

## ВПЛИВ БЕРИЛІЮ НА СТРУКТУРУ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЛИВАРНОГО СПЛАВУ СИСТЕМИ Al – Mg

*Исследовано влияние примесей железа, кремния и бериллия на фазовый состав, структуру и механические свойства сплава АМгбл после литья в кокиль. Установлено, что можно повысить содержание примесей железа и кремния в исследуемом сплаве с 0,2 до 0,5 % каждого при условии повышения содержания бериллия в данном сплаве до (0,25 – 0,3) %. При выполнении этого условия уровень механических свойств сплава АМгбл будет соответствовать требованиям государственного стандарта к этому сплаву.*

*Influencing of admixtures of iron is investigational, silicon and beryllium on phase composition, structure and mechanical properties of alloy of АМгбл after casting. It is set that it is possible to promote maintenance of admixtures of iron and silicon in the explored alloy from 0,2 to 0,5 % each on condition of increase of maintenance of beryllium in this alloy to (0,25 – 0,3) %. At implementation of this condition the level of mechanical properties of alloy of АМгбл will conform to requirements of state standard to this alloy.*

### Вступ

Ливарні сплави системи Al – Mg характеризуються високим рівнем корозійної стійкості, пластичності, в'язкості. Сплав АМгбл є типовим сплавом даної системи і використовується в суднобудуванні та інших отраслях для отримання деталей які працюють у вологій атмосфері, в пресній і морській воді [1 – 3]. В даному сплаві, згідно ДСТУ 2839 – 94, вміст домішок заліза і кремнію не повинен перевищувати 0,2 % кожного. Але, якщо використовувати для виробництва даного сплаву технічний алюміній, лом і відходи алюмінієвих сплавів, з метою зниження собівартості його виробництва, можливе підвищення вмісту в сплаві АМгбл домішок заліза і кремнію.

Головною шкідливою домішкою даної групи сплавів, що знижує рівень механічних властивостей, є кремній. Але, не зважаючи на зазначене, 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 горячих тріщин під час кристалізації [2, 4].

Одним з засобів нейтралізації шкідливого впливу домішок заліза є мікролегування сплавів. Так, в ливарних алюмінієвих сплавах при мікролегуванні їх берилієм, замість фази FeAl<sub>3</sub>, можливо утворення більш компактної, глобулярної фази Al<sub>4</sub>Fe<sub>2</sub>Be<sub>5</sub>, яка менш інтенсивно знижує рівень механічних властивостей сплавів [4, 5].

Для встановлення можливості отримання зі сплаву АМгбл, який містить підвищену кількість домішок заліза і кремнію, зразків з високим рівнем механічних властивостей, потрібно детально дослідити вплив даних домішок та добавок берилію на фазовий склад, структуру і механічні властивості даного сплаву.

### Постановка завдання

В даній роботі досліджується вплив добавок берилію на фазовий склад, структуру та механічні властивості ливарного сплаву АМгбл з підвищеним вмістом заліза і кремнію з метою виявлення можливостей підвищення вмісту заліза в ливарних сплавах системи Al – Mg без суттєвого зниження рівня їх механічних властивостей.

Відповідно, мета роботи – дослідити вплив добавок берилію вмістом до 0,5 % на фазовий склад, структуру та рівень механічних властивостей ливарного сплаву АМгбл з вмістом домішок заліза і кремнію до 1,0 % кожного після лиття в кокиль.

### Методика досліджень

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 %. Додатково вводили домішки заліза і кремнію, з використанням подвійної алюмінієвої лігатури, вмістом до 1,0 % кожного.

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 – Fe, Al – Si. В тиглі розплавляли алюміній та лігатуру Al – Be. Після їх розплавлення, при температурі 690 °С, вводили лігатури Al – Zr, Al – Ti, Al – Fe, 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<sub>2</sub>·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 подовження).

