

УДК 661.74:669.14.046.554

А.А. Кулініч

**ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНО-ЧАСОВИХ ПАРАМЕТРІВ ВІДПАЛУ НА СТРУКТУРУ І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВУ АМг<sub>6</sub>л З ПІДВИЩЕНИМ ВМІСТОМ КРЕМНІЮ**

In this paper we study the influence of temperature-temporal parameters of in-process annealing set on structure and mechanical properties of alloy АМг<sub>6</sub>л with 1 % of silicon admixtures. Melting is conducted in the laboratory resistance stove in graphite crucible. We use the following materials: aluminium А99, ligature Al–Mg, Al–Zr, Al–Be, Al–Ti, Al–Si. The obtained standard samples 10 mm in diameter are annealed at different temperature-temporal parameters. Also, we determine their mechanical properties. We establish that alloy АМг<sub>6</sub>л can reach the maximum level of mechanical properties 1,0 % Si after annealing at the following mode – 430 °С, 20 h. + 530 °С, 8 h. The replacement of the standard annealing for the new mode for the alloy under study containing 1 % Si allows increasing the values of temporal break resistance by 12 %, and relative lengthening by 41 %. The new mode of annealing is instrumental in changing the phase morphology of Mg<sub>2</sub>Si from ramified one to a more compact. Also, grinding and spheroidizing of the particles take place. It influences the increase of level of mechanical properties of alloy АМг<sub>6</sub>л.

**Вступ**

Головною шкідливою домішкою ливарних сплавів системи Al–Mg, що знижує рівень механічних властивостей, є кремній. Для цих сплавів дефіцит магнію в твердому розчині, що виникає через утворення фази Mg<sub>2</sub>Si, впливає на зниження міцності, а фаза Mg<sub>2</sub>Si, маючи розгалужену морфологію, впливає також на зниження рівня пластичності та в'язкості руйнування [1–5]. Але, незважаючи на зазначене, домішки кремнію вводять в окремі сплави системи Al–Mg (такі, як АМг7, АМг11) з метою поліпшення ливарних властивостей – підвищення рідкоплинності та зниження схильності сплавів до утворення гарячих тріщин під час кристалізації [1–3].

Типовий сплав цієї системи – АМг<sub>6</sub>л – належить до сплавів із середнім вмістом магнію, його використовують як після лиття, так і після термічної обробки. В цьому сплаві, згідно з ДСТУ 2839–94, вміст домішок кремнію не має перевищувати 0,2 %. Але якщо використовувати для виробництва цього сплаву технічний алюміній, лом і відходи алюмінієвих сплавів з метою зниження його собівартості, то можливе підвищення у ньому вмісту домішок кремнію.

Стандартні режими термічної обробки, які застосовуються для сплаву АМг<sub>6</sub>л у промисловості (430 ± 10 °С, 20 год із подальшим гартуванням), суттєво не впливають на морфологію фази Mg<sub>2</sub>Si в цьому сплаві. Але в працях [1, 2] показано, що в силумінах частинки фази Mg<sub>2</sub>Si можуть змінювати морфологію при високотемпературній термічній обробці. Для перевірки мож-

ливості впливу високотемпературної термічної обробки на морфологію фази Mg<sub>2</sub>Si в ливарних сплавах системи Al–Mg потрібно провести експериментальні дослідження з вивчення впливу режимів відпалу на структуру та механічні властивості сплаву АМг<sub>6</sub>л з підвищеним вмістом домішок кремнію.

**Постановка задачі**

Мета роботи – встановити вплив температурно-часових параметрів відпалу на структуру і механічні властивості сплаву АМг<sub>6</sub>л з домішками кремнію вмістом 1 %.

**Методика досліджень**

Об'єкт дослідження в роботі – ливарний сплав АМг<sub>6</sub>л. Хімічний склад цього сплаву змінювали в таких межах: Mg = 6–7 %, Zr = 0,15 %, Be = 0,05 %, Ti = 0,1 %. Вміст домішок у сплаві: Mn ≤ 0,05 %, Cu ≤ 0,03 %, Zn ≤ 0,06 %, Fe ≤ 0,1 %. Додатково вводили домішки кремнію 1 % з використанням подвійної алюмінієвої лігатури.

