

УДК 661.74:669.14.046.554

А.А. Кулініч, О.О. Рябініна, С.М. Котляр

СТРУКТУРА І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВУ Al-6 % Mg-2 % Zn-0,5 % Fe-0,5 % Si, МІКРОЛЕГОВАНОГО МАРГАНЦЕМ ПІСЛЯ РІЗНИХ РЕЖИМІВ ВІДПАЛУ**Вступ**

При виготовленні ливарних сплавів системи Al–Mg–Zn з брухту та відходів алюмінієвих сплавів (зокрема, деформівних сплавів на основі системи Al–Mg) можливе попадання до складу даних сплавів домішок заліза, кремнію та марганцю.

Головними шкідливими домішками в ливарних сплавах системи Al–Mg–Zn є кремній і залізо [1–3]. Голчаста фаза $FeAl_3$ і фаза Mg_2Si у вигляді китайських ієрогліфів істотно знижують рівень механічних властивостей даних сплавів, особливо пластичність. Тому в сплавах, виготовлених із первинної сировини, вміст даних домішок обмежують на рівні, що не перевищує 0,3 % (тут і далі – масова частка).

Для можливості використання як шихтових матеріалів при виробництві високоміцних ливарних сплавів системи Al–Mg–Zn технічного алюмінію, брухту та відходів алюмінієвих деформівних сплавів, що містять залізо і кремній, необхідно розробити засоби нейтралізації цих шкідливих домішок.

Аналіз літературних джерел показує, що при оптимізації температурно-часових параметрів відпалу можна впливати на морфологію кремнійвмісних фаз в алюмінієвих сплавах. Так, у праці [2] показано, що в силумінах частинки фази Mg_2Si можуть фрагментуватись при високотемпературній термічній обробці. При цьому підвищується пластичність сплавів. У статтях [4, 5] встановлено, що для ливарних сплавів системи Al–Mg–Zn з підвищеним вмістом домішок кремнію можна також змінити морфологію частинок фази Mg_2Si з розгалуженої на більш компактну.

Домішки марганцю вводять у ливарні сплави системи Al–Mg–Zn у кількості до 0,2 % для підвищення рівня механічних і технологічних властивостей. Мікролегування марганцем призведе до сфероїдизації і подрібнення дендритів, а отже, до підвищення пластичності і зменшення лінійної усадки. Атоми марганцю збіль-

шують силу міжатомного зв'язку кристалічної ґратки алюмінієвого твердого розчину, підвищуючи тим самим рівень механічних властивостей сплаву. Марганець може утворювати з іншими металами стійкі комплекси, що також збільшує міцність сплавів при кімнатній і підвищених температурах. Відомий також ефект модифікування марганцем залізовмісних фаз в алюмінієвих сплавах [2, 3]. Враховуючи і той факт, що при виготовленні досліджуваних сплавів з лому та відходів алюмінієвих сплавів можливим є значне підвищення в них вмісту марганцю, потрібно детально дослідити вплив даного компонента на фазово-структурний склад та механічні властивості ливарних сплавів системи Al–Mg–Zn.

Постановка задачі

Мета дослідження – встановити вплив марганцю вмістом до 0,7 % та різних режимів відпалу на фазово-структурний склад та механічні властивості сплаву Al-6 % Mg-2 % Zn-0,5 % Fe-0,5 % Si.

Методика досліджень

Об'єкт дослідження – ливарний сплав Al-6 % Mg-2 % Zn, що за своїм хімічним складом є основою промислового сплаву ВАЛ11. Даний сплав характеризується добрим поєднанням характеристик як міцності, так і пластичності [6–8]. Вміст заліза та кремнію в сплаві дорівнював 0,5 % від маси сплаву кожного, вміст марганцю змінювався від 0,1 до 0,7 %.

У лабораторних умовах сплав Al-6 % Mg-2 % Zn-0,5 % Fe-0,5 % Si, мікролегований марганцем, виготовлявся сплавленням таких шихтових матеріалів: алюмінію марки А99, магнію марки Mg90, цинку марки ЦО, лігатури Al-5 % Si, Al-5 % Fe, Al-5 % Mn.

