УДК 661.74:669.14.046.554

А.А. Кулініч, доцент, канд. техн. наук
Національний технічний університет України "КПІ", Київ, Україна
E-mail: kulinichkpiiff@mail.ru

МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВУ АМг6л З ДОМІШКАМИ КРЕМНІЮ ПІСЛЯ РІЗНИХ РЕЖИМІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Встановлено вплив температурно-часових параметрів відпалу на структуру та механічні властивості сплаву АМг6л з домішками кремнію вмістом 1 %. Показано, що при відпалі за режимом – 430 °С, 20 г. + 530 °С , 8 г. підвищуються значення тимчасового опору розриву на 12 %, а відносного видовження на 41 %.

Ключові слова: *фазовий склад, структура, відпал, морфологія, механічні властивості.*

Вступ

В деякі промислові ливарні сплави системи Al–Mg вводять кремній з метою поліпшення ливарних властивостей – підвищення рідиннотекучості та зниження схильності сплавів до утворення горячих тріщин під час кристалізації [1–3]. Але при цьому в сплавах, таких як АМг7, АМг11, виникає дефіцит магнію в твердому розчині в наслідок утворення фази Mg_2Si, що призводе до зниження характеристик міцності [3–5]. Фаза Mg_2Si, що має розгалужену морфологію, впливає, також, на зниження рівня пластичності і в'язкості руйнування [1, 3].

Типовий сплав даної системи – АМг6л відноситься до сплавів з середнім вмістом магнію, його використовують як після лиття, так і після термічної обробки. В даному сплаві, згідно ДСТУ 2839-94, вміст домішок кремнію не повинен перевищувати 0,2 %. Але, якщо використовувати для виробництва даного сплаву технічний алюміній, лом і відходи алюмінієвих сплавів, з метою зниження собівартості його виробництва, можливе підвищення вмісту в даному сплаві домішок кремнію.

Стандартні режими термічної обробки, які застосовуються для сплаву АМг6л в промисловості (430 ± 10 °С, 20 г. з подальшим гартуванням), суттєво не впливають на морфологію фази Mg_2Si в даному сплаві. Але, в роботах [1, 2] показано, що в силумінах частки фази Mg_2Si можуть змінювати морфологію при високотемпературній термічній обробці. Для перевірки можливості впливу високотемпературної термічної обробки на морфологію фази Mg_2Si в ливарних сплавах системи Al–Mg потрібно провести експериментальні дослідження по вивченню впливу режимів відпалу на структуру та механічні властивості сплаву АМг6л з підвищеним вмістом домішок кремнію.

Постановка завдання

Мета роботи – встановити вплив температурно-часових параметрів відпалу на структуру та механічні властивості сплаву АМг6л з домішками кремнію вмістом 1 %.

Методика досліджень

Об'єкт дослідження – ливарний сплав АМг6л. Хімічний склад даного сплаву змінювали в наступних межах: Mg = 6–7 %, Zr = 0,15 %, Be = 0,05 %, Ti = 0,1 %. Вміст домішок в 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 наступні шихтові матеріали: алюміній марки А99, лігатури Al–Mg, Al–Zr, Al–Be, Al–Ti, Al–Si. В тиглі розплавляли алюміній та лігатуру Al – Be. Після їх розплавлення, при температурі 690 °С, вводили лігатури Al–Zr, Al–Ti, Al–Si. Після розплавлення шихтових матеріалів та перемішування розплаву вводили лігатуру Al–Mg. При температурі 700 °С проводили рафінування розплаву флюсом у кількості 2 % від маси сплаву. Склад флюсу: 85 % карналіту ($MgCl_2 \cdot KCl$) та 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 знаходились в межах: $\sigma_в$ – ± 20 МПа, $\sigma_{0,2}$ – ± 10 МПа, δ – ± 15 %.

Мікрорентгеноспектральний аналіз проводили з використанням растрового електронного мікроскопу РЕММА–101А. Хімічний аналіз зразків досліджуємих сплавів проводили використовуючи метод оптичної спектроскопії випаровуючим розрядом.

Якісний та кількісний металографічний аналіз виконано на мікроскопі NEOFOT–31. Рентгенографічне дослідження проводили в Cu –характеристичному випромінюванні з застосуванням дифрактометру ДРОН – 413.

Експериментальна частина

На першому етапі досліджень встановлено вплив домішок кремнію на фазовий склад, структуру та механічні властивості сплаву АМг6л після лиття в кокіль.

За даними рентгенофазового, рентгеноспектрального та термічного аналізів структура сплаву АМг6л після литва складається з α–твердого розчину та двох евтектик склад яких наведено в таблице 1. Хімічний склад фаз, що утворюються в досліджуваному сплаві при кристалізації, наведено в таблице 2.