Плавки проводили в лабораторній печі опору в графітошамотному тиглі. Використовували такі шихтові матеріали: алюміній марки А99, лігатури Al–Mg, Al–Zr, Al–Be, Al–Ti, Al–Si. У тиглі розплавляли алюміній і лігатуру Al–Be. Після їх розплавлення, за температури 690 °С, вводили лігатури Al–Zr, Al–Ti, Al–Si. Після розплавлення шихтових матеріалів і перемішування розплаву вводили лігатуру Al–Mg. За температури 700 °С проводили рафінування розплаву флюсом у кількості 2 % від маси сплаву. Склад флюсу: 85 % карналіту ( MgCl<sub>2</sub>·KCl) і 15 %

фтористого кальцію. Після цього розплав розливали в металеву виливницю.

На отриманих стандартних зразках діаметром 10 мм визначали механічні властивості досліджуваних сплавів (тимчасовий опір розриву, межу плинності, відносне видовження).

Випробування механічних властивостей проводились на розривній машині TIRA-TEST за стандартними методиками.

Середні квадратичні відхилення значень механічних властивостей були в межах:  $\sigma_b - \pm 20$  МПа,  $\sigma_{0,2} - \pm 10$  МПа,  $\delta - \pm 15$  %.

Мікрорентгеноспектральний аналіз проводили з використанням растрового електронного мікроскопа РЕММА-101А. Хімічний аналіз зразків досліджуваних сплавів проводили, використовуючи метод оптичної спектроскопії в парним розрядом.

Якісний та кількісний металографічний аналіз виконано на мікроскопі NEOFOT-31. Рентгенографічне дослідження проводили в Cu-характеристичному випромінюванні із застосуванням дифрактометра ДРОН-413.

### Експериментальна частина

На першому етапі досліджень встановлено вплив домішок кремнію на фазовий склад, структуру та механічні властивості сплаву АМгбл після лиття в кокіль.

За даними рентгенофазового, рентгеноспектрального й термічного аналізів структура сплаву АМгбл після лиття складається з  $\alpha$ -твердого розчину та двох евтектик, склад яких наведено в табл. 1. Хімічний склад фаз, що утворюються в досліджуваному сплаві при кристалізації, наведено в табл. 2.

Таблиця 1. Фазові перетворення в сплаві АМгбл при кристалізації

Перетворення при кристалізації	Температура перетворень, °С		
	$T_1$	$T_2$	$T_3$
$P \rightarrow \alpha Al$	620	—	—
$P \rightarrow \alpha Al + Mg_2Si$	—	548	—
$P \rightarrow \alpha Al + \beta(Al_3Mg_2) + Mg_2Si$	—	—	450

Таблиця 2. Хімічний склад надлишкових фаз у сплаві АМгбл

Формула фази	Al, % мас.	Si, % мас.	Mg, % мас.
$(Al_3Mg_2)$	62–65	—	35–38
$Mg_2Si$	—	38	62

Експериментальні дослідження показали, що під час нерівноважної кристалізації досліджуваного сплаву першими кристалізуються зерна алюмінієвого твердого розчину, потім подвійна евтектика  $\alpha_{Al} + Mg_2Si$ , останньою кристалізується потрійна евтектика  $\alpha_{Al} + \beta(Al_3Mg_2) + Mg_2Si$  (див. табл. 1). Металографічні дослідження в поєднанні з мікрорентгеноспектральним аналізом показали, що основною за кількістю евтектикою в сплаві є потрійна евтектика  $\alpha_{Al} + \beta(Al_3Mg_2) + Mg_2Si$ .

Згідно з даними, наведеним в табл. 3, підвищення вмісту кремнію з 0,03 до 2 % у сплаві АМгбл впливає на зниження температури початку кристалізації сплаву ( $T_1$  – температура ліквідусу) на 18 °С, підвищення температури ( $T_2$ ) евтектичної реакції  $\alpha_{Al} + Mg_2Si$  на 39 °С, зниження температури ( $T_3$  – температура нерівноважного солідусу) евтектичної реакції  $\alpha_{Al} + \beta(Al_3Mg_2) + Mg_2Si$  на 3 °С. При вмісті кремнію в досліджуваному сплаві 0,03 % інтервал його кристалізації становить 172 °С, але в міру збільшення вмісту кремнію інтервал кристалізації сплаву АМгбл зменшується. Це зумовлює підвищення ливарних властивостей сплаву (підвищення рідкоплинності і зменшення схильності до утворення гарячих тріщин).