Дослідні плавки проводились в електричних печах опору з використанням графіто-шамотного тигля. У тиглі розплавлявся алюміній і при температурі 710 ± 10 °С вводився цинк і магній. Дана температура є оптимальною з точки зору технологічної обробки розплаву досліджуваного сплаву [6, 8]. Після розчинення цинку і магнію вводились лігатури із залізом, кремнієм та марганцем і витримувалася розплав при зазначеній температурі протягом 0,3–0,4 год. Після цього з поверхні розплаву видалялись шлаки і він розливався у металеву виливницю. Отримані стандартні зразки діамет-

ром 10 мм піддавались термічній обробці (відпалу, гартуванню і штучному старінню) і після цього визначались їх механічні властивості (міцність на розрив, межа плинності, відносне подовження).

Експериментальна частина

Згідно з даними рентгенофазового, мікрорентгеноспектрального і металографічного аналізів сплав Al-6 % Mg-2 % Zn-0,5 % Fe-0,5 % Si після литва в металеву виливницю складався з α -твердого розчину магнію і цинку в алюмінії, фази T – (Al₂Mg₃Zn₃), виділень фази Mg₂Si, що має розгалужену форму (рис. 1, а) та голчастої фази FeAl₃ (рис. 1, б).

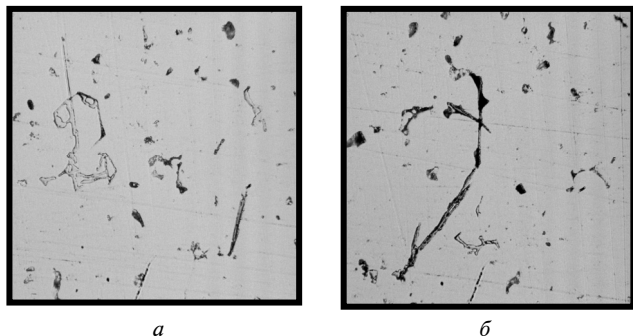


Рис. 1. Мікроструктура сплаву Al-6 % Mg-2 % Zn-0,5 % Fe-0,5 % Si після литва в металеву виливницю; а, б – $\times 500$

На першому етапі досліджень встановлювався вплив марганцю на фазово-структурний склад і рівень механічних властивостей досліджуваного сплаву. При цьому використовувався стандартний режим термічної обробки цього сплаву: відпал – $435 \pm 5^\circ\text{C}$, 20 год, гартування у воду та штучне старіння – 80°C , 8 год + 190°C , 2 год.

Вміст марганцю в досліджуваному сплаві змінювався від 0 до 0,7 %. Концентраційний інтервал домішок марганцю вибирали, враховуючи той факт, що вміст марганцю в алюмінієвих сплавах з брукху та відходів, з яких можуть виготовлятися вторинні ливарні сплави системи Al–Mg–Zn, не перевищує, звичайно, 0,5 % (деформівні сплави типу АМг6 та ін.).

Встановлено, що домішки марганцю в досліджуваному концентраційному інтервалі не впливають на вид кремнійвмісної фази – в сплаві Al-6 % Mg-2 % Zn-0,5 % Fe-0,5 % Si утворюється лише одна кремнійвмісна фаза – Mg₂Si. Вплив домішок марганцю на формуван-

ня фазового складу та рівень механічних властивостей даного сплаву наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Вплив марганцю на фазовий склад та механічні властивості сплаву Al-6 % Mg-2 % Zn-0,5 % Fe-0,5 % Si

Масовий вміст Mn у сплаві, %	Механічні властивості			Фаза, що містить залізо
	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	
–	250	130	2	FeAl ₃
0,1	253	131	2,1	(Fe, Mn)Al ₃
0,2	255	135	2,3	(Fe, Mn)Al ₃
0,3	262	138	2,8	(Fe, Mn)Al ₆
0,4	257	136	2,5	(Fe, Mn)Al ₆
0,5	254	135	2,4	(Fe, Mn)Al ₆
0,6	251	132	2	(Fe, Mn)Al ₆
0,7	247	128	1,9	(Fe, Mn)Al ₆

Примітка. Режим термічної обробки: відпал – 435°C , 20 год; гартування у воді; штучне старіння – 80°C , 8 год + 190°C , 2 год

З табл. 1 видно, що максимальний рівень механічних властивостей досліджуваного сплаву досягається при введенні в сплав марганцю вмістом від 0,2 до 0,5 %. Пояснити цей факт можна, аналізуючи зміну складу залізовмісних фаз даного сплаву залежно від вмісту в сплаві марганцю. З даних, наведених в табл. 1, видно, що в сплаві при відсутності марганцю утворюється лише одна залізовмісна фаза – FeAl₃. При вмісті марганцю до 0,2 % в досліджуваному сплаві є одна залізовмісна фаза – (Fe, Mn)Al₃.

