

### Аннотация

Исследовано влияние циркония на структурообразование, механические свойства и жаропрочность магниевого сплава МЛ5. Установлено, что введение циркония в количестве 0,05...1,0 % упрочняет сплав, повышает его пластические свойства и жаропрочность.

**Ключевые слова:** магниевый сплав, цирконий, интерметаллиды, жаропрочность

Развитие современного машиностроения требует применения материалов, способных выдерживать большие нагрузки при повышенных температурах с одновременным снижением веса конструкций. С этой точки зрения большой интерес представляют сплавы на основе магния – одного из широко распространенных в природе элементов. По запасам в земной коре магний занимает третье место среди металлов, уступая только алюминию и железу. Он содержится в ряде минералов, но особенно его много в доломите и магнезите. В воде морей и океанов содержится около 6.10<sup>16</sup> т магния, что делает его перспективным материалом как основы для разработки большого количества сплавов [1].

Литейные магниевые сплавы – один из самых легких конструкционных материалов, что позволяет их использовать в различных отраслях машиностроения. Ввиду того, что магниевые сплавы в полтора раза легче алюминиевых сплавов и в четыре раза – чугуна и стали, их применение, особенно в фасонном литье, позволяет достигнуть снижения весовых характеристик изделия до 30 % [2].

В настоящее время разработано большое количество магниевых сплавов с участием различных металлов и опубликовано большое количество работ, где рассматриваются механические, физические и коррозионные свойства магниевых сплавов, предназначенных для различных условий эксплуатации. Для получения высокопрочного литья широко применяют сплавы магния, легированные алюминием и цинком (МЛ4, МЛ5, МЛ6), которые имеют достаточно высокие механические свойства и низкую стоимость, но обладают недостаточной жаропрочностью. Сплавы системы «магний-цирконий-неодим» (МЛ9, МЛ10, МЛ19), которые обладают повышенной жаропрочностью, содержат дорогостоящие легирующие элементы, что значительно удорожает изделия из них. Поэтому разработка дешевых магниевых сплавов с повышенным уровнем свойств и жаропрочностью является актуальной задачей [3].

Известно, что жаропрочность литых сплавов обеспечивается двумя факторами [4]:

– введением в сплав легирующих элементов, образующих при кристаллизации и перекристаллизации тугоплавкие фазы;

– легированием основного компонента элементами, входящими в твердый раствор [5], при этом легирующие компоненты должны иметь температуру плавления выше, чем основа сплава.

В связи с этим практический интерес представляет исследование влияния легирования сплава МЛ5 тугоплавким металлом 4В подгруппы периодической системы элементов - Zr. Этот металл имеет близкий с магнием атомный радиус и электроотрицательность [6] и, следовательно, может образовывать твердые растворы и фазы, упрочняя металлическую матрицу. Температура плавления исследуемого легирующего элемента значительно превышает температуру плавления сплава МЛ5 [7], что должно обеспечить термическую стабильность образующихся фаз и повысить жаропрочность магниевого сплава в целом.

Данная работа посвящена рациональному выбору легирующего элемента для повышения жаропрочности сплава МЛ5.

Для исследований применяли базовый промышленный сплав МЛ5, который выплавляли в тигельной индукционной печи ИПМ-500 номинальной емкостью 0,5 т, мощностью 140 кВт и производительностью 230 кг/ч, а также в газовой раздаточной печи номинальной емкостью 150 кг, в которую вводили возрастающие присадки исследуемого элемента в виде лигатур (0; 0,05; 0,1; 1,0 % – по расчету).

В качестве шихты использовали магний первичный чушковый Мг 90, Мг 95, цинк чушковый Ц2, алюминий первичный чушковый А5, лигатуру на основе алюминия цирконием. Расплав рафинировали флюсом ВИ-2, подвергали выдержке, заливали при температуре 710°С в песчано-глинистые формы и получали стандартные образцы с рабочим диаметром 12 мм для механических испытаний.

Образцы проходили термическую обработку в печах типа Бельвю и ПАП-4М по режиму: гомогенизация при температуре 415°C (выдержка 24 ч), охлаждение на воздухе + старение при температуре 215°C (выдержка 10 ч), охлаждение на воздухе.