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

Середні квадратичні відхилення значень механічних властивостей знаходились в межах:  $\sigma_b - \pm 20$  МПа,  $\sigma_{0,2} -$

$\pm 10$  МПа,  $\delta - \pm 15$  %.

Мікрорентгеноспектральний аналіз проводили з використанням растрового електронного мікроскопу REMMA – 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  $\text{Cu}$  –характеристичному випромінюванні з застосуванням дифрактометру ДРОН – 413.

#### Експериментальна частина

На першому етапі досліджень встановлено вплив домішок заліза і кремнію вмістом до 1,0 % кожного на фазовий склад, структуру та механічні властивості сплаву АМгбл після лиття в кокіль.

За даними рентгенофазового, рентгеноспектрального та термічного аналізів фазовий склад досліджуваного сплаву після лиття в кокіль складається з алюмінієвого твердого розчину ( $\alpha_{\text{Al}}$ ) та фаз  $\beta(\text{Al}_3\text{Mg}_2)$ ,  $\text{FeAl}_3$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ .

Хімічний склад фаз, що утворюються в досліджуваному сплаві при кристалізації, наведено в табл. 1. Мікроструктуру сплаву АМгбл після лиття в кокіль наведено на рис. 1.

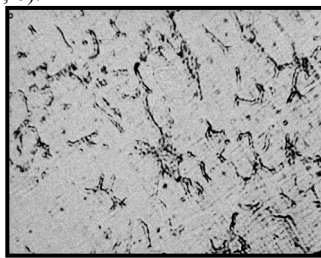
Таблиця 1

Хімічний склад надлишкових фаз в сплаві АМгбл

Формула фази	Fe	Mg	Si
$(\text{Al}_3\text{Mg}_2)$	-	35-38	-
$\text{FeAl}_3$	38-40	-	-
$\text{Mg}_2\text{Si}$	-	62	38

Примітка – інше алюміній

Структура сплаву АМгбл після лиття в кокіль складається з зерен алюмінієвого твердого розчину та виділень часток фази  $\beta(\text{Al}_3\text{Mg}_2)$ , які розташовуються по границях зерен або дендритних комірок (рис. 1, а). Також, в структурі присутні частки фази  $\text{FeAl}_3$ , які мають пластинчасту форму і розташовуються в середині зерен або перетинають їх границі та частки фази  $\text{Mg}_2\text{Si}$  (що мають розгалужену морфологію) які розташовані по межах зерен або дендритних комірок (рис. 1, б).



а



б

Рис. 1 Мікроструктура сплаву АМгбл з домішками заліза і кремнію після лиття в кокіль. а, б – X 500

Залежність механічних властивостей сплаву АМгбл від вмісту домішок заліза і кремнію після лиття в кокіль наведено в табл. 2. З даної таблиці видно, що при збільшенні сумарного вмісту заліза і кремнію в даному сплаві з 0,1 до 2,0 % спостерігається суттєве зниження рівня його механічних властивостей, особливо пластичності. Так при підвищенні сумарного вмісту заліза і кремнію з 0,1 % до 2,0 % значення тимчасового опору розриву сплаву АМгбл знижується на 37 МПа (з 248 до 211 МПа), а значення відносного видовження знижуються в 3,0 рази (з 12,0 до 3,8 %).

Таблиця 2

Вплив домішкових компонентів на механічні властивості сплаву АМГбл

Вміст домішок, %		Механічні властивості	
Si	Fe	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta$ , %
0,05	0,05	248	12
0,2	0,2	230	8
0,5	0,5	217	5,6
1	1	211	3,8

На другому етапі досліджень встановлено вплив берилію на фазовий склад, структуру та механічні властивості сплаву АМгбл з домішками заліза (0,5 %) і кремнію (0,5 %). Вміст домішок заліза і кремнію в даному сплаві обмежено по 0,5 % кожного з метою збереження високого рівня механічних властивостей досліджуваного сплаву. Як показано вище, це є максимальний вміст домішок заліза і кремнію при якому рівень механічних властивостей сплаву АМгбл наближається до рівня механічних властивостей даного сплаву встановленого державним стандартом. Вміст магнію в сплаві змінювали в межах 6,0 – 6,5 %.