Таблиця 1 – Фазові перетворення в сплаві АМг6л при кристалізації

Номер реакції	Перетворення при кристалізації	Температура перетворень, °С		
		T_1	T_2	T_3
1	$P \rightarrow \alpha_{Al}$	620	-	-
2	$P \rightarrow \alpha_{Al} + Mg_2Si$	-	548	-
3	$P \rightarrow \alpha_{Al} + \beta(Al_3Mg_2) + Mg_2Si$	-	-	450

Таблиця 2 – Хімічний склад надлишкових фаз в сплаві АМг6л

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 $\alpha_{Al} + \beta(Al_3Mg_2) + Mg_2Si$ (таблиця 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 даним, наведеним в таблице 3, підвищення вмісту кремнію з 0,03 до 2 % в сплаві АМг6л впливає на зниження температури початку кристалізації даного 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 кристалізації даного сплаву становить 172 °С, але по мірі збільшення вмісту кремнію інтервал кристалізації сплаву АМг6л зменшується. Це обумовлює підвищення ливарних властивостей сплаву (підвищення рідкотекучості і зменшення схильності до утворення гарячих тріщин).

Згідно даних металографічного і мікрорентгеноспектрального аналізів, при вмісті в сплаві АМг6л кремнію до 0,05 %, кремніймістких фаз не утворюється. В концентраційному інтервалі (0,06–1) % Si, в досліджуваному сплаві з'являється нова фаза – Mg_2Si (таблиця 3).

Таблиця 3 – Вплив кремнію на фазовий склад сплаву АМг6л та на температуру фазових перетворень при кристалізації

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

Встановлено, що при збільшенні вмісту кремнію в сплаві АМг6л до 1 % зростає кількість виділень часток фази Mg_2Si. Також, спостерігається укрупнення розмірів цих виділень та зростає розгалуженість часток фази Mg_2Si (рисунок 1, а). Стандартні режими термічної обробки, які застосовуються для сплаву АМг6л в промисловості (430 ± 10 °С, 20 г. з подальшим гартуванням), суттєво не впливають на морфологію фази Mg_2Si в даному сплаві (рисунок 1, 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 Амг6л використовували дані термічного, металографічного та мікрорентгеноспектрального аналізу.

Експериментальні дані термічного аналізу показали, що для сплаву АМг6л з домішками кремнію 1 % температура нерівноважного солідусу – 447 °С, а температура рівноважного солідусу – 550–560 °С.

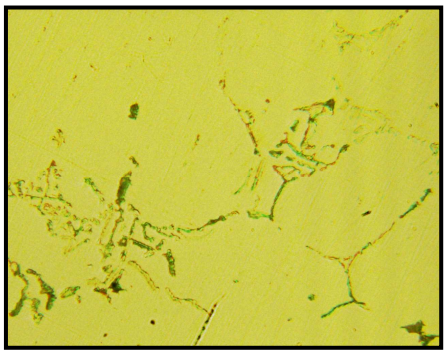
Було встановлено, що оптимальний комплекс механічних властивостей в досліджуваному сплаві досягається при двостадійному режимі відпалу: температура першої стадії не повинна перевищувати температуру нерівноважного солідусу – мета цієї стадії – часткове розчинення нерівноважної евтектики α_{Al} + $\beta(Al_3Mg_2)$ + Mg_2Si; температура другої стадії не повинна перевищувати температуру рівноважного солідусу – мета даної стадії – прискорити дифузію атомів кремнію, що сприяє подрібненню та сфероідізації часток фази Mg_2Si.

Експериментальні дослідження показали, що оптимальна температура першої стадії відпалу для сплаву АМг6л з 1,0 % Si – 430 ± 5 °С, час витримки 20 г., температура другої стадії відпалу дорівнює 530 ± 5 °С. Вплив двостадійного режиму відпалу, при різному часі витримки на другій стадії на механічні властивості досліджуваного сплаву після повної термічної обробки (відпал та гартування у воду), наведено в таблице 4.

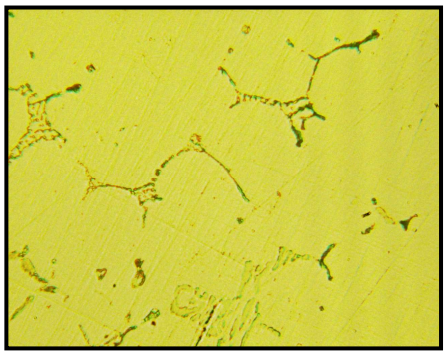
Таблиця 4 – Вплив двостадійного режиму відпалу на механічні властивості сплаву АМг6л з 1,0 % Si після термічної обробки за режимом Т4

Час витримки на другій стадії відпалу, г.	Механічні властивості	
	$\sigma_в$, МПа	δ, %
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