Предел прочности и относительное удлинение образцов определяли на разрывной машине Р5 при комнатной температуре, а длительную прочность при температуре 150°C и напряжении 80 МПа – на разрывной машине АИМА5-2 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, состоящим из 60% этиленгликоля, 20% уксусной кислоты, 19% дистиллированной воды и 1% азотной кислоты. Микротвердость структурных составляющих сплава определяли на микротвердомере фирмы «Buehler» при нагрузке 0,1 Н.

Химический состав сплава одной плавки, селективно легированного цирконием удовлетворял требованиям ГОСТ 2856-79 и по содержанию основных элементов находился примерно на одном уровне (8,4 % Al; 0,32 % Zn; 0,30 % Mn; 0,030 % Si; 0,014 % Fe; 0,005 % Cu; остальное – Mg).

Макрофрактографическое исследование изломов образцов сплава МЛ5 с цирконием показало, что этот элемент измельчал макрозерно металла (рис. 1).



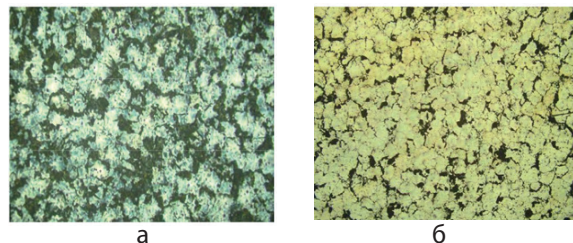
**Рис. 1** Макрофрактограммы излома образца из сплава МЛ5 легированного 0,1 % Zr, x5

С ростом содержания исследуемого легирующего элемента в сплаве уменьшалось количество эвтектики, размеры структурных составляющих (рис. 2) и расстояние между осями дендритов второго порядка. Влияние циркония на микротвердость матрицы увеличивалось пропорционально содержанию легирующего элемента (табл. 1).

**Таблица 1** – Характеристики структурных составляющих сплава МЛ5 с Zr

Элемент	Содержание, % расч.	Размер микрозерна, мкм	Расстояние между осями дендритов второго порядка, мкм	Микротвердость матрицы, НВ, МПа		
				До термообработки	После термообработки	
стандартный			140	21	1115,9	1256,5
Zr	0,05	105	17	1166,8	1235,3	
	0,10	100	16	1198,3	1265,6	
	1,00	70	16	1215,4	1297,9	

Исследуемые элементы способствовали измельчению интерметаллидной фазы, при этом ее объемный процент увеличивался с повышением концентрации исследуемого элемента в сплаве (табл. 2). В структуре исходного сплава МЛ5 наблюдали как пластинчатые, так и сферические интерметаллиды. Введение легирующего элемента в пределах 0,05...0,1 % (мас.) интенсивно увеличивает объемный процент сферических интерметаллидов при неизменном объемном проценте пластинчатых. Дальнейшее увеличение концентрации элемента приводит к незначительному повышению объемного процента сферических интерметаллидов, находящихся внутри зерна и к значительному повышению объемного процента пластинчатых.



**Рис. 2** Микроструктура образцов из сплава МЛ5, x 100: а - стандартный сплав; б - 0,1 % Zr.

Микрорентгеноспектральный анализ интерметаллидных фаз сплава МЛ5 с цирконием показал наличие этого элемента в составе интерметаллидов, при этом исследуемые интерметаллиды имели следующий состав: цирконием: 71,40 % Zr; 14,77 % Mg; 10,98 % Al; 1,55 % Si; 1,30 % Mn.

Исследуемый интерметаллид, имеющий сложный состав и содержащий тугоплавкие элементы, может иметь повышенную температуру плавления и стабилизировать структурное состояние сплава при работе в условиях повышенных температур.

Содержание циркония в интервале 0,05...0,1 % повышает пластичность сплава МЛ5 за счет измельчения зерна, структурных составляющих и увеличения количества сферических интерметаллидов, располагающихся в центре зерен и являющихся дополнительными центрами кристаллизации. Однако с увеличением содержа

ния легирующего элемента в сплаве до 1,0 % пластичность металла уменьшается за счет образования избыточного количества пластинчатых интерметаллидов, располагающихся по границам зерен и охрупчивающих металл. Цирконий повышал также предел прочности и жаропрочность сплава. Эффективность его влияния на свойства сплава повышалась с ростом его содержания в металле (табл. 3).

