

УДК 669.721.5

Д-р техн. наук В. А. Шаломеев

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

ВЛИЯНИЕ РЗМ НА МОРФОЛОГИЮ И ТОПОЛОГИЮ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОЙ ФАЗЫ В МАГНИЕВЫХ СПЛАВАХ

Показано влияние редкоземельных металлов (Y, Nd и Sc) на морфологию и топологию интерметаллидной фазы в сплаве МЛ5. Проведена количественная и качественная оценка интерметаллидов в сплаве с присадками 0,05...1,0 % Nd, Y и Sc, исследовано их влияние на структуру, механические свойства и жаропрочность магниевого литья.

Ключевые слова: редкоземельные металлы, магниевый сплав, интерметаллиды, структура, механические свойства, жаропрочность.

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 настоящее время большое значение придается изучению влияния различных структурных факторов на механические свойства и жаропрочность ответственных литых деталей [1].

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 могут упрочнять сплав, другие – повышать пластичность, третьи – увеличивать жаропрочность [2, 3]. 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, взаимосвязи их со структурным состоянием металла очень ограничено.

Основным направлением получения высокой прочности улитых магниевых сплавов при сохранении достаточной вязкости является упрочнение их дисперсными частицами, в частности интерметаллидами [4, 5]. Образование интерметаллидов и их свойства обусловлены электронным строением взаимодействующих элементов, входящих в сплав. Легирующие элементы, взаимодействуя с магнием, образуют интерметаллиды, значительно влияющие на структуру и свойства литого металла [6].

Редкоземельные металлы (РЗМ) с недостроенными *d*-оболочками и имеющими близкие атомные диаметры с магнием, позволяют им образовывать сложнoleгированные твердые растворы и способствуют образованию большого числа интерметаллидных соединений [7]. Поэтому изучение влияния РЗМ на структурообразование и комплекс свойств магниевых сплавов является актуальным и перспективным направлением развития современного материаловедения.

Исследовали влияние редкоземельных элементов (Y, Nd и Sc) на морфологию и топологию интерметаллидных фаз в сплаве МЛ5, а также их влияние на структуру и свойства магниевого литья.

Магниевый сплав МЛ5 выплавляли в индукционной тигельной печи ИПМ-500. Расплав рафинировали флюсом ВИ-2 в раздаточной печи, из которой порционно отбирали ковшем расплав. В него вводили возрастающие присадки лигатур Mg – 20 %Y, Mg – 25 %Nd, Mg – 8 %Sc (0; 0,05; 0,1; 1,0 % – по расчету). После растворения лигатур расплав вновь подогревали до 790±5 °С и выдерживали 15 мин, после чего им заливали песчано-глинистые формы для получения стандартных образцов с рабочим диаметром 12 мм. Образцы для механических испытаний проходили термическую обработку в печах Бельвью и ПАП-4М по режиму: гомогенизация при температуре 415 °С, выдержка 24 часа, охлаждение на воздухе + старение при температуре 215 °С (выдержка 10 часов), охлаждение на воздухе).

Предел прочности и относительное удлинение образцов определяли 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 с помощью оптических эмиссионных спектрометров «SPECTROMAXx» и «SPECTROMAXxF», фотоэлектрических спектрометров МФС-8 и ТФС-36, ЕДРФ спектрометра «SPECTRO XEPOS».

Микроструктуру исследуемых сплавов изучали методами световой микроскопии («Neophot 32», «OLYMPUS IX 70»), а также с использованием программно-аппаратного комплекса «Видеогест-Структура 5.0» на базе металлографического микроскопа Axiovert 40MAT.

Микрорентгеноспектральный анализ структурных составляющих магниевых сплавов проводили на электронном микроскопе «JSM-6360LA».

Химический состав сплава различных вариантов микролегирования удовлетворял требованиям ГОСТ 2856-79 и по содержанию основных элементов находился примерно на одном уровне (8,6 % Al; 0,28 % Mn; 0,35 % Zn; 0,02 % Fe; 0,005 % Cu; 0,04 % Si).

