

УДК 661.74:669.14.046.554

Кулініч А. А.

## МЕХАНІЧНІ ТА ЛИВАРНІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВУ АМгбл З ДОМІШКАМИ КРЕМНІЮ

До переваг ливарних сплавів системи Al-Mg можна віднести високу корозійну стійкість, пластичність, в'язкість, добру зварюваність. Дані сплави використовуються в суднобудуванні та інших галузях для отримання деталей які працюють у вологій атмосфері, в прісній і морській воді [1–4].

Кремній 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, не зважаючи на зниження рівня механічних властивостей. [1, 2].

Типовий сплав даної системи – АМгбл 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.

Метою роботи є встановлення можливості отримання зі сплаву АМгбл, який містить підвищену кількість домішок кремнію, зразків з високим рівнем механічних і ливарних властивостей.

Об'єкт дослідження в даній роботі – ливарний сплав АМгбл. 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 добавки кремнію, з використанням подвійної алюмінієвої лігатури, вмістом від 0,1 до 2,0 %.

Плавлення 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. Останньою вводили лігатуру Al-Mg, витримували та перемішували розплав і розливали його в металеву виливницю. На отриманих зразках вимірювали механічні властивості при кімнатних і підвищених температурах за стандартними методиками.

Мікрорентгеноспектральний аналіз проводили з використанням растрового електронного мікроскопу РЕММА – 101А. Хімічний аналіз зразків досліджуваних 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.

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 та 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.

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

$\alpha_{Al} + \beta(Al_3Mg_2) + Mg_2Si$  (табл. 1). Металографічні дослідження, в поєднанні з мікрорентгено-спектральним аналізом показали, що основною за кількістю евтектикою в сплаві є потрійна евтектика  $\alpha_{Al} + \beta(Al_3Mg_2) + Mg_2Si$ .

Таблиця 1

## Фазові перетворення в сплаві АМгбл при кристалізації

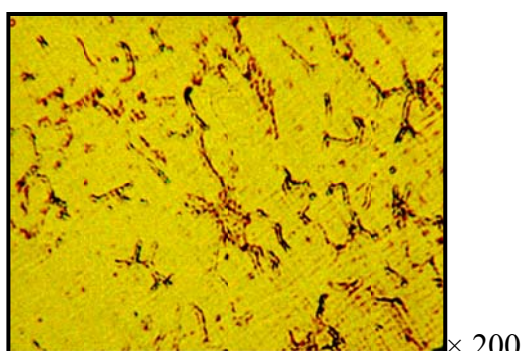
Номер реакції	Перетворення при кристалізації	Температура перетворень, °С		
		T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
1	P → $\alpha_{Al}$	620	–	–
2	P → $\alpha_{Al} + Mg_2Si$	–	548	–
3	P → $\alpha_{Al} + \beta(Al_3Mg_2) + Mg_2Si$	–	–	450

Таблиця 2

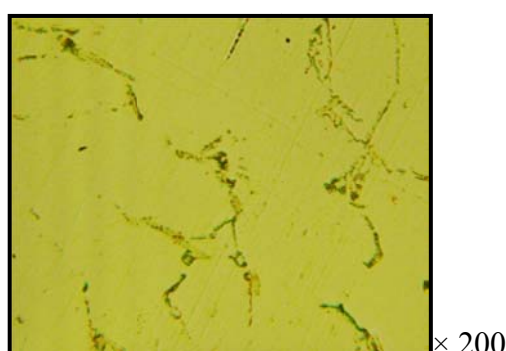
## Хімічний склад надлишкових фаз в сплаві АМгбл

Формула фази	Al, %	Si, %	Mg, %
(Al <sub>3</sub> Mg <sub>2</sub> )	62–65	–	35–38
Mg <sub>2</sub> Si	–	38	62

На рис. 1 наведено структури сплаву АМгбл на яких наявні фази кристалізаційного походження які 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<sub>2</sub>Si.