Якщо в сплаві Al-6 % Mg-2 % Zn-0,5 % Fe-0,5 % Si вміст марганцю знаходиться в концентраційному інтервалі 0,25–0,7 %, в даному сплаві замість фази (Fe, Mn)Al₃ утворюється нова фаза – (Fe, Mn)Al₆.

Металографічний аналіз у поєднанні з рентгеноспектральним аналізом показали, що компактність форми виділень залізовмісних фаз у досліджуваному сплаві збільшується при заміні фаз FeAl₃ і (Fe, Mn)Al₃ на фазу (Fe, Mn)Al₆, тобто фаза (Fe, Mn)Al₆ є більш компактною, ніж дві інші залізовмісні фази.

Морфологія фази (Fe, Mn)Al₆ також залежить від вмісту в сплаві марганцю. Дана фаза має найбільш компакту форму при вмісті марганцю в досліджуваному сплаві від 0,25 до 0,3 %. При збільшенні вмісту марганцю до 0,7 % розміри фази (Fe, Mn)Al₆ поступово збільшуються,

а компактність зменшується (рис. 2). У структурі сплаву Al-6 % Mg-2 % Zn-0,5 % Fe-0,5 % Si є голчаста фаза FeAl_3 (рис. 2, а), при мікролегуванні сплаву марганцем вмістом 0,25–0,3 % в структурі з'являється фаза $(\text{Fe, Mn})\text{Al}_6$, що має найбільш компактну морфологію (рис. 2, б, в), подальше ж збільшення вмісту марганцю зменшує компактність фази $(\text{Fe, Mn})\text{Al}_6$ (рис. 2, г). Встановлено, що при збільшенні компактності даної фази рівень механічних властивостей досліджуваного сплаву, особливо пластичність, зростають (див. табл. 1).

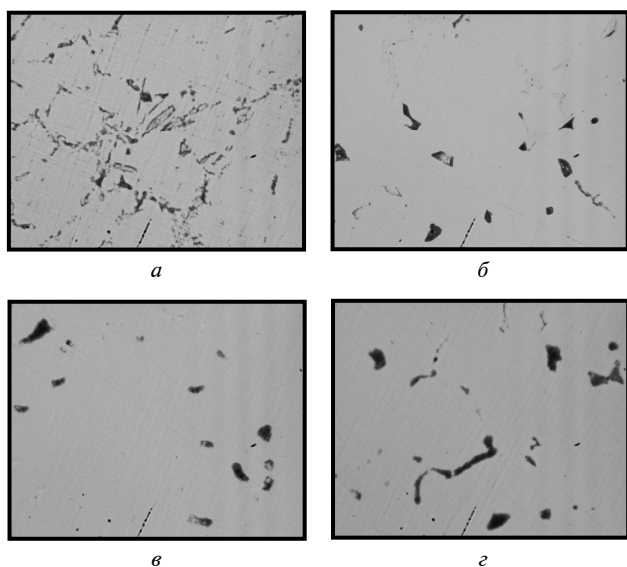


Рис. 2. Мікроструктура сплаву Al-6 % Mg-2 % Zn-0,5 % Fe-0,5 % Si з домішками марганцю після литва: а – вихідний сплав; б – 0,25 % Mn; в – 0,3 % Mn; г – 0,5 % Mn; а–г – $\times 400$

При вмісті марганцю 0,25 % механічні властивості сплаву Al-6 % Mg-2 % Zn-0,5 % Fe-0,5 % Si набувають максимальних значень: $\sigma_B = 265$ МПа, $\sigma_{0,2} = 140$ МПа, $\delta = 3$ %.

На другому етапі досліджень встановлювався вплив температурно-часових параметрів відпалу на структуру і рівень механічних властивостей сплаву Al-6 % Mg-2 % Zn-0,5 % Fe-0,5 % Si-0,25 % Mn.

