

УДК 661.74:669.14.046.554

А.А. Кулініч

## ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ І МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СПЛАВУ АМгбл З ПІДВИЩЕНИМ ВМІСТОМ ДОМІШОК КРЕМНІЮ ПІСЛЯ ЛИТВА В КОКІЛЬ ТА ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

### Вступ

Відмінною характеристикою ливарних сплавів системи Al–Mg є висока корозійна стійкість, пластичність, в'язкість і достатня зварюваність. Дані сплави використовуються в суднобудуванні та інших галузях для отримання деталей, які працюють у вологій атмосфері, в прісній і морській воді [1–3]. Головною шкідливою домішкою цієї групи сплавів, що знижує рівень механічних властивостей, є кремній. Але, незважаючи на це, домішки кремнію вводять в окремі сплави системи Al–Mg (такі, як АМг7, АМг11) з метою поліпшення ливарних властивостей – підвищення рідиннотекучості та зниження схильності сплавів до утворення гарячих тріщин під час кристалізації [2, 4, 5].

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

Для встановлення можливості отримання із сплаву АМгбл, який містить у собі підвищену кількість домішок кремнію, зразків з високим рівнем механічних властивостей потрібно детально дослідити вплив кремнію на фазово-структурний склад і механічні властивості даного сплаву.

### Постановка задачі

Мета даної статті – дослідити вплив домішок кремнію вмістом до 2 % на формування фазового складу, структури і механічні властивості ливарного сплаву АМгбл після литва в кокіль та термічної обробки.

### Методика досліджень

Об'єкт дослідження – ливарний сплав АМгбл. Хімічний склад сплаву змінювався 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 вводилась домішка кремнію, з використанням подвійної алюмінієвої лігатури, вмістом від 0,1 до 2 %.

Плавки проводились у лабораторній печі опору в графітошамотному тиглі. Використовувались шихтові матеріали: алюміній марки А99, лігатури Al–Mg, Al–Zr, Al–Be, Al–Ti, Al–Si. У тиглі розплавлялись алюміній та лігатура Al–Be, після чого при температурі 690 °C вводили лігатури Al–Zr, Al–Ti, Al–Si. Після розплавлення шихтових матеріалів і перемішування розплаву вводилась лігатура Al–Mg. При температурі 700 °C проводилось 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 розливався в металеву виливницю. На отриманих стандартних зразках діаметром 10 мм визначались механічні властивості досліджуваних сплавів (тимчасовий опір розриву, межа текучості, відносне подовження). Випробування механічних властивостей проводилось на розривній машині TIRA-TEST за стандартними методиками. Середні квадратичні відхилення значень механічних властивостей становили  $\sigma_b - \pm 20$  МПа,  $\sigma_{0,2} - \pm 10$  МПа,  $\delta - \pm 15$  %. Мікрорентгеноспектральний аналіз проводився з використанням растрового електронного мікроскопа РЕММА-101А, а хімічний аналіз зразків даних сплавів – з використанням методу оптичної спектроскопії випаровуючим розрядом. Якісний і кількісний металографічний аналіз було виконано на мікроскопі NEOFOT-31. Рентгенографічне дослідження відбувалось у Si-характеристичному випромінюванні із застосуванням дифрактометра ДРОН-413.

### Експериментальна частина

На першому етапі досліджень було встановлено вплив домішок кремнію на фазово-структурний склад і механічні властивості сплаву АМгбл після литва в кокіль.

За даними рентгенофазового, рентгеноспектрального і термічного аналізів встановле-

но, що структура сплаву АМгбл після литва складається з  $\alpha$ -твердого розчину та двох евтектик (табл. 1). Хімічний склад фаз, що утворюються в досліджуваному сплаві при кристалізації, наведено в табл. 2.