Згідно даним рентгеноструктурного аналізу при вмісті кремнію 0,5 % в сплаві АМгбл з домішками заліза 0,5 % утворюється лише одна кремніймістка фаза –  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . Таким чином, можна зробити висновок, що в даному сплаві кремній не утворює надлишкових фаз разом з залізом і берилієм.

Згідно даним мікрорентгеноспектрального аналізу хімічний склад та формула залізомістких фаз, що утворюються в сплаві АМгбл з домішками заліза вмістом 0,5 %, кремнію 0,5 % і берилію вмістом від 0,05 до 0,5 % наведено в табл. 3. Залежність виду залізомістких фаз від вмісту берилію в сплаві АМгбл наведено в табл. 4.

З даних наведених в табл. 3 і 4 видно, що в досліджуваному сплаві при вмісті заліза 0,5 % і берилію від 0,05 до 0,5% від маси сплаву можливе утворення трьох залізомістких фаз:  $FeAl_3$ ,  $Al_4Fe_2Be_5$ ,  $AlFeBe_4$ .

Встановлено вплив співвідношення вмісту заліза і берилію на фазовий склад та структуру досліджуваного сплаву:

1. В сплаві АМгбл, при відсутності берилію, утворюється лише одна залізомістка фаза –  $FeAl_3$ . Фазовий склад даного сплаву після лиття –  $\alpha$ -твердий розчин магнію в алюмінії, фази  $\beta(Al_3Mg_2)$ ,  $FeAl_3$  та  $Mg_2Si$ .

Таблиця 3

**Формула та хімічний склад залізомістких фаз в сплаві АМгбл з добавками берилію**

Хімічний склад фази, % мас.			Формула фази
Al	Fe	Be	
60 – 62	38 – 40	–	$FeAl_3$
39 – 42	39 – 41	19 – 20	$Al_4Fe_2Be_5$
23 – 28	39 – 42	33 – 35	$AlFeBe_4$

2. В досліджуваному сплаві, що додатково містить залізо у кількості 0,5 %, при вмісті берилію в межах  $0,05 \% \leq Be \leq 0,15 \%$ , також, утворюється лише одна залізомістка фаза –  $FeAl_3$ . Якщо в даному сплаві вміст берилію знаходиться в межах  $0,2 \% \leq Be \leq 0,3 \%$  крім фази  $FeAl_3$  (рис. 2, а), утворюється нова фаза -  $Al_4Fe_2Be_5$ , яка має невеликі розміри і компакту морфологію (рис. 2, б).

Таблиця 4

**Залізомісткі фази в сплаві АМгбл з добавками берилію**

Вміст добавок у сплаві, % мас.		Формула залізомісткої фази
Fe	Be	
0,5	–	$FeAl_3$
0,5	0,05	$FeAl_3$
0,5	0,1	$FeAl_3$
0,5	0,2	$FeAl_3, Al_4Fe_2Be_5$
0,5	0,3	$Al_4Fe_2Be_5$
0,5	0,4	$Al_4Fe_2Be_5, AlFeBe_4$
0,5	0,5	$AlFeBe_4$

3. При вмісті берилію в межах  $0,3 < Be < 0,5 \%$  утворюються фази  $Al_4Fe_2Be_5$  та  $AlFeBe_4$  (рис. 2, в). Фаза  $Al_4Fe_2Be_5$  має компакту морфологію, але її розміри дещо збільшуються, фаза  $AlFeBe_4$  характеризується великими розмірами і розгалуженою морфологією, що призведе до зниження рівня механічних властивостей, особливо пластичності (табл. 5). При збільшенні вмісту берилію з 0,3 % до 0,5 % кількість часток фази  $Al_4Fe_2Be_5$  зменшується, а кількість часток фази  $AlFeBe_4$  збільшується.

