

Шаломеев В.А., Цивирко Э.И., Осадчая Е.А.  
(Запорожский национальный технический университет)  
**ЖАРОПРОЧНОСТЬ МАГНИЕВОГО СПЛАВА МЛ5 С ГАФНИЕМ**  
E-mail: gr@radiocom.net.ua

**Аннотация**

Исследовано влияние Hf на структурообразование, механические свойства и жаропрочность отливок из магниевого сплава МЛ5. Установлено, что Hf в сплаве МЛ5 существенно повышает длительную прочность при повышенных температурах.

**Ключевые слова:** магниевый сплав, гафний, микротвердость, жаропрочность

Развитие различных отраслей техники, требующих применения материалов, способных выдерживать большие нагрузки при высоких температурах с одновременным снижением веса конструкций обусловило все большее применение сплавов на основе магния. В настоящее время известны магниевые сплавы для работы при повышенных температурах, содержащие в своем составе редкие и редкоземельные металлы. Необходимость дальнейшего повышения уровня рабочих температур для деталей из магниевых сплавов, потребовала проведение новых исследований с элементами, упрочняющими металлическую матрицу металла [1].

Известно положительное влияние элементов IV группы периодической системы Менделеева на жаропрочные характеристики магниевых сплавов. Так, цирконий входит в состав жаропрочных сплавов Мл-8 и Мл-10 [2]. Есть данные, свидетельствующие о положительном влиянии титана на показатели жаропрочности [3]. Использование гафния для легирования магниевых сплавов, в отличие от его гомологов по IV группе – титана и циркония, до последнего времени практически не рассматривалось.

Поскольку гафний чаще всего присутствует в цирконийсодержащих минералах, в качестве техногенного источника для его получения используются отходы циркониевого производства. Основной областью применения циркония является ядерная энергетика, для которой он должен быть очищен от примесей гафния. Поэтому обязательное отделение гафния от циркония является основой создания сопутствующего промышленного производства гафния. Извлекаемые мировые запасы гафния оцениваются приблизительно в 450 тыс. т, из которых более 57 % приходится на ЮАР, 25 % – на Австралию и около 7 % – на США [4]. Украина так же обладает данной сырьевой базой и технологиями производства гафния, поэтому представляет интерес изучение возможности создания магниевых сплавов, легированных гафнием.

Исследовали влияние гафния на структурообразование, механические свойства и длительную прочность при повышенных температурах отливок из магниевого сплава МЛ5.

Магниевый сплав МЛ5 выплавляли в индукционной тигельной печи типа ИПМ-500 по серийной технологии. Расплав рафинировали флюсом ВИ-2 в раздаточной печи, из которой порционно отбирали ковшем расплав. В него вводили возрастующие присадки лигатуры Mg-6 % Hf (0; 0,05; 0,1; 1,0 % Hf – по расчету) и заливали им песчано-глинистые формы для получения стандартных образцов с рабочим диаметром 12 мм. Образцы для механических испытаний проходили термическую обработку в печах типа Бельвью и ПАП-4М по режиму: (гомогенизация при температуре 4150С (выдержка 24 часа), охлаждение на воздухе + старение при температуре 2150С (выдержка 10 часов), охлаждение на воздухе).

Предел прочности и относительное удлинение образцов определяли на разрывной машине Р5 при комнатной температуре.

Длительную прочность при температуре 1500С и напряжении 80 МПа определяли на разрывной машине АИМА 5-2 на образцах с рабочим диаметром 5 мм по ГОСТ 10145-81.

Микроструктуру отливок изучали методом световой микроскопии («Neophot 32») на термически обработанных образцах после травления реактивом, состоящем из 1% азотной кислоты, 20% уксусной кислоты, 19 % дистиллированной воды, 60 % этиленгликоля.

Микротвердость структурных составляющих сплава определяли на микротвердомере фирмы «Buehler» при нагрузке 0,1 Н.