Експериментальні дослідження показали, що під час нерівноважної кристалізації досліджуваного сплаву першими кристалізуються зерна алюмінієвого твердого розчину, потім – подвійна евтектика  $\alpha_{Al} + Mg_2Si$ , а 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 у сплаві є потрійна евтектика  $\alpha_{Al} + \beta(Al_3Mg_2) + Mg_2Si$ .

Таблиця 1. Фазові перетворення у сплаві АМгбл при кристалізації

Но- мер реак- ції	Перетворення при кристалізації	Температура перетворень, °C		
		$T_1$	$T_2$	$T_3$
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 у сплаві АМгбл

Формула фази	Al, %	Si, %	Mg, %
$\beta(Al_3Mg_2)$	62–65	–	35–38
$Mg_2Si$	–	38	62

На рис. 1 показано структури сплаву АМгбл, на яких наявні фази кристалізаційного походження, що виділяються по границях зерен або дендритних комірок. На рис. 1, а наведено морфологічні особливості виділень фази  $\beta(Al_3Mg_2)$ , а на рис. 1, б – фази  $Mg_2Si$ .

Згідно з даними, наведеними в табл. 3, підвищення вмісту кремнію з 0,03 до 2 % у сплаві АМгбл 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 ( $T_3$  – температу-

ра нерівноважного солідусу) евтектичної реакції  $\alpha_{Al} + \beta(Al_3Mg_2) + Mg_2Si$  на 3 °С.

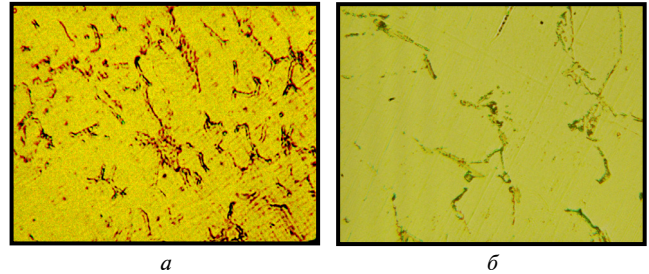


Рис. 1. Мікроструктура сплаву АМгбл після литва в кокіль; а, б –  $\times 200$

При вмісті кремнію в досліджуваному сплаві 0,03 % інтервал кристалізації даного сплаву становить 172 °С, в міру збільшення вмісту кремнію цей інтервал зменшується і при вмісті кремнію 2 % становить 160 °С (табл. 3). Це зумовлює підвищення ливарних властивостей сплаву (підвищення рідкотекучості і зменшення схильності до утворення гарячих тріщин).

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

Si, %	Температура перетворень, °C			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	$\alpha_{Al}, \beta(Al_3Mg_2), Mg_2Si$
1,5	607	577	447	$\alpha_{Al}, \beta(Al_3Mg_2), Mg_2Si$
2,0	604	581	447	$\alpha_{Al}, \beta(Al_3Mg_2), Mg_2Si$

Згідно з даними металографічного і мікрорентгеноспектрального аналізів, при вмісті в сплаві АМгбл кремнію до 0,05 % кремнійвмісних фаз не утворюється. У концентраційному інтервалі (0,06–2) % Si в досліджуваному сплаві з'являється нова фаза –  $Mg_2Si$  (див. табл. 3).

Встановлено, що при збільшенні вмісту кремнію у сплаві АМгбл зростає кількість виділень частинок фази  $Mg_2Si$  (рис. 2). Також спостерігається укрупнення розмірів цих виділень та зростає розгалуженість частинок фази  $Mg_2Si$  (рис. 3).