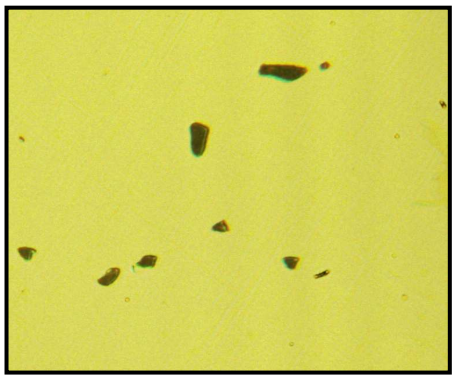
Згідно даним, наведеним в таблице 4, максимальний рівень механічних властивостей сплав АМг6л з 1,0 % Si набуває після двостадійного відпалу за наступним режимом – 430 °С, 20 г. + 530 °С , 8 г.: $\sigma_в$ = 265 МПа, δ = 10,7 %. Для порівняння наведемо механічні властивості сплаву АМг6л з 1,0 % Si при стандартному режимі відпалу (430 °С, 20 г.): $\sigma_в$ = 237 МПа, δ = 7,6 %.



а)



б)



в)

Рисунок 1 – Мікроструктура сплаву АМг6л з домішками кремнію 1 %: а) після лиття; б) після відпалу (430 °С, 20г.) та гартування у воду; в) після відпалу (430 °С, 20г. + 530 °С, 8 г.) та гартування у воду
а, б, в – × 500

Застосування запропонованого двостадійного режиму відпалу сприяє зміні морфології фази Mg_2Si з розгалуженої на більш компактну, відбувається подрібнення і сфероідезація даних часток (рисунок 1, в). Зміною морфології часток фази Mg_2Si можна пояснити підвищення рівня механічних властивостей сплаву АМг6л з 1,0 % Si.

Висновки

На прикладі сплаву АМг6л, 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 двостадійний режим дозволяє підвищити значення тимчасового опору розриву на 12 %, а відносного видовження на 41 %.

Перспективність подальших досліджень у даному напрямку 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.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Золотаревский В.С. Металловедение литейных алюминиевых сплавов / В.С. Золотаревский, Н.А. Белов. — 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 / Н.С. Постников. — М.: Металлургия, 1976. — 303 с.

4. Кулініч А.А. Структура і фізико-механічні властивості сплаву системи Al–Mg, мікролегованого кремнієм / А.А. Кулініч, В.П. Гаврилюк, О.О. Рябініна // Металознавство та обробка металів. — 2010. — № 1. — С. 8–11.

5. Гаврилюк В. П. Влияние кремния на структуру и механические свойства сплава АМг6л после литья в кокиль / В.П. Гаврилюк, А.А. Кулинич, Е.А. Рябинина // Процессы литья. — 2010. — № 3. — С. 58–63.

Надійшла до редакції 24.05.2013 р.

Кулинич А.А. Механические свойства сплава АМг6л с примесями кремния после разных режимов термической обработки

В работе установлено влияние температурно-временных параметров отжига на структуру и механические свойства сплава АМг6л с примесями кремния 1 %.

Установлено, что максимальный уровень механических свойств сплав АМг6л с 1,0 % Si достигает после двухстадийного отжига по следующему режиму – 430 °С, 20 ч. + 530 °С, 8 ч. Для исследуемого сплава, который содержим 1 % Si, замена стандартного одностадийного отжига на предлагаемый двухстадийный режим позволяет повысить значения временного сопротивления разрыву на 12 %, а относительного удлинения на 41 %.

Предлагаемый двухстадийный режим отжига способствует изменению морфологии фазы Mg_2Si с разветвленной на более компактную, происходит измельчение и сфероидизация данных частиц, что и влияет на повышение уровня механически свойств сплава АМг6л.

Ключевые слова: фазовый состав, структура, отжиг, морфология, механические свойства.

Kylinich A.A. Mechanical properties of alloy of АМг6л with admixtures of silicon after different modes of heat treatment

Influence of temperature-temporal parameters of annealing is in-process set on a structure and mechanical properties of АМг6л alloy with the admixtures of silicon 1 %.

It is set that maximal level of mechanical properties of АМг6л alloy from 1,0 % Si arrives at after annealing on the next mode – 430 °С, 20 h. + 530 °С, 8 h. For the explored alloy containing 1 % Si, replacement of the standard annealing on the new mode allows to promote the values of temporal resistance to the break on 12 %, %, and relative lengthening on 41 %.

The new mode of annealing is instrumental in the change of morphology of phase of Mg_2Si from ramified on more compact, there is growing shallow of these particles, what influences on the increase of level mechanically properties of АМг6л alloy.

Keywords: phase composition, structure, annealing, morphology, mechanical properties.