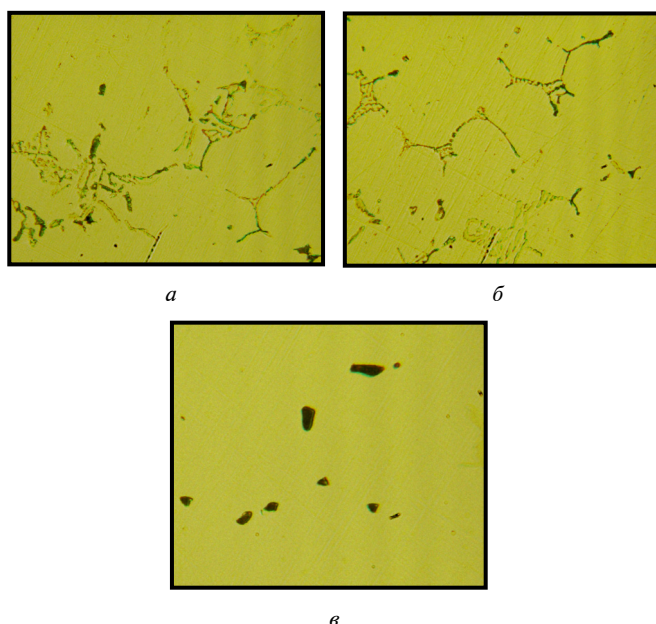
Згідно з даними металографічного і мікрорентгеноспектрального аналізів, при вмісті в сплаві АМгбл кремнію до 0,05 % кремнійвмісних фаз не утворюється. В концентраційному інтервалі 0,06–1 % Si в досліджуваному сплаві з'являється нова фаза –  $Mg_2Si$  (табл. 3).

Таблиця 3. Вплив кремнію на фазовий склад сплаву АМгбл і температуру фазових перетворень при кристалізації

Si, % мас.	Температура перетворень, °С			Фазовий склад сплаву
	$T_1$	$T_2$	$T_3$	
0,03	622	542	450	$\alpha_{Al}, \beta(Al_3Mg_2)$
0,2	619	549	449	$\alpha_{Al}, \beta(Al_3Mg_2), Mg_2Si$
0,5	616	552	448	$\alpha_{Al}, \beta(Al_3Mg_2), Mg_2Si$
1,0	610	570	447	$\alpha_{Al}, \beta(Al_3Mg_2), Mg_2Si$

Встановлено, що при збільшенні вмісту кремнію в сплаві АМгбл до 1 % зростає кількість виділень частинок фази  $Mg_2Si$ . Також спостерігається укрупнення розмірів цих виділень та зростає розгалуженість частинок фази  $Mg_2Si$  (рисунки, а). Стандартні режими тер-

мічної обробки, які застосовуються для сплаву АМгбл в промисловості ( $430 \pm 10$  °С, 20 год з подальшим гартуванням), суттєво не впливають на морфологію фази  $Mg_2Si$  в цьому сплаві (рисунки, б). Тому на другому етапі досліджень встановлювали можливість оптимізації температурно-часових параметрів відпалу з метою зміни морфології фази  $Mg_2Si$  на більш компактну і, відповідно, підвищення рівня механічних властивостей досліджуваного сплаву. Для вибору оптимального режиму термічної обробки сплаву АМгбл використовували дані термічного, металографічного та мікрорентгеноспектрального аналізів.



Мікроструктура сплаву АМгбл з домішками кремнію 1 %: а – після лиття; б – після відпалу (430 °С, 20 год) та гартування у воду; в – після відпалу (430 °С, 20 год + 530 °С, 8 год) та гартування у воду;  $\times 500$

Експериментальні дані термічного аналізу показали, що для сплаву АМгбл з домішками кремнію 1 % температура нерівноважного солідусу становить 447 °С, а температура рівноважного солідусу – 550–560 °С.