а



б

Рис. 1. Мікроструктура сплаву АМгбл після лиття в кокіль:  
а – фази  $\beta(Al_3Mg_2)$ ; б – фази Mg<sub>2</sub>Si

Згідно даним наведеним в табл. 3, підвищення вмісту кремнію з 0,03 до 2,0 % в сплаві АМгбл впливає на зниження температури початку кристалізації даного сплаву (T<sub>1</sub> – температура ліквідусу) на 18 °С, підвищення температури (T<sub>2</sub>) евтектичної реакції  $\alpha_{Al} + Mg_2Si$  на 39 °С, зниження температури (T<sub>3</sub> – 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, по мірі збільшення вмісту кремнію інтервал кристалізації сплаву АМгбл зменшується і при вмісті кремнію 2,0 % становить 160 °С (табл. 3). 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 АМгбл кремнію до 0,05 %, кремній містких фаз не утворюється. В концентраційному інтервалі (0,06–2,0) % Si, в досліджуваному сплаві з'являється нова фаза – Mg<sub>2</sub>Si (табл. 3).

Таблиця 3

Вплив кремнію на фазовий склад сплаву АМгбл та на температуру фазових перетворень при кристалізації

Si, %	Температура перетворень, °С			Фазовий склад сплаву
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	
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	$\alpha_{Al}, \beta(Al_3Mg_2), Mg_2Si$

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

Встановлено вплив домішок кремнію вмістом до 2,0 % на механічні властивості сплаву АМгбл після лиття в кокіль. Разом з домішками кремнію, в сплаві АМгбл змінювали вміст магнію від 6,0 до 7,0 % (даний концентраційний інтервал відповідає вимогам державного стандарту до вмісту магнію в даному сплаві).

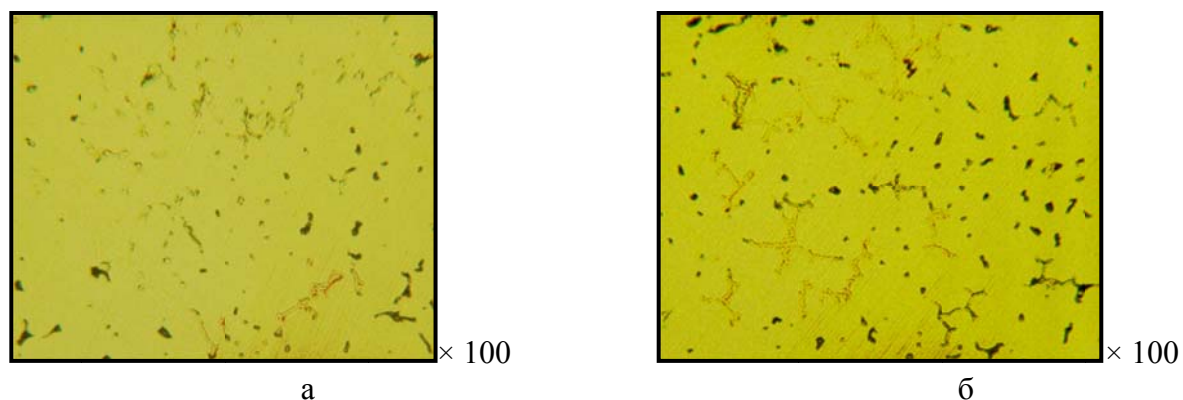


Рис. 2. Вплив кремнію на мікроструктуру сплаву АМгбл після лиття в кокіль: а – 0,5 % Si; б – 2,0 % Si