Микроструктура стандартного сплава МЛ15 представляла собой δ - твердый раствор с наличием эвтектики типа $\delta + \gamma$ ($Mg_{17}Al_{12}$) и интерметаллидов $\delta(Mg_{17}Al_{12})$. Интерметаллидная фаза была двух типов: сферической формы, располагающейся внутри зерен, и пластинчатой – по границам зерен. По результатам микрорентгеноспектрального анализа сферические интерметаллиды содержали 15 % Al, ~ 80 % Mg и дополнительно Si и Mn, пластинчатые интерметаллиды имели состав ~ 60 % Mg и ~ 40 % Al (рис. 1).

Макрофрактографическое исследование изломов металла с возрастающими содержаниями иттрия, неодима и скандия (0,05; 0,1 и 1,0 масс. %) показало, что с повышением концентрации в сплаве этих элементов происходило заметное измельчение макрозерна, излом образцов становился матовым, мелкокристаллическим (рис. 2 а, в, д, ж).

С ростом содержания Sc, Y и Nd в сплаве МЛ15 размер микрозерна (рис. 2 б, г, е, з) и расстояние между осями дендритов 2-го порядка уменьшались (табл. 1). В сплаве без термообработки микротвердость эвтектики была в 1,6...1,8 раза больше матрицы. После проведения термической обработки микротвердость матрицы увеличивалась, а эвтектики снижалась, что свидетельствовало о повышении однородности термообработанного сплава. Средние значения микротвердости интерметаллидной фазы с неодимом составляла 4123 МПа, с иттрием – 4256 МПа, со скандием – 4412 МПа, что значительно выше твердости эвтектики и матрицы.

Повышение содержания РЗМ в сплаве увеличивало объемный процент интерметаллидов с размерами меньше 2 мкм и уменьшало объемную долю крупных интерметаллидов, больших 11,6 мкм. При этом, с увеличением объемного процента интерметаллидов повысились прочность и жаропрочность легированного магниевое сплава МЛ15. Интерметаллиды, располагающиеся как в центре зерна, так и по его границам, упрочняют сплав и повышают его жаропрочность. Пластичность же сплава в зависимости от количества интерметаллидов имеет нелинейную зависимость (рис. 3).