Після литва фаза Mg_2Si має розгалужену морфологію, що істотно впливає на зниження пластичності сплаву. Зв'язуванням частини магнію дана фаза впливає на утворення дефіциту магнію в твердому розчині, що призводить до зниження міцності сплаву після штучного старіння. Тому з метою нейтралізації шкідливого впливу кремнію проводились дослідження впливу різних режимів відпалу на морфологію частинок фази Mg_2Si .

Як відзначалося вище, стандартний режим термічної обробки, який застосовується в промисловості (відпал 435 ± 5 °C, 20 год з подальшим гартуванням у воду) істотно не впливає на морфологію фази Mg_2Si , а застосування двостадійного відпалу може сприяти коагуляції фази Mg_2Si і, тим самим, підвищувати комплекс механічних властивостей досліджуваних сплавів.

Експериментальні дані термічного аналізу показали, що температура рівноважного солідусу для сплаву Al-6 % Mg-2 % Zn-0,5 % Fe-0,5 % Si-0,25 % Mn дорівнює 560–570 °C.

Було встановлено, що оптимальна температура першої стадії відпалу для досліджуваного сплаву, що містить 0,25 % Mn, дорівнює 435 °C, час витримки – 5 год, температура другої стадії відпалу – 530 °C. Вплив часу витримки при температурі 530 °C на механічні властивості досліджуваного сплаву після повної термічної обробки (відпал, гартування у воду та штучне старіння) наведено в табл. 2.

Згідно з даними табл. 2, максимального рівня механічних властивостей сплав Al-6 % Mg-2 % Zn-0,5 % Fe-0,5 % Si-0,25 % Mn набуває після відпалу за режимом 435 °C, 5 год і 535 °C, 8 год: $\sigma_B = 292$ МПа, $\sigma_{0,2} = 171$ МПа, $\delta = 8,2$ %. При даному двостадійному режимі відпалу характеристики міцності сплаву зростають на 20–25 МПа, а пластичність підвищується у 2,5 раза. Підвищення пластичності досліджуваного сплаву, згідно з даними металографічного аналізу, пов'язано із зміною морфології фази Mg_2Si з розгалуженої (рис. 3, а) на більш компактну (рис. 3, б).

Таблиця 2. Вплив часу витримки при відпалі на механічні властивості досліджуваного сплаву після повної термічної обробки

Час витримки при відпалі, год	Механічні властивості		
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
1	265	140	3,0
2	267	141	3,5
3	269	146	4,8
4	272	155	6,3
5	276	159	6,8
6	280	163	7,3
7	288	166	7,8
8	292	171	8,2
9	286	165	7,5
10	284	164	7,4

Примітка. Для всіх сплавів однаковий режим штучного старіння: 80 °C, 8 год + 190 °C, 2 год

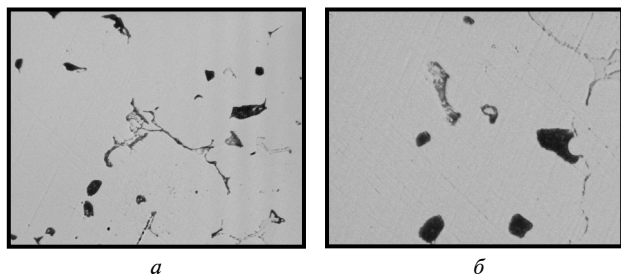


Рис. 3. Мікроструктура сплаву Al-6 % Mg-2 % Zn-0,5 % Fe-0,5 % Si-0,25 % Mn після різних режимів відпалу: а – $435 \pm 5^\circ\text{C}$, 20 год; б – 435°C , 5 год + 535°C , 8 год; $\times 400$

Висновки

В результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що домішки марганцю в кількості 0,2–0,5 % підвищують рівень механічних властивостей сплаву Al-6 % Mg-2 % Zn-0,5 % Fe-0,5 % Si, особливо відносно подовження. При оптимальному вмісті марганцю (0,25 %), що відповідає співвідношенню Mn/Fe = 0,5, пластичність досліджуваного сплаву під-

вищується на 50 % при збільшенні міцності на 15 МПа. При зазначеному вмісті марганцю відбувається заміщення голчастої фази FeAl_3 на більш компактну фазу $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Al}_6$, що і впливає на покращення механічних властивостей досліджуваного сплаву.