4. Встановлено, що для сплаву АМгбл, з домішками заліза у кількості 0,5 %, введення берилію у кількості 0,5 % (що відповідає співвідношенню  $Be/Fe = 0,5$ ) призведе до утворення однієї залізомісткої фази –  $AlFeBe_4$ . Дана фаза, порівняно з фазою  $Al_4Fe_2Be_5$ , має великі розміри і розгалужену морфологію, що впливає на зниження рівня механічних властивостей досліджуваного сплаву, особливо пластичності (табл. 5).

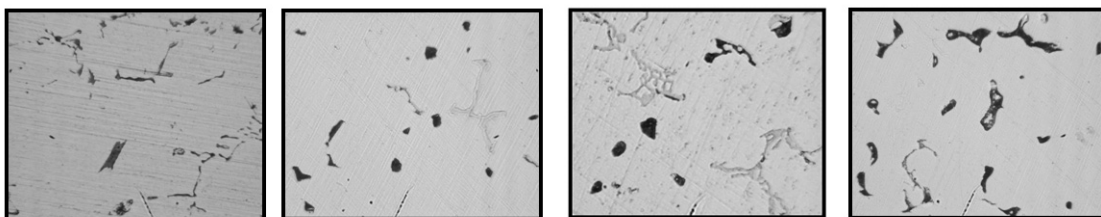


Рис. 2. Структура сплаву АМгбл з добавками заліза (0,05 %) та берилію: а – 0,07 % Ве; б – 0,25 % Ве; в – 0,4 % Ве; г – 0,5 % Ве. а, б, в, г – X 500

Таблиця 5

**Вплив берилію на механічні властивості сплаву АМгбл з домішками заліза і кремнію**

Вміст добавок у сплаві, % мас		Механічні властивості		Вид залізомісткої фази
Fe	Be	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	
0,5	0	217	5,6	–
0,5	0,05	217	5,7	$FeAl_3$
0,5	0,1	218	5,8	$FeAl_3$
0,5	0,2	219	5,9	$FeAl_3, Al_4Fe_2Be_5$
0,5	0,3	221	6,2	$Al_4Fe_2Be_5$
0,5	0,4	220	5,8	$Al_4Fe_2Be_5, AlFeBe_4$
0,5	0,5	218	5,7	$AlFeBe_4$

Для встановлення оптимального вмісту берилію в сплаві АМгбл, що містить домішки заліза і кремнію по 0,5 %, було побудовано математичні моделі залежності рівня механічних властивостей даного сплаву від вмісту добавок берилію. Для побудови квадратичних моделей використовували метод найменших квадратів.

Застосування методу багатокритеріальної оптимізації при аналізі побудованих моделей дозволило встановити оптимальний вміст берилію в сплаві АМгбл, який забезпечував би рівень механічних властивостей, що відповідає вимогам державного стандарту до даного сплаву.

Оптимальний вміст берилію в сплаві АМгбл, що додатково містить домішки заліза і кремнію по 0,5 %, знаходиться в межах, які вказані в табл. 6.

Таблиця 6

Оптимальний склад сплаву АМгбл		
Марка сплаву	Масова частка домішкових і мікролегуючих компонентів, %	
	Fe	Be
Для сплаву, що використовується після лиття		
АМгбл	0,5	0,25 – 0,3
Хімічний склад сплаву згідно ДСТУ2839 – 94		
АМгбл	≤ 0,2	0,02 – 0,10

Згідно вимогам ДСТУ 2839 – 94, сплав АМгбл після лиття в кокіл повинен мати рівень механічних властивостей не нижче ніж:  $\sigma_b = 216$  МПа,  $\delta = 6$  %. Аналізуючи дані, отримані за допомогою методу багатокритеріальної оптимізації, можна зробити висновок, що вимогам державного стандарту до рівня механічних властивостей досліджуваного сплаву відповідають, зокрема, сплави з вмістом заліза 0,5 % і берилію (0,25 – 0,3) % (табл. 7).