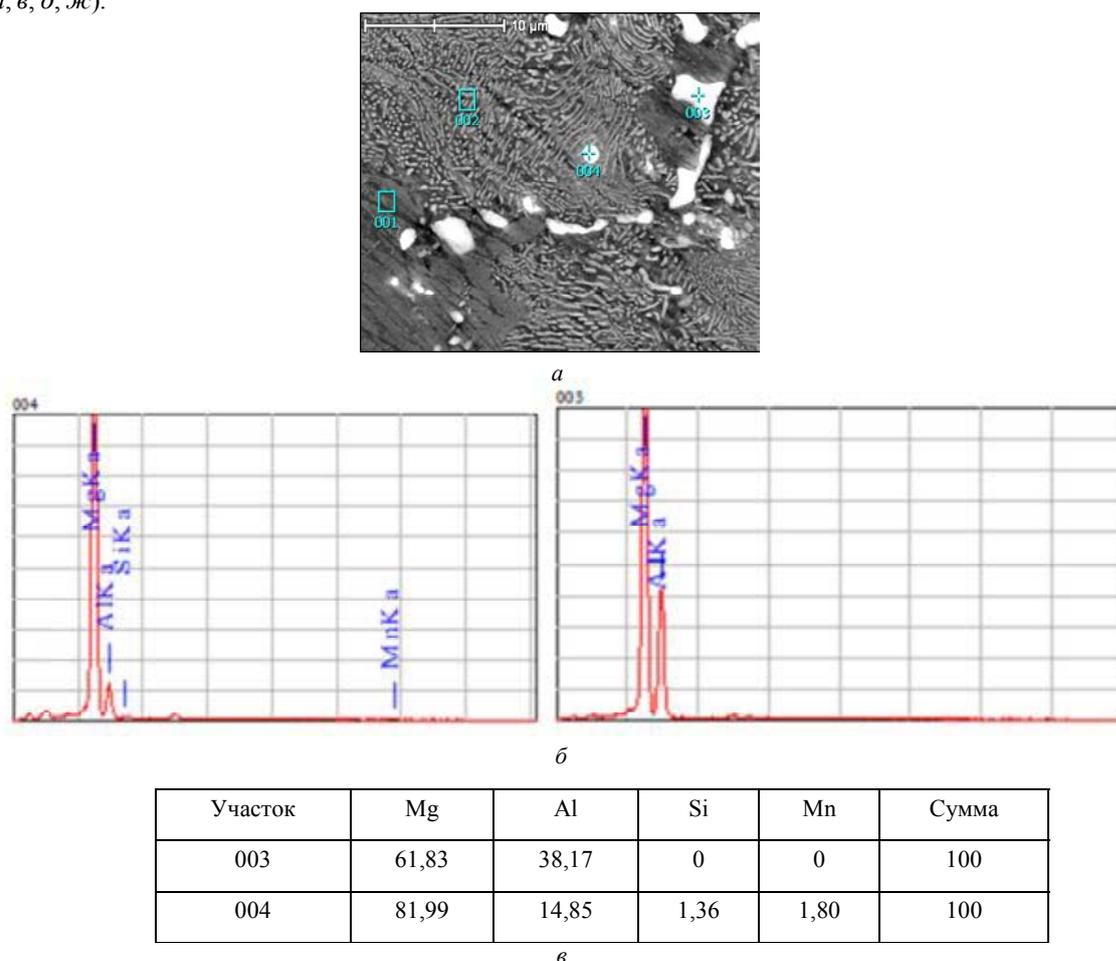


Рис. 1. Результаты МРСА стандартного сплава МЛ15, $\times 4500$: а – места анализа; б – спектрограммы анализируемых мест; в – химический состав отмеченных участков (масс. %)