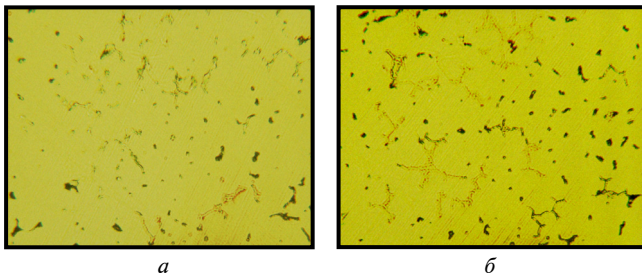


Рис. 2. Вплив кремнію на мікроструктуру сплаву АМгбл після литва в кокіль; *a, б* –  $\times 400$

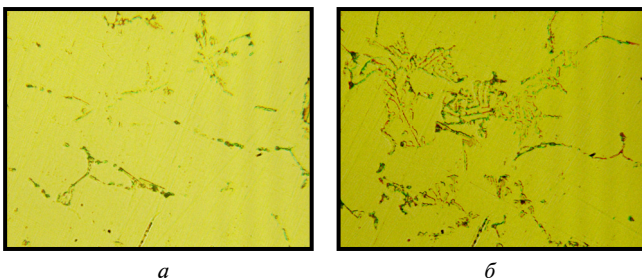


Рис. 3. Вплив кремнію на мікроструктуру сплаву АМгбл після литва в кокіль; *a* – 0,5 %Si; *б* – 2 %Si; *a, б* –  $\times 400$

Встановлено вплив домішок кремнію вмістом до 2 % на механічні властивості сплаву АМгбл після литва в кокіль. Разом з домішками кремнію у сплаві АМгбл змінювали вміст магнію від 6 до 7 % (даний концентраційний інтервал відповідає вимогам державного стандарту до вмісту магнію в сплаві).

Сумісний вплив магнію і кремнію на механічні властивості сплаву АМгбл після литва в кокіль наведено в табл. 4. З даних цієї таблиці можна зробити висновок, що при збільшенні вмісту магнію в досліджуваному сплаві з 6 до 7 % (в межах, встановлених державним стандартом) і при постійному вмісті кремнію відбувається незначне підвищення міцності сплаву АМгбл та істотне зниження рівня пластичності.

Зростання міцності сплаву АМгбл при збільшенні вмісту в ньому магнію можна пояснити підвищенням легованості алюмінієвого твердого розчину, а зниження пластичності досліджуваного сплаву із вмістом магнію 7 % можна пояснити збільшенням кількості крихкої  $\beta$ -фази, яка виділяється по границях зерен.

При збільшенні вмісту домішок кремнію в досліджуваному сплаві до 0,5 % (при постійному вмісті магнію) спостерігається незначне зниження міцності і пластичності сплаву. Подальше збільшення вмісту кремнію істотно знижує рівень механічних властивостей сплаву АМгбл, особливо пластичність. Зниження міцності спла-

ву при збільшенні вмісту в ньому кремнію відбувається за рахунок зменшення вмісту магнію в алюмінієвому твердому розчині (частина магнію зв'язується у фазу  $Mg_2Si$ ), а істотне зниження пластичності можна пояснити збільшенням кількості фази  $Mg_2Si$  (яка розташовується по границях зерен) та її укрупненням.

Таблиця 4. Вплив магнію і кремнію на механічні властивості сплаву АМгбл після литва в кокіль

Масовий вміст компонентів, %		Механічні властивості	
Mg	Si	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
6	0,1	225	6,8
6	0,5	221	6,4
6	1	210	4,4
6	1,5	204	3,4
6	2	193	2,7
6,5	0,1	230	6,5
6,5	0,5	224	6,0
6,5	1	219	4,3
6,5	1,5	214	3,3
6,5	2	205	2,5
7	0,1	234	6,3
7	0,5	227	5,7
7	1	220	3,6
7	1,5	215	2,9
7	2	211	2,2

Встановлено оптимальне співвідношення вмісту магнію і кремнію у сплаві АМгбл, яке забезпечує рівень механічних властивостей досліджуваного сплаву після литва в кокіль на рівні, не нижчому від вимог державного стандарту до даного сплаву. Пошук оптимального хімічного складу сплаву АМгбл проводився при виконанні таких умов:

1) рівень механічних властивостей досліджуваного сплаву має відповідати вимогам державного стандарту до даного сплаву;

2) враховуючи той факт, що корозійна стійкість досліджуваного сплаву зростає при зменшенні вмісту магнію в сплаві, слід шукати оптимальний склад досліджуваного сплаву з мінімальним вмістом магнію, але в межах, які допускає державний стандарт для даного сплаву;

3) потрібно встановити оптимальний хімічний вміст сплаву з максимально підвищеним вмістом домішок кремнію. Це розширює можливості використання лому і відходів алюмінієвих сплавів для виробництва сплаву

АМгбл, що буде сприяти зниженню його собівартості.