Химический состав сплава различных вариантов микролегирования удовлетворял требованиям ГОСТ 2856-79 и по содержанию основных элементов находился примерно на одном уровне (8,4% Al; 0,25% Mn; 0,4% Zn; 0,02% Fe; 0,005% Cu; 0,05% Si).

Макрофрактографическое исследование изломов исследуемого литого сплава показало, что

с повышением концентрации гафния в сплаве структура измельчалась (рис. 1), характер ее меняется от крупнокристаллической к матовой мелкокристаллической.



**Рис. 1** Изломы литых образцов сплава МЛ5, х5:  
а – без Hf; б – 1,0 % Hf.

Микроструктура сплава МЛ5 без гафния представляла собой  $\delta$ -твердый раствор с наличием эвтектики типа  $\delta+\gamma(\text{Mg}_4\text{Al}_3)$ , интерметаллида  $\gamma(\text{Mg}_4\text{Al}_3)$  и мелкодисперсных частиц марганцевистой фазы.

Введение гафния от 0,05% до 1,0 % практически не изменяло расстояние между осями второго порядка, однако способствовало уменьшению размеров структурных составляющих (табл.1) и дроблению эвтектики.

С повышением концентрации гафния в сплаве размеры эвтектоида  $\delta+\gamma(\text{Mg}_4\text{Al}_3)$  заметно уменьшались, а количество интерметаллидных выделений увеличивалось.

Увеличение присадки гафния до 1,0 % приводило к уменьшению величины зерна в  $\sim 2$  раза (табл.1).

**Таблица 1** – Размеры структурных составляющих и микротвердость образцов из сплава МЛ5 с различным содержанием гафния

Присадка Hf, % вес.	Величина микро-зерна (после термообработки), мкм	Расстояние между осями дендритов 2го порядка, мкм	Микротвердость матрицы, НВ, МПа	
			после термообработки	после испытаний на длительную прочность
-	100...180 (140)	16...20	1064,0...1167,8 (1114,1)	1089,3...1225,5 (1179,5)
0,05	50...135 (110)	16...18	1064,0...1097,3 (1076,9)	1167,8...1354,4 (1256,8)
0,1	50...130 (100)	16...18	1110,8...1167,8 (1151,7)	1225,5...1504,7 (1399,3)
1,0	45...110 (70)	12...16	1167,8...1225,5 (1204,1)	1287,5...1681,6 (1511,4)

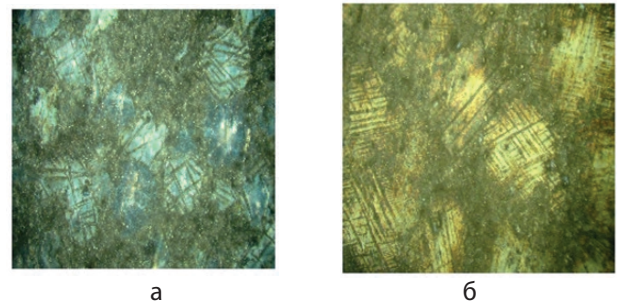
Примечание. В скобках представлены средние значения.

Увеличение присадки гафния от 0,05% до 1,0% повышало микротвердость сплава как в исходном, так и в термообработанном состоянии. Более высокие значения твердости имели образцы после длительных испытаний. Следует отметить, что в микроструктуре образцов, прошедших испытания на длительную прочность, проявлялись полосы скольжения, по которым происходило

более интенсивное выделение мелкодисперсных частиц интерметаллидной фазы (рис. 2). Данные области характеризовались повышенной микротвердостью.

Исследование микроструктуры образцов после длительных выдержек при температуре 150оС показало, что нагрев при указанной температуре способствовал распаду эвтектоида и дополнительному выделению упрочняющей интерметаллидной фазы типа  $\gamma(\text{Mg}_4\text{Al}_3)$ .