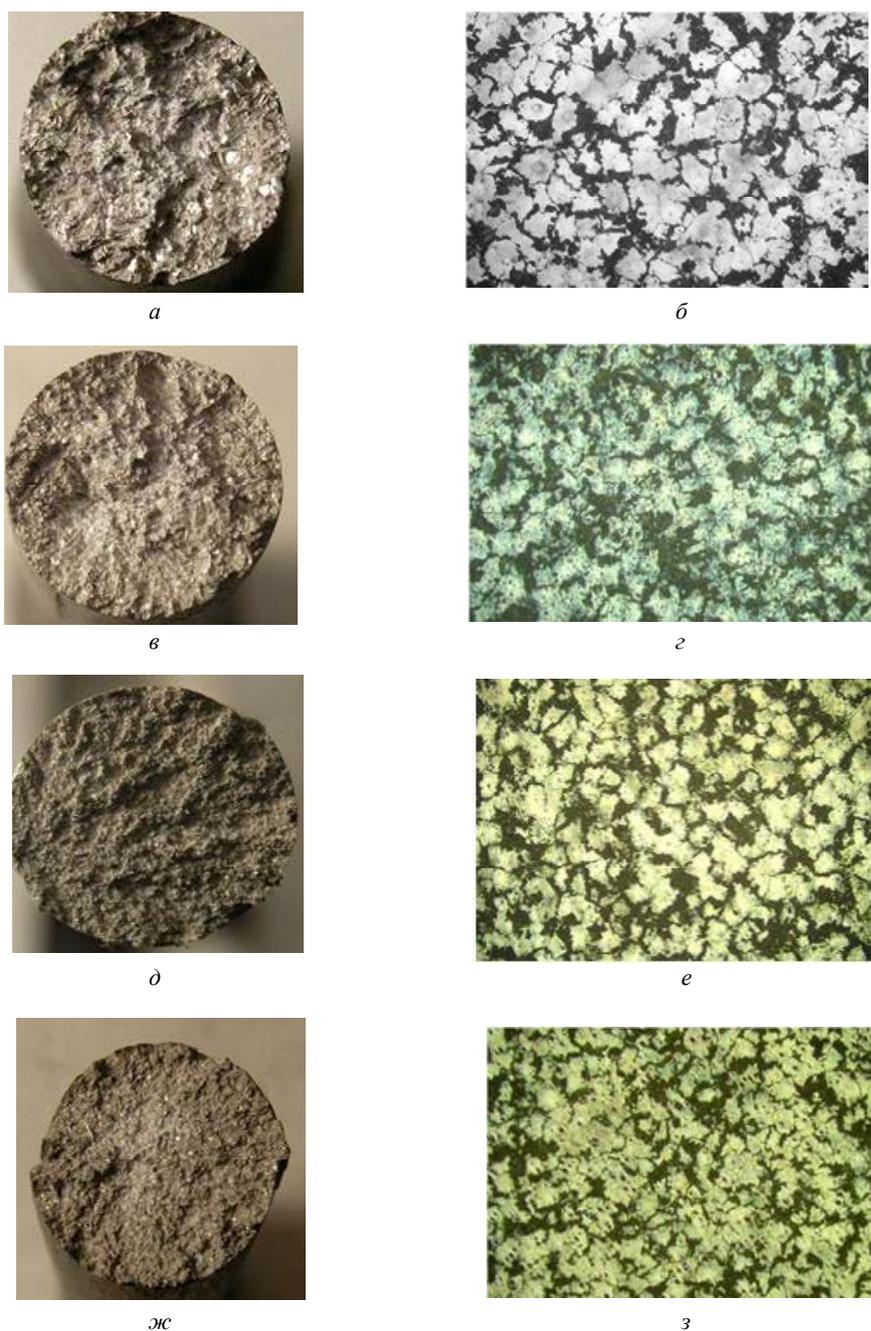


Рис. 2. Влияние РЗМ (масс. доля 0,1 %) на макро- ($\times 5$) и микроструктуру ($\times 200$) сплава МЛ5:

a, б – стандартный; в, г – Y; д, е – Nd; ж, з – Sc

Микрорентгеноспектральный анализ интерметаллидных фаз в сплаве МЛ5 с Y, Nd и Sc показал наличие этих элементов в своем составе, при этом исследуемые интерметаллиды имели сложный химический состав (табл. 2).

Подсчет объемной доли интерметаллидной фазы в сплаве исследуемых вариантов показал, что ее процент повышался с увеличением содержания легирующего элемента в металле (табл. 3). При содержании в сплаве 0,05...0,1 % легирующих элементов объемный процент сферических интерметаллидов по сравнению с пластин-

чатыми увеличивался в большей степени. Дальнейшее увеличение содержания легирующих элементов (до 1,0 %) приводило к незначительному росту объемного процента сферических включений, находящихся внутри зерна, и интенсивному увеличению числа пластинчатых.

Анализ распределения интерметаллидов по размерным группам показал, что в стандартном сплаве МЛ5 преобладали пластинчатые интерметаллиды, большинство из которых находилось в размерной группе 4...15 мкм. Сферические интерметаллиды в основном представлены размерной группой 2,0...7,9 мкм. Иссле-

двумя легирующие элементы в сплаве измельчали интерметаллидную фазу (до 2,0...11,5 мкм – для сферических и < 2,0...7,9 мкм – для пластинчатых). С ростом содержания исследуемых элементов увеличивался объемный процент интерметаллидов с размерами меньше 2 мкм и уменьшался для крупных интерметаллидов (> 11,6 мкм).