Було встановлено, що оптимальний комплекс механічних властивостей в досліджуваному сплаві досягається при двостадійному режимі відпалу: температура першої стадії не повинна перевищувати температуру нерівноважного солідусу, мета цієї стадії – часткове розчинення нерівноважної евтектики  $\alpha_{Al} + \beta(Al_3Mg_2) + Mg_2Si$ ; температура другої стадії

не повинна перевищувати температуру рівноважного солідусу, мета цієї стадії – прискорити дифузію атомів кремнію, що сприяє подрібненню та сфероїдизації частинок фази  $Mg_2Si$ .

Експериментальні дослідження показали, що оптимальна температура першої стадії відпалу для сплаву АМгбл з 1,0 % Si –  $430 \pm 5$  °С, час витримки 20 год, температура другої стадії відпалу дорівнює  $530 \pm 5$  °С. Вплив двостадійного режиму відпалу за різного часу витримки на другій стадії на механічні властивості досліджуваного сплаву після повної термічної обробки (відпал та гартування у воду) відображено в табл. 4.

Таблиця 4. Вплив двостадійного режиму відпалу на механічні властивості сплаву АМгбл з 1,0 % Si

Час витримки на другій стадії відпалу, год	Механічні властивості	
	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
1	238	8,2
2	240	8,5
3	243	8,9
4	247	9,4
5	252	10,0
6	257	10,2
7	260	10,4
8	265	10,7
9	261	10,3
10	258	9,5

Примітка. 1-ша стадія відпалу – 430 °С, 20 год, 2-га стадія відпалу – 530 °С, після відпалу – гартування у воду. Вміст магнію в сплаві АМгбл – 6,3 %.

Згідно з даними, наведеним в табл. 4, максимального рівня механічних властивостей сплав АМгбл з 1,0 % Si набуває після двостадійного відпалу за режимом 430 °С, 20 год + 530 °С, 8 год:  $\sigma_B = 265$  МПа,  $\delta = 10,7$  %. Для порівняння наведемо механічні властивості сплаву АМгбл з 1,0 % Si при стандартному режимі відпалу (430 °С, 20 год):  $\sigma_B = 237$  МПа,  $\delta = 7,6$  %.

Застосування запропонованого двостадійного режиму відпалу сприяє зміні морфології фази  $Mg_2Si$  з розгалуженої на більш компактну, відбувається подрібнення і сфероїдизація частинок (рисунки, в). Зміною морфології частинок фази  $Mg_2Si$  можна пояснити підвищення рівня механічних властивостей сплаву АМгбл з 1,0 % Si.

## Висновки

На прикладі сплаву АМгбл показано можливість розробки оптимальних технологій термічної обробки ливарних сплавів Al–Mg з підвищеним вмістом шкідливих домішок кремнію.

Встановлено, що для досліджуваного сплаву, який містить 1 % Si, заміна стандартного одностадійного відпалу на запропонований дво-стадійний режим дає можливість підвищити

значення тимчасового опору розриву на 12 %, а відносного видовження – на 41 %.

Перспективність подальших досліджень полягає в пошуку оптимальних температурно-часових параметрів відпалу для інших промислових ливарних сплавів системи Al–Mg для забезпечення додаткового резерву подальшого підвищення комплексу їх механічних властивостей без зміни хімічного складу.

1. *Золотаревский В.С., Белов Н.А.* Металловедение литейных алюминиевых сплавов. – М.: МИСИС, 2005. – 375 с.
2. *Машиностроение.* Энциклопедия. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы. Т. II / Под общ. ред. И.Н. Фридляндера. – М.: Металлургия, 2001. – 880 с.
3. *Постников Н.С.* Коррозионностойкие алюминиевые сплавы. – М.: Металлургия, 1976. – 303 с.
4. *Кулініч А.А., Гаврилюк В.П., Рябініна О.О.* Структура і фізико-механічні властивості сплаву системи Al–Mg, мікролегованого кремнієм // *Металознавство та обробка металів.* – 2010. – № 1. – С. 8–11.
5. *Гаврилюк В.П., Кулініч А.А., Рябініна Е.А.* Влияние кремния на структуру и механические свойства сплава АМгбл после лиття в кокиль // *Процессы лиття.* – 2010. – № 3. – С. 58–63.

Рекомендована Радою  
інженерно-фізичного факультету  
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції  
17 січня 2012 року