

УДК 669.721.5

В.А. Шаломеев, доцент, д.т.н.

## ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ НА СВОЙСТВА МАГНИЕВОГО ЛИТЬЯ

*Запорожский национальный технический университет*

Показано вплив легуючих елементів на форму та розмір інтерметалідів у магнієвому сплаві. Виконано кількісну та якісну оцінку інтерметалідної фази у сплаві МЛ5, легovanому Nd, Ge, Ag, Si, Y, Sc, Zr, Ti та Hf, досліджено їх вплив на структуру, механічні властивості та жароміцність магнієвого литва.

Ключові слова: легуючий елемент, інтерметалід, структура, механічні властивості, жароміцність, розмірні групи, об'ємний відсоток.

Показано влияние легирующих элементов на форму и размер интерметаллидов в магниевоm сплаве. Выполнена количественная и качественная оценка интерметаллидной фазы в сплаве МЛ5, легированном Nd, Ge, Ag, Si, Y, Sc, Zr, Ti и Hf, исследовано ее влияние на структуру, механические свойства и жаропрочность магниевого литья.

Ключевые слова: легирующий элемент, интерметаллид, структура, механические свойства, жаропрочность, размерные группы, объемный процент.

The influence of alloying elements on the form and size of intermetallide constituents in a magnesium alloy has been showed. The quantitative and qualitative evaluation of intermetallic phases in the alloy ML5, alloyed by Nd, Ge, Ag, Si, Y, Sc, Zr, Ti and Hf has been realized, its influence at the structure, mechanical properties and heat resistance of magnesium casting has been investigated.

Key words: alloying element, intermetallic compound, structure, mechanical properties, heat resistance, dimensional group, the volume percent.

*Введение.* Постоянно возрастающие эксплуатационные требования к современной технике обуславливают необходимость создания материалов, обеспечивающих повышенные механические свойства и достаточную надежность против разрушения при повышенных температурах. Поэтому в последние годы большое значение придается изучению влияния различных структурных факторов на механические свойства и жаропрочность ответственных литых деталей.

Химический состав сплава, в основном, предопределяет весь комплекс его свойств. Различные элементы и их содержание могут изменять структуру и свойства магниевых сплавов. Одни из них способствуют упрочнению сплава, другие – повышению его пластичности, третьи – увеличению жаропрочности [1,2]. В последнее время проводится большое количество исследований по изучению влияния различных элементов на физико-механические и эксплуатационные свойства магниевых сплавов, однако число работ, посвященных выяснению природы упрочнения таких сплавов при их легировании и модифицировании, а также взаимосвязи их со структурным состоянием металла, очень ограничено.

*Состояние вопроса.* Основным направлением получения высокой прочности для литых магниевых сплавов при сохранении достаточной вязкости является упрочнение их дисперсными частицами, в частности, интерметаллидами [3]. Образование интерметаллидов и их свойства обусловлены электронным строением элементов,

входящих в состав сплава. Легирующие элементы, взаимодействуя с магнием, образуют интерметаллиды, существенно влияющие на структуру и свойства литого металла [4]. При этом их форма и размеры могут оказывать решающую роль. Поэтому изучение влияния легирующих элементов на структурообразование и комплекс свойств магниевых сплавов является актуальным и перспективным направлением развития современного материаловедения.

*Постановка задачи.* Целью настоящих исследований является оценка влияния ряда легирующих элементов (*Nd, Ge, Ag, Si, Y, Sc, Zr, Ti* и *Hf*) на форму и размер образующихся интерметаллидных фаз в сплаве МЛ5, а так же их влияние на структуру и свойства магниевого литья.