При содержании иттрия, неодима и скандия 0,05...0,1 % происходил интенсивный рост объемного

процента сферических интерметаллидов, располагающихся внутри зерна, измельчалось микрзерно и повышалась пластичность сплавов. Дальнейшее повышение содержания элементов в сплаве до 1,0 % увеличивало объемный процент пластинчатых и сферических интерметаллидов и повышало предел прочности. При этом жаропрочность сплава МЛ5 возрастала с увеличением содержания легирующих элементов.

Таблица 1 – Характеристики структурных составляющих сплава МЛ5, содержащего Sc, Y и Nd

Элемент	Содержание масс.% (расч.)	Размер микрозерна, мкм	Расстояние между осями дендритов 2-го порядка, мкм	Микротвердость структурных составляющих после термообработки HV, МПа	
				матрица	эвтектика
стандартный		140	22	1256,5	1426,6
Y	0,05	130	18	1385,6	1655,7
	0,1	130	17	1451,8	1731,6
	1,0	100	17	1630,0	1789,5
Nd	0,05	120	18	1290,0	1612,4
	0,1	100	17	1390,5	1681,6
	1,0	90	17	1407,6	1725,5
Sc	0,05	120	18	1465,7	1723,3
	0,1	100	17	1547,1	1787,6
	1,0	90	16	1675,0	1792,3

Примечание: в таблице приведены средние значения.

Таблица 2 – Химический состав интерметаллидов в сплаве МЛ5, легированного различными химическими элементами

Вариант легирования сплава	Содержание элементов интерметаллидов, % масс.				
	Легирующий элемент	Mn	Al	Si	Mg
Sc	32,65	6,49	26,87	–	33,99
Y	15,74	46,36	34,33	0,58	2,99
Nd	31,26	1,37	44,25	0,16	22,96

Таблица 3 – Объемный процент интерметаллидов (V) и его распределение по размерным группам в сплаве МЛ5 с Y, Nd и Sc

Элемент	Содержание, %	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		6/0	18/54	36/30	30/12	30/12	18/0	138/108
Y	0,05	42/0	84/72	24/42	12/24	30/0	18/0	210/138
	0,1	66/0	90/150	42/42	12/18	18/0	6/0	234/210
	1,0	78/78	162/126	42/24	6/6	18/0	0/0	306/234
Nd	0,05	48/0	48/108	30/42	24/36	36/6	18/0	204/192
	0,1	90/18	30/114	48/42	18/30	18/6	18/0	222/210
	1,0	150/57	24/114	72/30	18/24	12/6	6/0	282/231
Sc	0,05	42/0	60/78	48/36	12/30	6/0	0/0	168/144
	0,1	72/24	12/114	78/30	6/24	6/0	0/0	174/192
	1,0	81/96	81/48	132/24	6/24	0/0	0/0	300/192

Примечание: в числителе – объемный процент пластинчатых интерметаллидов, в знаменателе – сферических.