Застосування для досліджуваного сплаву, що містить домішки марганцю у кількості 0,25 %, двостадійного відпалу за встановленим оптимальним режимом підвищує характеристики міцності сплаву Al-6 % Mg-2 % Zn-0,5 % Fe-0,5 % Si на 20–25 МПа, а пластичність – у 2,5 раза. Це пов'язано із зміною морфології фази Mg_2Si з розгалуженої на компактну.

Перспективність подальших досліджень у даному напрямку полягає в можливості встановлення оптимального вмісту марганцю в інших промислових ливарних сплавах системи Al–Mg–Zn, що мають підвищений вміст домішок заліза. Це дасть можливість використовувати для їх виробництва лом та відходи алюмінієвих сплавів, що знизить собівартість виробництва даних сплавів.

А.А. Кулинич, Е.А. Рябина, С.Н. Котляр

СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА Al-6 % Mg-2 % Zn-0,5 % Fe-0,5 % Si, МИКРОЛЕГИРОВАННОГО МАРГАНЦЕМ ПОСЛЕ РАЗНЫХ РЕЖИМОВ ОТЖИГА

Исследовано влияние марганца с содержанием до 0,7 % и разных режимов отжига на фазовый состав, структуру и уровень механических свойств сплава Al-6 % Mg-2 % Zn-0,5 % Fe-0,5 % Si. При оптимальном соотношении Mn/Fe = (0,4–0,5) вместо игольчатой фазы FeAl_3 образуется более компактная фаза $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Al}_6$. При этом пластичность сплава увеличивается на 40–50 % при незначительном повышении прочности. Применение двухстадийного режима отжига с оптимальными температурно-часовыми параметрами позволяет повысить пластичность исследуемого сплава, который дополнительно содержит марганец в количестве 0,25 %, в 2,5 раза.

A.A. Kylinich, O.O. Ryabinina, S.M. Kotlyar

THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF Al-6 % Mg-2 % Zn-0,5 % Fe-0,5 % Si ALLOY WITH ADDITIONS OF MANGANESE AFTER DIFFERENT MODES OF ANNEALING

This paper discusses the influence of up to 0,7 percent of manganese and various modes of annealing on phase composition, structure and a level of mechanical properties of Al-6 % Mg-2 % Zn-0,5 % Fe-0,5 % Si alloy. More compact $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Al}_6$ phase is formed instead of FeAl_3 phase at the optimum correlation of Mn / Fe = (0,4–0,5). Thus alloy plasticity rises by 40–50 % at the insignificant increase of durability. The application of two-stage annealing mode with optimum temperature-time parameters allows boosting the plasticity of the alloy under study which additionally contains 0,25 percent of manganese in 2,5 time.

2. *Постников Н.С.* Коррозионностойкие алюминиевые сплавы. — М.: Металлургия, 1976. — 303 с.
3. *Мондольфо Л.Ф.* Структура и свойства алюминиевых сплавов. — М.: Металлургия, 1979. — 640 с.
4. *Кулініч А.А., Гаврилюк В.П., Рябініна О.О., Доній О.М.* Фазово-структурний склад і механічні властивості сплаву Al-6 % Mg-2 % Zn-0,5 % Fe-0,5 % Si з добавками берилію після різних режимів відпалу// Наукові вісті НТУУ "КПІ". — 2007. — № 3. — С. 101–104.
5. *Кулініч А.А., Гаврилюк В.П., Рябініна О.О.* Вплив параметрів відпалу на структуру та механічні властивості ливарного сплаву Al-6 % Mg-2 % Z з домішками кремнію // Металознавство та обробка металів. — 2007. — № 2. — С. 28–32.
6. *Постников Н.С.* Упрочнение алюминиевых сплавов и отливок. — М.: Металлургия, 1983. — 119 с.
7. *Бялік О.М., Доній О.М., Кулініч А.А.* Вплив параметрів кристалування на структуру та механічні властивості ливарних сплавів системи Al–Mg–Zn // Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 2004. — **40**, № 1.— С. 118–119.
8. *Доній О.М., Кулініч А.А., Рябініна О.О., Стась І.М.* Вплив часу витримки між гартуванням і штучним старінням на фазовий склад, структуру та механічні властивості ливарних сплавів системи Al–Mg–Zn, мікролегованих комплексом міді, вуглецю і титану // Наукові вісті НТУУ "КПІ". — 2003. — № 5. — С. 51–53.

Рекомендована Радою
інженерно-фізичного факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
22 червня 2009 року