*Основная часть исследования.* Магниевый сплав МЛ5 выплавляли в индукционной тигельной печи ИПМ-500 по серийной технологии. Расплав рафинировали флюсом ВИ-2 в раздаточной печи, из которой его порционно отбирали ковшем. В расплав вводили возрастающие присадки лигатуры соответствующих элементов (0; 0,05; 0,10; 1,0 % – по расчету). После растворения лигатуры расплав вновь подогревали до температуры  $790 \pm 5$  °С и подвергали выдержке в течение 15 мин., после чего им заливали песчано-глинистые формы для получения стандартных образцов с рабочим диаметром 12 мм. Образцы для механических испытаний подвергали термической обработке в печах Бельвю и ПАП-4М по режиму: гомогенизация при температуре 415 °С (выдержка – 24 ч), охлаждение на воздухе + старение при температуре 215 °С (выдержка – 10 ч), охлаждение на воздухе.

Предел прочности и относительное удлинение образцов изучали на разрывной машине Р5 при комнатной температуре. Длительную прочность при температуре 150 °С и напряжении 80 МПа определяли на разрывной машине АИМА 5-2 на образцах с рабочим диаметром 5 мм (по ГОСТ 10145-81). Химический состав отливок из магниевых сплавов контролировали при помощи оптических эмиссионных спектрометров «SPECTROMAXx» и «SPECTROMAXxF», фотоэлектрических спектрометров МФС-8 и ТФС-36, а также ЕДРФ спектрометра «SPECTROXEPoS».

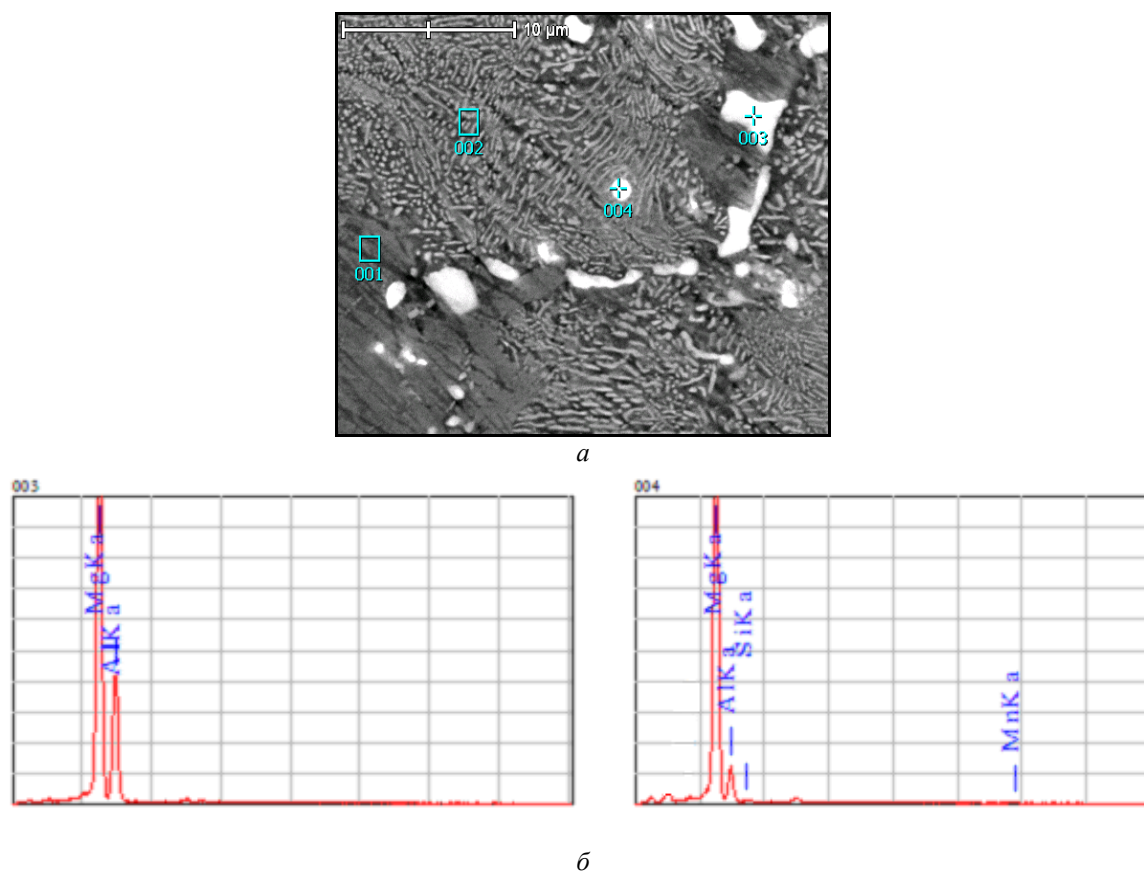
Микроструктуру исследуемых сплавов изучали методами световой микроскопии («Neophot 32», «OLYMPUS IX 70»), а также с использованием программно-аппаратного комплекса «Видеотест-Структура 5.0» на базе металлографического микроскопа «Axiovert 40MAT». Качественную и количественную оценку структурных составляющих сплава выполняли методами «Л» и «П» по ГОСТ 1778-70. Микрорентгеноспектральный анализ структурных составляющих магниевых сплавов выполняли на электронном микроскопе «JSM-6360LA». Химический состав сплава различных вариантов микролегирования удовлетворяет требованиям ГОСТ 2856-79 и по содержанию основных элементов находится примерно на одном уровне: 8,5 % *Al*; 0,34 % *Zn*; 0,27 % *Mn*; 0,03 % *Si*; 0,01 % *Fe*; 0,006 % *Cu*.