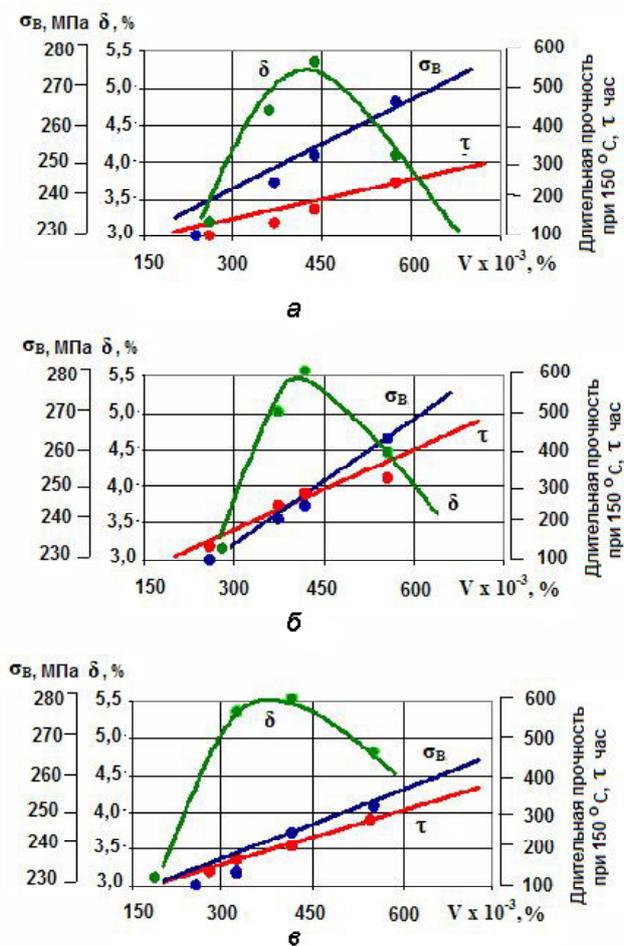


Рис. 3. Влияние объемного процента интерметаллидов на свойства легированного сплава МЛ5: а – Y; б – Nd; в – Sc

Выводы

1. Установлено, что микролегирование магниевых сплавов РЗМ в количестве от 0,05 до 0,1 масс. % увеличивает объемный процент 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.

2. Показано, что при объемной доле 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.

3. Увеличение содержания иттрия, неодима и скандия в сплаве МЛ5 приводит к повышению объемного процента интерметаллидов в структуре металла и повышают его прочность и жаропрочность.

Список литературы

1. Богуслаев В. А. Авиационно-космические материалы и технологии / В. А. Богуслаев, А. Я. Качан, Н. Е. Калинина. – Запорожье : ОАО «Мотор Сич», 2009. – 382 с. – Библиогр. : С. 376–378.
2. Рейнор Г. В. Металловедение магния и его сплавов / Рейнор Г. В. – М. : Metallurgia, 1964. – 486 с.
3. Садков В. В. Применение Mg-сплавов в самолетах ОАО «Туполев» / В. В. Садков, О. П. Авдеева, В. П. Агеев // Metallurgia машиностроения. – 2006. – № 1. – С. 11–14.
4. Кан Р. Хаазен. Физическое материаловедение. Вып. 2: Фазовые превращения. Metallographia / Кан Р. Хаазен. – М. : Мир, 1968. – 490 с.
5. Алесковский В. Б. Химия твердых веществ / Алесковский В. Б. – М. : Высшая школа, 1978. – 256 с.
6. Дриц М. Е. Магниеые сплавы для работы при повышенных температурах / Дриц М. Е. – М. : Наука, 1964. – 229 с.
7. Wang Q. Effects of RE microstructure and properties of AZ91 magnesium alloy/ Wang Qu-dong, Lu Yi-zhen, Zeng Xiao-qin // Trans. Nonferrous metals Soc. China. – 2000. – 10. – № 2. – P. 235–239.

Одержано 17.04.2014

Шаломєєв В.А. Вплив РЗМ на морфологію і типологію інтерметалідної фази в магнієвих сплавах

Показано вплив рідкісноземельних металів (Y, Nd і Sc) на морфологію і типологію інтерметалідної фази у сплаві МЛ5. Проведена кількісна та якісна оцінка інтерметалідів у сплаві з присадками 0,05...1,0 % Nd, Y і Sc, досліджено їх вплив на структуру, механічні властивості та жароміцність магнієвого литва.

Ключові слова: рідкісноземельні метали, магнієвий сплав, інтерметаліди, структура, механічні властивості, жароміцність.

Shalomeev V. Effect of rare-earth metals of morphology and topology of intermetallic phases in magnesium alloys

The effect of rare earth metals (Y, Nd and Sc) on morphology and topology of the intermetallic phase in the alloy ML5 has been shown. The quantitative and qualitative evaluation of intermetallic compounds in the alloy with additions of 0,05...1,0 % Nd, Y and Sc was done and their effect on the structure, mechanical properties and heat resistance of magnesium casting was studied.

Key words: rare earth metals, magnesium alloy, intermetallic compounds, structure, mechanical properties, heat resistance.