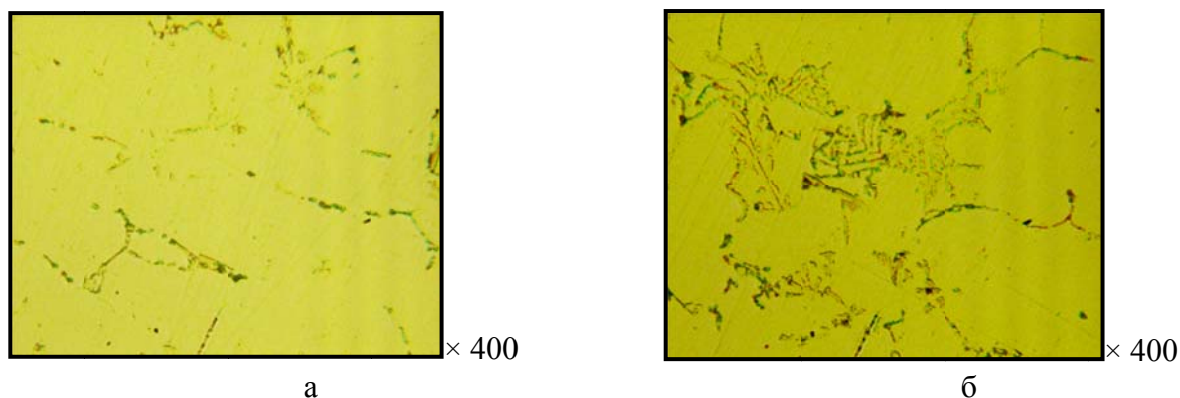


Рис. 3. Вплив кремнію на мікроструктуру сплаву АМгбл після лиття в кокіль: а – 0,5 % Si; б – 2,0 % Si

Сумісний вплив магнію і кремнію на механічні властивості сплаву АМгбл після лиття в кокіль наведено в табл. 4.

З наведених в табл. 4 даних можна зробити висновок, що при збільшенні вмісту магнію в досліджуваному сплаві з 6,0 до 7,0 % (в межах встановлених державним стандартом) та при постійному вмісті кремнію відбувається незначне підвищення міцності сплаву АМгбл та суттєве 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 з вмістом магнію 7,0 % можна пояснити збільшенням кількості крихкої  $\beta$  – фази, яка виділяється по границях зерен.

Таблиця 4

Вплив магнію і кремнію на механічні властивості сплаву АМгбл після лиття в кокіль

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

При збільшенні вмісту домішок кремнію в досліджуваному сплаві до 0,5 % (при постійному вмісті магнію) спостерігається незначне зниження міцності та пластичності сплаву. Подальше збільшення вмісту кремнію суттєво знижує рівень механічних властивостей сплаву АМгбл, особливо пластичність. Зниження міцності сплаву, при збільшенні вмісту в ньому кремнію, відбувається за рахунок зменшення вмісту магнію в алюмінієвому твердому розчині (частина магнію зв'язується в фазу  $Mg_2Si$ ), а суттєве зниження пластичності можна пояснити збільшенням кількості фази  $Mg_2Si$  (яка розташовується по границях зерен) та її укрупненням.

Встановлено оптимальне співвідношення вмісту магнію і кремнію в сплаві АМгбл яке забезпечує рівень механічних властивостей досліджуваного сплаву після лиття в кокіль на рівні не нижчому ніж вимоги державного стандарту до даного сплаву.

Пошук оптимального хімічного складу сплаву АМгбл проводили при виконанні наступних умов:

1. рівень механічних властивостей досліджуваного сплаву повинен відповідати вимогам державного стандарту до даного сплаву;

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

3. потрібно встановити оптимальний хімічний склад сплаву з максимально підвищеним вмістом домішок кремнію. Це розширює можливості використання лому і відходів алюмінієвих сплавів для виробництва сплаву АМгбл, що буде сприяти зниженню собівартості виробництва сплаву.

При виконанні цих умов, оптимальний склад сплаву АМгбл, який використовується після лиття в кокіль, знаходиться в межах, які вказані в табл. 5. Механічні властивості досліджуваного сплаву з встановленим оптимальним хімічним складом наведено в табл. 6.