**Таблица 1** – Химический состав интерметаллидов, %

Интерметаллиды	Магний	Алюминий	Кремний	Марганец	Сумма
Пластинчатые (003)	61,83	38,17	0	0	100
Сферические (004)	81,99	14,85	1,36	1,80	100

Микроструктура сплава МЛ5 представляла собой  $\delta$ -твердый раствор с наличием эвтектики типа  $\delta + \gamma(Mg_{17}Al_{12})$  и интерметаллидов  $\gamma(Mg_{17}Al_{12})$ . Интерметаллидная фаза была двух типов: сферической формы, располагающейся внутри зерен, и пластинчатой формы – по границам зерен. По результатам микрорентгеноспектрального

анализа сферические интерметаллиды содержали ~ 80 % магния, ~ 15 % алюминия и дополнительно кремний и марганец, пластинчатые интерметаллиды имели состав ~ 60 % магния и ~ 40 % алюминия (табл. 1, рис. 1).



*а - место анализа; б – спектрограмма анализируемого места*

**Рисунок 1** – Результаты микрорентгеноспектрального анализа интерметаллидов в сплаве МЛ5:

Введение легирующих элементов в сплав МЛ5 способствует увеличению объемной доли интерметаллидной фазы (рис. 2). При этом повышение содержания легирующих элементов дополнительно увеличивает количество интерметаллидов. Микрорентгеноспектральный анализ показал наличие в структуре исследуемых сплавов, как пластинчатых, так и сферических интерметаллидных фаз, обогащенных соответствующими легирующими элементами.

При содержании в сплаве МЛ5 легирующих элементов в количестве 0,05... 0,10 % интенсивно увеличивается объемная доля сферических интерметаллидов и незначительно – пластинчатых интерметаллидов. Дальнейшее увеличение содержания легирующих элементов в сплаве до 1,0 % приводит к незначительному увеличению объемной доли сферических включений, находящихся внутри зерна, и интенсивному увеличению – пластинчатых включений. Анализ распределения интерметаллидов по размерным группам показывает, что в исходном сплаве МЛ5 преобладают пластинчатые интерметаллиды, большинство из которых находятся в размерной группе 4... 15 мкм (табл. 2). Сферические интерметаллиды, в основном, представлены размерной группой 2,0...7,9 мкм. В магниевом сплаве исследуемые легирующие элементы измельчают интерметаллидную фазу, а ее распределение смещается в сторону меньших размерных групп (до 2,0...11,5 мкм – для сферических и менее 2,0...7,9 мкм – для пластинчатых). При этом повышение содержания легирующих элементов в сплаве

увеличивает объемный процент интерметаллидов с размерами менее 2,0 мкм и уменьшает объемный процент крупных интерметаллидов с размерами более 11,6 мкм.