Таблиця 7

Механічні властивості сплаву АМгбл				
Марка сплаву	Спосіб лиття	Вид термічної обробки	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
Дані згідно ДСТУ2839-94				
АМгбл	К	–	216 – 220	6,2 – 6,3
Властивості сплаву АМгбл з (0,25 – 0,3) % Be				
АМгбл	К	–	221 – 223	6,0 – 6,4

В результаті проведених експериментальних досліджень можна зробити наступні висновки: для сплаву АМгбл, що використовується після литва в кокіл, можливо підвищити вміст домішок заліза і кремнію з 0,2 до 0,5 % кожного, при збереженні рівня механічних властивостей, відповідно вимогам ДСТУ 2839 – 94, при умові що всплаві вміст берилію знаходиться в межах (0,25 – 0,3) %.

Оптимальний вміст берилію, який забезпечує максимальний рівень механічних властивостей сплаву АМгбл з 0,5 % Fe і 0,5 % Si наступний: Be = (0,25 – 0,3) % (табл. 7, 8). Оптимальне співвідношення заліза і берилію в сплаві – Be/Fe  $\approx$  0,5 – 0,6.

### Висновки

Встановлено сумісний вплив домішок заліза і кремнію вмістом до 1,0 % кожного на фазовий склад, структуру та механічні властивості сплаву АМгбл після лиття в кокіл. При збільшенні в сплаві АМгбл сумарного вмісту заліза і кремнію з 0,1 до 2,0 % зростає кількість частинок фаз FeAl<sub>3</sub> та Mg<sub>2</sub>Si, частки цих фаз укрупнюються, збільшується їх продольні і поперечні розміри, значення тимчасового опору розриву сплаву АМгбл знижується на 37 МПа (з 248 до 211 МПа), а значення відносного видовження знижуються в 3,0 рази (з 12,0 до 3,8 %).

Встановлено вплив берилію вмістом до 0,5 % на фазовий склад, структуру та механічні властивості сплаву АМгбл з домішками заліза (0,5 %) і кремнію (0,5 %). В досліджуваному сплаві при вмісті заліза 0,5 % і берилію від 0,05 до 0,5% від маси сплаву можливе утворення трьох залізомістких фаз: FeAl<sub>3</sub>, Al<sub>4</sub>Fe<sub>2</sub>Be<sub>5</sub>, AlFeBe<sub>4</sub>. Фаза Al<sub>4</sub>Fe<sub>2</sub>Be має невеликі розміри і компактну морфологію, порівняно з фазою FeAl<sub>3</sub>, що впливає на підвищення рівня механічних властивостей досліджуваного сплаву.

Для сплаву АМгбл, що використовується після литва в кокіл, можливо підвищити вміст домішок заліза і кремнію з 0,2 до 0,5 % кожного, при збереженні рівня механічних властивостей, відповідно вимогам ДСТУ 2839 – 94, при умові що всплаві вміст берилію знаходиться в межах (0,25 – 0,3) %.

Оптимальний вміст берилію, який забезпечує максимальний рівень механічних властивостей сплаву АМгбл з 0,5 % Fe і 0,5 % Si наступний: Be = (0,25 – 0,3) %. Оптимальне співвідношення заліза і берилію в сплаві – Be/Fe  $\approx$  0,5 – 0,6.

Перспективність подальших досліджень у даному напрямку полягає в можливості встановлення впливу добавок берилію на фазовий склад, структуру і рівень механічних властивостей інших промислових ливарних сплавів системи Al – Mg з підвищеним вмістом домішок заліза.

### Список літератури

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. Гаврилюк В.П., Рябініна О.О., Кулініч А.А., Доній О.М. Вплив берилію на фазово-структурний склад і механічні властивості сплаву Al-6%Mg-2%Zn з підвищеним вмістом заліза.// Наукові Вісті НТУУ «КПІ». – 2006. №3. – с. 45-48.
5. 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.