Таблиця 5

Оптимальний хімічний склад сплаву АМгбл

Марка сплаву	Масова частка основних компонентів, %	
	Mg	Si
АМгбл	Для сплаву, що використовується після лиття	
	6,0 – 6,5	0,5
	Хімічний склад сплаву згідно ДСТУ2839 – 94	
	6,0 – 7,0	До 0,2

Таблиця 6

Механічні властивості сплаву АМгбл

Марка сплаву	Спосіб лиття	Вид термічної обробки	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
Дані згідно ДСТУ2839-94				
АМгбл	К	–	220	6,0
Властивості сплаву АМгбл оптимального складу				
АМгбл	К	–	221 – 224	6,0 – 6,4

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

Встановлено, що в досліджуваному сплаві з вмістом магнію 6,0–6,5 % і кремнію 0,4–0,5 % спостерігається підвищення ливарних властивостей (табл. 7). Даний факт можна пояснити тим, що за рахунок збільшення вмісту кремнію у сплаві АМгбл до 0,4 – 0,5 % зростає кількість евтектик  $\alpha_{Al} + Mg_2Si$  та  $\alpha_{Al} + \beta(Al_3Mg_2) + Mg_2Si$  які і відповідають за зростання рівня ливарних властивостей сплаву (збільшується рідкотекучість і знижується показник гарячеламкості).

Таблиця 7

Ливарні властивості сплаву АМгбл з різним вмістом магнію і кремнію

Mg, %	Si, %	Рідкотекучість при 700 °С (пруткова проба), мм	Гарячеламкість (ширина кільця), мм
1	2	3	4
6,0	0,15	264,0	15,0
6,0	0,4	290,0	12,5
6,0	0,5	294,0	12,5
6,5	0,15	264,0	15,0
6,5	0,4	293,0	12,5

Продовження табл. 7

1	2	3	4
6,5	0,5	295,0	12,5
7,0	0,15	264,0	15,0
7,0	0,4	294,0	12,5
7,0	0,5	295,0	12,5

Суттєво впливають добавки кремнію і на жароміцність сплаву АМгбл. За стандартною методикою вимірювались: величина  $\sigma_{100}^{150}$  – границя тривалої міцності сплаву АМгбл з різним вмістом кремнію за 100 г випробувань при температурі 150 °С, а також час руйнування зразків досліджуваного сплаву при навантаженні 130 МПа і температурі 150 °С (табл. 8).

Таблиця 8

Вплив кремнію на жароміцність сплаву АМгбл

№	Si, %	Тривала міцність $\sigma_{100}^{150}$ , МПа	Час руйнування, год. (при навантаженні 130 МПа і температурі 150 °С)
1	0,1	120	36
2	0,2	120	45
3	0,3	120	59
4	0,4	130	73
5	0,5	130	86

Згідно даним наведеним в табл. 8, для сплаву АМгбл підвищення вмісту кремнію з 0,1–0,2 % до 0,4–0,5 % дозволяє підвищити тривалу міцність  $\sigma_{100}^{150}$  на 10 МПа, а час руйнування (при навантаженні 130 МПа і температурі 150 °С) на 28–41 год.

### ВИСНОВКИ

Встановлено кількісний взаємозв'язок між вмістом кремнію та рівнем механічних і ливарних властивостей промислового сплаву АМгбл.

Показано, що для даного сплаву, який використовується після лиття в кокіль, можливо підвищити вміст домішок кремнію з 0,2 до 0,5 % при збереженні рівня механічних властивостей, відповідно вимогам державного стандарту, при умові що вміст магнію в сплаві знаходиться в межах 6,0–6,5 %. При цьому підвищується рівень ливарних властивостей сплаву.

Підвищення вмісту кремнію до 0,4–0,5 % впливає на зростання характеристик жароміцності сплаву АМгбл.

Перспектива подальших досліджень у даному напрямку полягає у встановленні впливу кремнію разом з іншими мікролегуючими добавками на рівень механічних і ливарних властивостей промислових сплавів системи Al-Mg.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Постников Н. С. Коррозионностойкие алюминиевые сплавы / Н. С. Постников – М. : Металлургия, 1976. – 303 с.
2. Колобнев И. Ф. Жаропрочность литейных алюминиевых сплавов / И. Ф. Колобнев – М. : Металлургия, 1973. – 320 с.
3. Машиностроение. Энциклопедия. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы. Т. II / под общ. ред. И. Н. Фридляндера. – М. : Металлургия, 2001. – 880 с.
4. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Л. Ф. Мондольфо – М. : Металлургия, 1979. – 640 с.

Стаття надійшла до редакції 16.02.2015 р.