При виконанні названих умов оптимальний склад сплаву АМгбл, який використовується після литва в кокіль, перебуває в межах, які вказані в табл. 5. Механічні властивості досліджуваного сплаву із встановленим оптимальним хімічним складом наведено в табл. 6.

Згідно з вимогами ДСТУ 2839–94, сплав АМгбл після литва в кокіль повинен мати рівень механічних властивостей не нижче  $\sigma_b = 216$  МПа і  $\delta = 6$  %. Аналізуючи дані, отримані за допомогою методу багатокритеріальної оптимізації, можна зробити висновок, що вимогам державного стандарту до рівня механічних властивостей досліджуваного сплаву відповідають, зокрема, сплави із вмістом магнію (6–6,5) % та вмістом кремнію до 0,5 % включно.

Таблиця 5. Оптимальний склад сплаву АМгбл

Марка сплаву	Масова частка основних компонентів, %	
	Mg	Si
	Для сплаву, що використовується після литва	
АМгбл	6–6,5	0,5
	Хімічний склад сплаву згідно з ДСТУ 2839–94	
Мгбл	6 – 7	До 0,2

Таблиця 6. Механічні властивості сплаву АМгбл

Марка сплаву	Спосіб литва	Вид термічної обробки	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
	Дані згідно з ДСТУ 2839–94			
АМгбл	К	–	216	6
	Властивості сплаву АМгбл оптимального складу			
АМгбл	К	–	217–224	6,0–6,4

Вплив кремнію і магнію на механічні властивості сплаву АМгбл після литва в кокіль і термічної обробки за режимом Т4 наведено в табл. 7.

З наведених у табл. 7 даних можна зробити висновок, що при збільшенні вмісту домішок кремнію в досліджуваному сплаві до 0,5 % (і при постійному вмісті магнію) спостерігається незначне зниження міцності та пластичності сплаву. Подальше збільшення вмісту кремнію істотно знижує рівень механічних властивостей сплаву АМгбл, особливо пластичність.

Таблиця 7. Вплив кремнію і магнію на механічні властивості сплаву АМгбл після термічної обробки за режимом Т4

Масовий вміст компонентів, %		Механічні властивості	
Mg	Si	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
6	0,1	254	9,3
6	0,5	241	8,9
6	1	235	8,2
6	1,5	226	7,6
6	2	219	5,7
6,5	0,1	266	10,2
6,5	0,5	260	9,6
6,5	1	242	7,4
6,5	1,5	233	5,9
6,5	2	220	5,3
7	0,1	282	11,7
7	0,5	259	8,6
7	1	237	5,8
7	1,5	232	5,2
7	2	227	4,9

При збільшенні вмісту магнію в досліджуваному сплаві (в межах, встановлених державним стандартом) і при постійному вмісті кремнію відбувається незначне підвищення міцності сплаву АМгбл, але істотно знижується пластичність сплаву. Особливо велике зниження рівня відносного видовження спостерігається при вмісті магнію 7 %.