**Таблица 2** – Объемный процент интерметаллидов (V) и его распределение по размерным группам в сплаве МЛ5 с Zr

Элемент	Содержание, % расч.	Распределение интерметаллидов (V•10-3, %) по размерным группам, мкм						
		-2	+2 -3,9	4 -7,9	+8 -11,5	11,6 -15	15,1 -19	Всего
стандартный		6	18	36	30	30	18	138
		0	54	30	12	12	0	108
Zr	0,05	36/6	30/42	54/30	18/42	6/0	12/0	156/120
	0,10	60/18	30/84	1198,3	18/42	0/0	12/0	180/156
	1,00	66/60	54/84	1215,4	12/12	6/0	0/0	264/180

Примечание: в числителе и знаменателе — объемный процент пластинчатых и сферических интерметаллидов соответственно

**Таблица 3** – Механические свойства и жаропрочность сплава МЛ5 с Zr

Элемент	Содержание, % расч.	Микротвердость матрицы, HV, МПа			
		До термообработки		После термообработки	
		σв, МПа	δ, %	σв, МПа	δ, %
стандартный		165,3	2,8	231,8	2,9
Zr	0,05	184,2	3,4	269	3,8
	0,10	170,4	3,8	277,2	4,6
	1,00	167,6	3,7	280,4	3,6

Таким образом, цирконий является эффективным легирующим элементом, способным повышать весь комплекс механических свойств сплава и его жаропрочность.

На основании проведенных исследований разработаны новые жаропрочные магниевые сплавы на базе сплава МЛ5 содержащий цирконий для эксплуатации в условиях повышенных температур [8-10].

#### Выводы

1. Легирование сплава МЛ5 цирконием способствует повышению микротвердости металла, измельчению его структурных составляющих и увеличению объемного процента интерметаллидов, которые имеют сложный состав и обогащены соответствующим легирующим элементом.

2. Цирконий количестве от 0,05 до 0,10 % (мас.) повышают прочность, пластичность и жаропрочность магниевого сплава.

3. Рассмотренный элемент является перспективным легирующим компонентом для разработки новых магниевых сплавов при работе в условиях повышенных температур

#### Литература

1. 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.

2. Авиационные материалы. Избранные труды 1932-2007 г.г. [Текст] / Юбилейный научно-технический сборник / Под ред. Е. Н. Каблова. – М. : ВИАМ, 2007. – 389 с.

3. Дорохина, Л. Н. Легкие цветные металлы и сплавы [Текст] : справочник. Т. 2. / Л. Н. Дорохина, З. Н. Таужнянская, Л. Ф. Никерова. – М. : ЦНИИцветмет, 2000. – 416 с. – Библиогр. : с. 411-415. – ISBN 5-00-000696-8.

4. Григорович, В. К. Жаропрочность и диаграммы состояния [Текст] / В. К. Григорович. – М. : Metallургия, 1969. – 322 с. – Библиогр. : с. 317-322.

5. Гуляев, Б. Б. Физико-химические основы синтеза сплавов [Текст] / Б. Б. Гуляев. – Л. : Изд-во ЛГУ, 1980. – 192 с. – Библиогр. : с. 183-191.

6. Шаломеев, В. А. Химический состав магниевых сплавов и их жаропрочность [Текст] / В. А. Шаломеев, Э. И. Цивирко // Вісник двигунобудування. – 2009. – № 2. – С. 126-133.

7. Шаломеев, В. А. Вплив легування на жароміцність сплаву МЛ5 [Текст] / В. А. Шаломеев // Металознавство та обробка металів. – 2010. – № 1. – С. 48-52.

8. Жароміцний ливарний сплав на основі магнію [Текст] : пат. 41995 Україна, МПК7 С 22 С 23/00 / Шаломеев В. А., Цивирко Е. І., Лукинов 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.

9. Жароміцний ливарний сплав на основі магнію з підвищеною рідинотекучістю [Текст] : пат. 41996 Україна, МПК7 С 22 С 23/00. / Шаломеев В. А., Цивирко Е. І., Лукинов В. В. та ін. ; заявник й патентовласник Запорізьк. нац. техн. ун-тет. – № 200812898; заявл. 05.11.08; опубл. 25.06.09. – Бюл. № 12. – 2009. – 4 с.