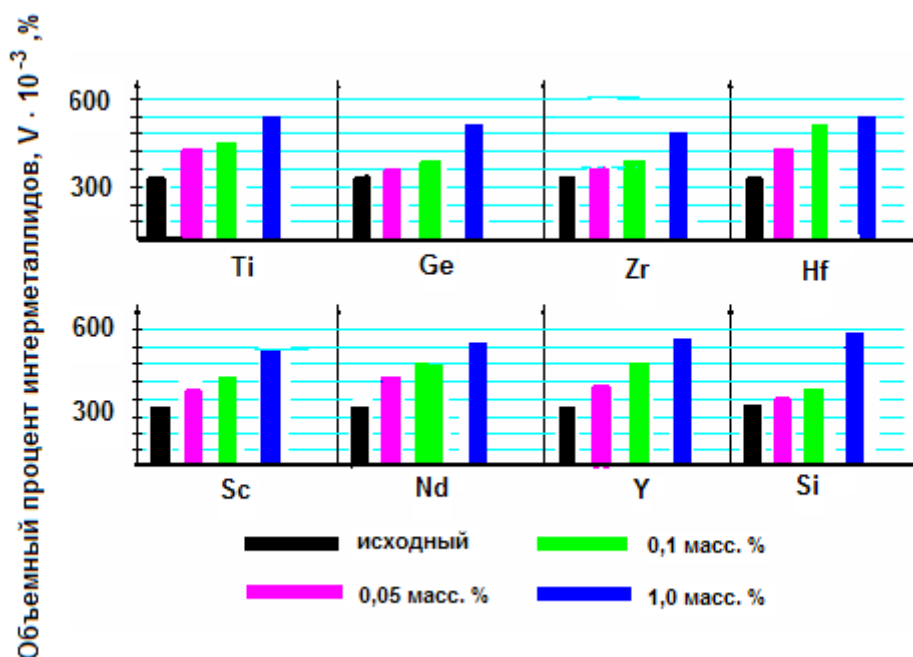


Рисунок 2 – Влияние содержания исследуемых элементов на объемный процент интерметаллидов в сплаве МЛ5

Такое перераспределение интерметаллидов способствует некоторому повышению пластичности исследуемых сплавов за счет измельчения зерна. При этом установлена четкая зависимость (рис. 3), когда с увеличением объемного процента интерметаллидов при повышении содержания элементов в сплаве МЛ5 заметно измельчалось микрзерно:

$$d_{cp} = 180,52 - 0,18V ; r = - 0,82 , \quad (1)$$

где  $d_{cp}$  – средний диаметр микрзерна, мкм;  $V$  – объемный процент интерметаллидов в сплаве;  $r$  – коэффициент корреляции.

