prima fase di lavoro sono state eseguite solubilizzazioni a 535 °C per differenti tempi di mantenimento al fine di individuare il miglior compromesso tra proprietà meccaniche e tempi di trattamento a valle di un invecchiamento artificiale condotto a 160 °C per 300 min. Una seconda fase ha invece riguardato l'influenza sulle proprietà meccaniche di diverse combinazioni di tempi e temperature di trattamento di invecchiamento, assumendo come condizione di solubilizzazione quella individuata come ottimale nella precedente prima fase. A partire dalle evidenze sperimentali è stato possibile constatare che:

- Nella prima fase, la durata del trattamento di solubilizzazione ha avuto un effetto sulle caratteristiche meccaniche. Rm e Rp0.2 hanno mostrato un incremento all'aumentare della durata del trattamento di solubilizzazione, nonostante tale crescita non sia stata particolarmente significativa soprattutto passando dai 240 min ai 360 min di trattamento. L'allungamento percentuale a rottura ha raggiunto il valore massimo per un mantenimento a 535 °C pari a 240 min. Alla luce di tali risultati, si può pertanto ritenere che un tempo di solubilizzazione superiore ai 240 min si dimostra non necessario ed economicamente non vantaggioso per l'Azienda.

- Altrettanto, la durezza Brinell non sembra essere influenzata in modo significativo dalla durata del trattamento di solubilizzazione, sebbene si sia constatato un leggero trend positivo nei valori medi.

- Le analisi microstrutturali, condotte in Fase 1 sui campioni sottoposti a differenti tempi di solubilizzazione, hanno messo in evidenza le tipiche caratteristiche microstrutturali di una lega ipoeutettica EN AC-42100 correttamente modificata. La presenza di intermetallici a base Fe si è dimostrata molto limitata, confermando il ruolo significativo della combinazione dei parametri di solubilizzazione ed invecchiamento sull'evoluzione delle proprietà meccaniche.

- Con specifico riferimento all'invecchiamento, è stato possibile constatare come per temperature di trattamento inferiori (135 °C e 160 °C) le più elevate proprietà meccaniche siano state ottenute per i tempi più elevati di permanenza all'interno del forno. Ciononostante, tutti i trattamenti di invecchiamento condotti a 135 °C non sono stati in grado di far superare i valori di soglia di Rp02 e Rm, posti rispettivamente pari a 210 MPa e 290 MPa. Considerando i valori di deviazione standard, tra tutti i trattamenti condotti a 160 °C solo un tempo di mantenimento pari a 360 min è stato in grado di garantire proprietà meccaniche adeguate. Al contrario, per temperature maggiori (200 °C), il punto di massimo delle caratteristiche meccaniche è stato raggiunto per la durata più breve del trattamento.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano l'Ing. Davide Gramigna per il fattivo contributo nello svolgimento delle attività sperimentali.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kaufman J. G., Introduction to aluminum alloys and tempers, ASM International, Materials Park, 2000, p. 87.
- [2] Stroh J., Sediako D., Hanes T., Anderson K., Monroe A., The effect of heat treatment on the microstructure and tensile properties on an HPDC marine transmission, *Metals* 11, 517, 2021, 1-17.
- [3] Fortini, A., Lattanzi, L., Merlin, M. et al. Comprehensive Evaluation of Modification Level Assessment in Sr-Modified Aluminium Alloys. *International Journal of Metalcasting* 12, 697-711, 2018.
- [4] Ibrahim M. F., Elgallad E. M., Valtierra S., Doty H. W., Samuel F. H., Metallurgical parameters controlling the eutectic silicon characteristics in Be-treated Al-Si-Mg alloys, *Materials* 9, 78, 2016, 1-17.
- [5] Li R. X., Li R. D., Zhao Y. H., Li C. X., Sun X. F., Guan H. R., Hu Z. Q., Effect of heat treatment on eutectic silicon morphology and mechanical properties of Al-Si-Cu-Mg cast alloys, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 14, 2004, 496-500.
- [6] Apelian D., Shivkumar S., Sigworth G., Fundamental aspects of heat treatment of cast Al-Si-Mg alloys, *AFS Trans.* 97, 1989, 727-742.
- [7] Roy E. L., *Castings*, 9th Ed, ASM International: Materials Park, OH, USA, 1992, vol. 15, pp. 743-769.
- [8] Chen R., Xu Q., Guo H., Xia Z., Wu Q., Liu B., Correlation of solidification microstructure refining scale, Mg composition and heat treatment conditions with mechanical properties in Al-7Si-Mg cast aluminum alloys, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 685, 2017, pp. 391-402.
- [9] Zhang D. L., Zheng L. H., StJohn D. H., Effect of a short solution treatment time on microstructure and chemical properties of modified Al-7wt.%Si-0.3wt.%Mg alloy, *Journal of Light Metal*, 2002, 27-36.

[TORNA ALL'INDICE >](#)