Згідно з вимогами ДСТУ 2839–94, сплав АМгбл після термічної обробки за режимом Т4 повинен мати рівень механічних властивостей не нижче від  $\sigma_b = 230$  МПа і  $\delta = 6$  %. Аналізуючи дані, наведені в табл. 7, можна зробити висновок, що вимогам державного стандарту до рівня механічних властивостей досліджуваного сплаву відповідають, зокрема, сплави із вмістом магнію (6–6,5) % і вмістом кремнію до 1 % включно. Зниження пластичності даних сплавів із вмістом магнію 7 % можна пояснити збільшенням кількості крихкої  $\beta$ -фази по границях зерен, яку не вдається розчинити в твердому розчині під час термічної обробки. Зниження рівня відносного видовження при збільшенні вмісту кремнію в сплаві АМгбл можна пояснити зростанням кількості фази  $Mg_2Si$  та укрупненням її розмірів.

## Висновки

Домішки кремнію вмістом до 2 % впливають на фазовий склад, структуру і механічні

властивості сплаву АМгбл, який використовується як після литва в кокіль, так і після термічної обробки.

Для даного сплаву, який використовується після литва в кокіль, можна підвищити вміст домішок кремнію з 0,2 до 0,5 % при збереженні рівня механічних властивостей, згідно з вимогами державного стандарту, при умові, що вміст магнію у сплаві перебуває в межах 6–6,5 %. Для досліджуваного сплаву, що використовується після литва в кокіль і наступної термічної обробки (за режимом Т4), можна підвищити

вміст домішок кремнію з 0,2 до 1 % при збереженні рівня механічних властивостей згідно з вимогами ДСТУ 2839–94 при умові, що вміст магнію в сплаві перебуває в межах 6–6,5 %.

Перспективність подальших досліджень у даному напрямку полягає у встановленні можливості знаходження оптимального вмісту кремнію в сплаві АМгбл з метою підвищення його технологічних властивостей. Це дасть змогу розширити область використання даного сплаву в промисловості.

А.А. Кулинич

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВА АМгбл С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ПРИМЕСЕЙ КРЕМНИЯ ПОСЛЕ ЛИТЬЯ В КОКИЛЬ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Исследовано влияние примесей кремния содержанием до 2 % на фазовоструктурный состав сплава АМгбл после литья в кокиль и термической обработки. Установлено, что для сплава АМгбл, используемого после литья в кокиль, можно повысить содержание примесей кремния с 0,2 до 0,5 % при сохранении высокого уровня механических свойств, когда содержание магния в сплаве находится в пределах 6–6,5 %. Для сплава АМгбл, используемого после термической обработки, можно повысить содержание примесей кремния с 0,2 до 1 % при сохранении высокого уровня механических свойств, когда содержание магния в сплаве находится в пределах 6–6,5 %.

A.A. Kylinich

THE SPECIFICITY OF FORMING THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF АМгбл ALLOY WITH THE ENHANCED CONTENT OF SILICON ADMIXTURES AFTER CASTING AND HEAT TREATMENT

This paper studies the influence of silicon admixtures with the content up to 2 % on the phase-structural composition of АМгбл alloy after casting in the metallic form and heat treatment. Through experiments performed, we determine that it is possible to increase the content of silicon admixtures from 0,2 to 0,5 % for the АМгбл alloy used after casting in the metallic form. It can be increased under the conditions of conserving a high level of mechanical properties when the magnesium content in an alloy is within the limits of 6–6,5 %. Moreover, it is possible to increase the content of silicon admixtures from 0,2 to 1 % for the АМгбл alloy used after the heat treatment. It can also be increased solely under the conditions of conserving a high level of mechanical properties when the magnesium content in an alloy is within the limits of 6–6,5 %.

1. *Машиностроение*. Энциклопедия. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы. Т. II / Под общ. ред. И.Н. Фридляндера. – М.: Металлургия, 2001. – 880 с.
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. *Колобнев И.Ф.* Жаропрочность литейных алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1973. – 320 с.
5. *Кулинич А.А., Гаврилюк В.П., Рябініна О.О., Доній О.М.* Фазовоструктурний 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.

Рекомендована Радою  
інженерно-фізичного факультету  
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції  
6 листопада 2009 року