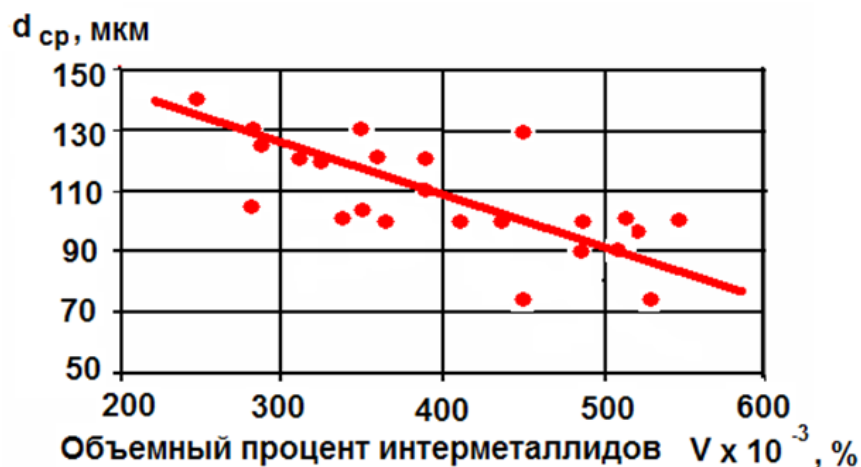
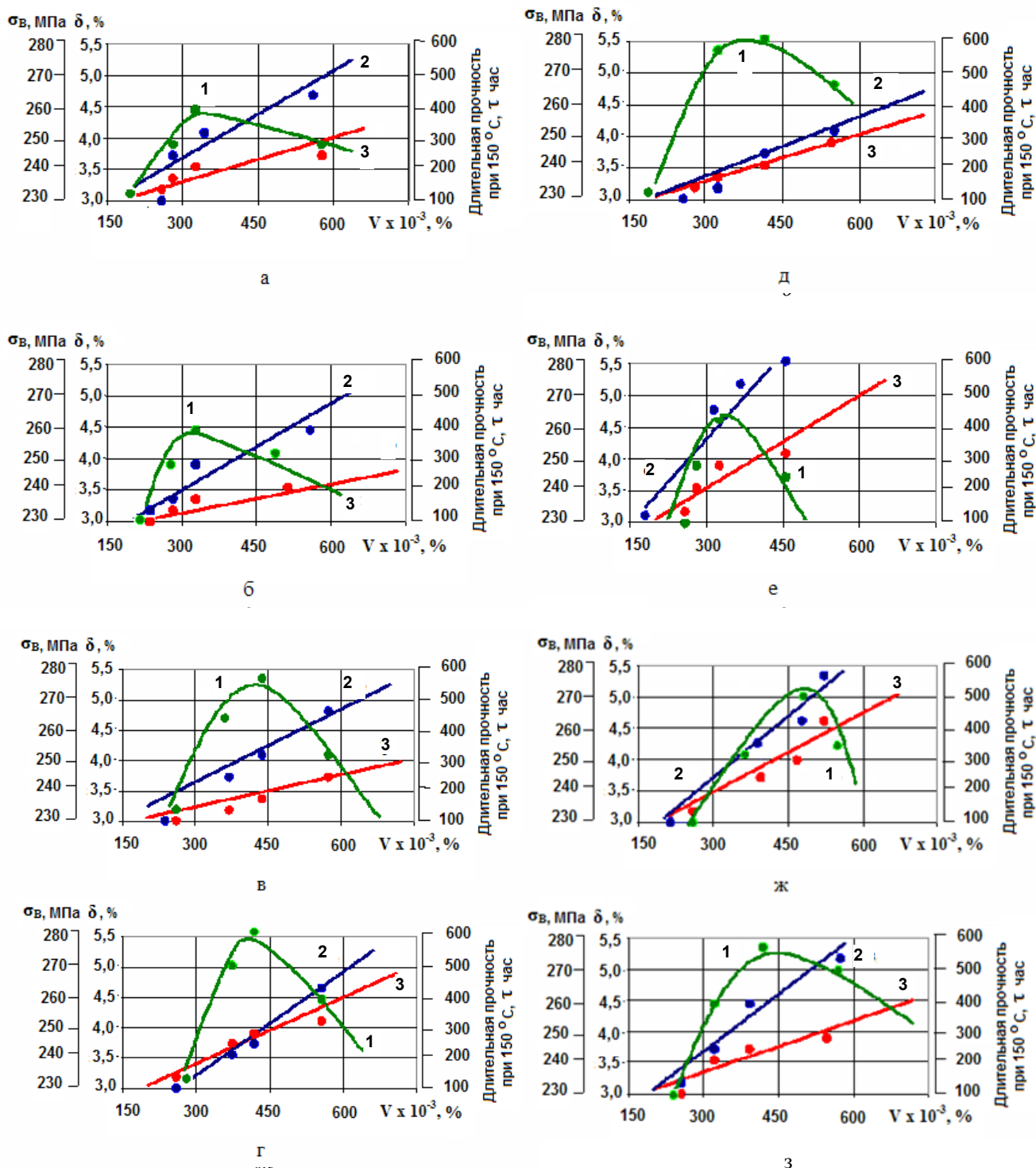


Рисунок 3 – Влияние объемного процента интерметаллидов ( $V$ ) на размер микрзерна ( $d_{cp}$ ) в сплаве МЛ5

**Таблица 2** – Объемный процент интерметаллидов (*V*) и ее распределение по размерным группам в сплаве МЛ5 с различными легирующими элементами