Возрастающие присадки гафния незначительно повышало прочностные свойства сплава (табл. 2). При этом, пластические характеристики сплава практически не менялись. В то время, как значения длительной прочности сплава резко возрастали с увеличением содержания гафния до 1,0 % и увеличивались примерно в 3 раза.



**Рис. 2** Микроструктура сплава МЛ5 после испытаний на длительную прочность при температуре 150оС и напряжении 80 МПа, х 200:

**Таблица 2** – Средние механические свойства и жаропрочность сплава МЛ5

Присадка Hf % вес.	Механические свойства при комнатной температуре		Время до разрушения, тр,ч. (Тисп.=150оС; $\sigma=80$ МПа)
	$\sigma$ , МПа	$\delta$ , %	
-	214,0	2,2	141
0,05	216,0	2,6	196
0,1	221,0	2,4	337
1,0	225,0	2,5	498

### Выводы

1. Присадки гафния до 1,0 % незначительно повышают прочностные свойства сплава МЛ5 при комнатных температурах и практически не меняют пластичность.

2. Установлено, что гафний измельчает эвтектику и тормозит эвтектоидное превращение.

3. Длительные испытания приводят к повышению микротвердости и структурной однородности магниевое сплава.

4. Введение в сплав МЛ5 гафния от 0,05% до 1,0% способствует значительному повышению жаропрочности вследствие дополнительного дисперсионного упрочнения твердого раствора.

## Литература

1. Дриц М.Е. Магниеые сплавы для работы при повышенных температурах / Дриц М.Е. - М.: Наука, 1964.- 230 с.
2. Сплавы литейные магниевые. Марки: ГОСТ 2856-79. - [ Чинний від 1981.01.01].-М.: Издательство стандартов, 1986.-5с. - (Государственный комитет СССР по стандартам).
3. Aust K.T. Influence of the titan on mechanical properties and thermal stability of magnesian alloys / K.T. Aust, L.M. Pidgeon // Trans. Amer. Inst. Min. Met. Eng. - 1949.- № 186. - С.585-563.
4. Шиков А.И. Что может гафний. О состоянии и перспективах его использования / Шиков А.И., Бочаров О.В. // Металлы Евразии . - 2005. - № 5. - С. 34-39.
5. Никулин, Л. В. Литье под давлением магниевых сплавов [Текст] / Л. В. Никулин., Т. Н. Липчин, М. Л. Заславский. - М. : Машиностроение, 1978. - 181 с. - Библиогр. :с. 177-179.
6. Авиационные материалы. Избранные труды 1932-2007 г.г. [Текст] / Юбилейный научно-технический сборник / Под ред. Е. Н. Каблова. - М. : ВИАМ, 2007. - 389 с.
7. Шаломеев, В. А. Химический состав магниевых сплавов и их жаропрочность [Текст] / В. А. Шаломеев, Э. И. Цивирко //Вісник двигунобудування. - 2009. - № 2. - С. 126-133.
8. Шаломеев, В. А. Вплив легування на жароміцність сплаву МЛ5 [Текст] / В. А. Шаломеев // Металознавство та обробка металів. - 2010. - № 1. - С. 48-52.
9. Жароміцний ливарний сплав на основі магнію [Текст] : пат. 41995 Україна, МПК7 С 22 С 23/00 / Шаломеев В. А., Цивірко Е. І., Лукінов В. В. та ін.; заявник й патентовласник Запорізьк. нац. техн. ун-тет. - № 200812895; заявл. 05.11.08; опубл. 25.06.09. - Бюл. № 12. - 2009. - 4 с.
10. Ливарний сплав на основі магнію з підвищеними властивостями [Текст] : пат. 42033 Україна, МПК7 С 22 С 23/00 / Шаломеев В. А., Цивірко Е. І., Лукінов В. В. та ін.; заявник й патентовласник Запорізьк. нац. техн. ун-тет. - № 200814231; заявл. 10.12.08;