Элемент	Содержание, % масс.	Распределение интерметаллидов, $V \cdot 10^{-3}$ , по размерным группам, мкм						
		< 2	2...3,9	4...7,9	8...11,5	11,6...15	15,1...19	Всего
стандартный		$\frac{6}{0}$	$\frac{18}{54}$	$\frac{36}{30}$	$\frac{30}{12}$	$\frac{30}{12}$	$\frac{18}{0}$	$\frac{138}{108}$
<i>Y</i>	0,05	$\frac{42}{0}$	$\frac{84}{72}$	$\frac{24}{42}$	$\frac{12}{24}$	$\frac{30}{0}$	$\frac{18}{0}$	$\frac{210}{138}$
	0,10	$\frac{66}{0}$	$\frac{90}{150}$	$\frac{42}{42}$	$\frac{12}{18}$	$\frac{18}{0}$	$\frac{6}{0}$	$\frac{234}{210}$
	1,00	$\frac{78}{78}$	$\frac{162}{126}$	$\frac{42}{24}$	$\frac{6}{6}$	$\frac{18}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{306}{234}$
<i>Sc</i>	0,05	$\frac{42}{0}$	$\frac{60}{78}$	$\frac{48}{36}$	$\frac{12}{30}$	$\frac{6}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{168}{144}$
	0,10	$\frac{72}{74}$	$\frac{12}{114}$	$\frac{78}{30}$	$\frac{6}{24}$	$\frac{6}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{174}{192}$
	1,00	$\frac{81}{96}$	$\frac{81}{48}$	$\frac{132}{24}$	$\frac{6}{24}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{300}{192}$
<i>Nd</i>	0,05	$\frac{48}{0}$	$\frac{48}{108}$	$\frac{30}{42}$	$\frac{24}{36}$	$\frac{36}{6}$	$\frac{18}{0}$	$\frac{204}{192}$
	0,10	$\frac{90}{18}$	$\frac{30}{114}$	$\frac{48}{42}$	$\frac{18}{30}$	$\frac{18}{6}$	$\frac{18}{0}$	$\frac{220}{210}$
	1,00	$\frac{150}{57}$	$\frac{24}{114}$	$\frac{73}{20}$	$\frac{18}{24}$	$\frac{12}{6}$	$\frac{6}{0}$	$\frac{282}{231}$
<i>Ti</i>	0,05	$\frac{60}{0}$	$\frac{84}{60}$	$\frac{54}{36}$	$\frac{24}{24}$	$\frac{12}{0}$	$\frac{6}{0}$	$\frac{240}{120}$
	0,10	$\frac{90}{18}$	$\frac{126}{78}$	$\frac{18}{30}$	$\frac{18}{18}$	$\frac{6}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{258}{144}$
	1,00	$\frac{120}{60}$	$\frac{168}{66}$	$\frac{24}{36}$	$\frac{18}{18}$	$\frac{6}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{336}{180}$
<i>Zr</i>	0,05	$\frac{36}{6}$	$\frac{30}{42}$	$\frac{54}{30}$	$\frac{18}{42}$	$\frac{6}{0}$	$\frac{12}{0}$	$\frac{156}{120}$
	0,10	$\frac{60}{18}$	$\frac{30}{84}$	$\frac{60}{30}$	$\frac{18}{24}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{12}{0}$	$\frac{180}{156}$
	1,00	$\frac{66}{60}$	$\frac{54}{84}$	$\frac{126}{24}$	$\frac{12}{12}$	$\frac{6}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{264}{180}$
<i>Hf</i>	0,05	$\frac{66}{6}$	$\frac{84}{78}$	$\frac{42}{36}$	$\frac{24}{24}$	$\frac{12}{6}$	$\frac{6}{6}$	$\frac{234}{156}$
	0,10	$\frac{66}{12}$	$\frac{132}{120}$	$\frac{84}{36}$	$\frac{12}{8}$	$\frac{12}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{306}{186}$
	1,00	$\frac{126}{72}$	$\frac{84}{108}$	$\frac{96}{24}$	$\frac{18}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{324}{204}$

Примечание: в числителе - объемный процент пластинчатых интерметаллидов, в знаменателе - объемный процент сферических интерметаллидов



**Рисунок 4** – Влияние объемного процента интерметаллидов на свойства легированного сплава МЛ5 (1 -  $\delta$ ; 2 -  $\sigma_b$ ; 3 -  $\tau$ ): а - Si; б - Ge; в - Nd; г - Ti; д - Y; е - Zr; ж - Hf; з - Sc

С увеличением объемного процента интерметаллидов повышаются прочность и жаропрочность легированного магниевого сплава МЛ5. Интерметаллиды, располагающиеся как в центре зерна, так и по его границам, упрочняют сплав и повышают его жаропрочность (рис. 4). Пластичность же сплава в зависимости от количества интерметаллидов имеет нелинейную зависимость.

На свойства магниевого сплава оказывает влияние не только количество выделившейся интерметаллидной фазы, но и ее морфология и топология. Пластинчатые интерметаллиды размером до 8,0 мкм положительно влияют на свойства сплава, сферические – только до размера 11,6 мкм.

Следовательно, сферическая форма интерметаллидов является более предпочтительной для повышения свойств сплава. Установлено, что на упрочнение сплава большее влияние оказывают сферические интерметаллиды меньших размерных групп. Повышение пластичности сплава наблюдается только при введении исследуемых элементов в количестве 0,05...0,10 %, когда увеличивается доля сферических интерметаллидов и измельчается зерно. При дальнейшем увеличении содержания элементов в сплаве (до 1,0 %) одновременно с измельчением микроструктуры происходит существенный рост объемного процента интерметаллидов, что приводит к охрупчиванию металла и снижению относительного удлинения.

#### *Выводы*

Установлено влияние морфологии и топологии структурных составляющих магниевых сплавов на их свойства. Показано, что микролегирование магниевых сплавов от 0,05 до 0,10 % увеличивает объемную долю интерметаллидов в ~1,5 раза, смещая их в сторону меньших размерных групп при одновременном образовании сферических интерметаллидов, расположенных в центре зерна и служащих дополнительными центрами кристаллизации. Показано, что при объемном проценте интерметаллидов в металле 0,35...0,45 % пластичность магниевых сплавов достигает максимального значения, дальнейшее увеличение количества интерметаллидов в сплаве приводит к снижению пластичности вследствие их избыточного выделения и дальнейшему упрочнению металла [5,6].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рейнор, Г. В. *Металловедение магния и его сплавов* [Текст] / Г. В. Рейнор. – М. : Металлургия, 1964. – 486 с. – Библиогр. : с. 475-476.
2. Садков, В. В. *Применение Mg-сплавов в самолетах ОАО «Туполев»* [Текст] / В. В. Садков, О. П. Авдеева, В. П. Агеев // *Металлургия машиностроения*. – 2006. – № 1. – С. 11-14.
3. Алесковский, В. Б. *Химия твердых веществ* [Текст] / В. Б. Алесковский. – М. : Высшая школа, 1978. – 256 с. – Библиогр. : с. 253-255.
4. Шаломеев, В. А. *Нові магнієві сплави з підвищеними властивостями для авіаційних двигунів* [Текст] / В. А. Шаломеев, Е. І. Цивірко, Ю. О. Зеленюк // *Вісник двигунобудування*. – 2012. – № 1. – С. 218-223.
5. Шаломеев, В. А. *Механические и специальные свойства жаростойкого магниевого сплава МЛ10* [Текст] / В. А. Шаломеев, Э. И. Цивирко, Н. А. Лысенко // *Вісник двигунобудування*. – 2007. – № 2. – С. 172-176.
6. Шаломеев, В. А. *Структура и свойства магниевых сплавов со скандием* [Текст] / В. А. Шаломеев, Э. И. Цивирко, Н. А. Лысенко // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2008. – № 1. – С. 37-40.

Стаття надійшла до редакції 14.02.2013 р.  
Рецензент, проф. Е.І. Цивірко