



ПРИКЛАДНЫЕ НАУЧНЫЕ РАЗРАБОТКИ

УДК 669.721.5

ВЛИЯНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МАГНИЕВОГО ЛИТЬЯ

Шаломеев Вадим Анатольевич, доктор технических наук, профессор
Кафедра физического материаловедения, Запорожский национальный технический университет,
ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, Украина, 69063
Контактный тел.: (050) 602-30-00
E-mail: gr@radiocom.net.ua

Показано вплив рідкоземельних металів (Y, Nd і Sc) на структуру і властивості лиття зі сплаву МЛ5. Проведена кількісна та якісна оцінка структурних складових магнієвого сплаву з присадками рідкоземельних елементів. Показано, що легування магнієвих сплавів Sc, Nd і Y сприяє утворенню сферичних інтерметалідів менших розмірних груп. Досліджено їх позитивний вплив на механічні властивості і жароміцність металу.

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

Показано влияние редкоземельных металлов (Y, Nd и Sc) на структуру и свойства литья из сплава МЛ5. Проведена количественная и качественная оценка структурных составляющих магниевого сплава с присадками редкоземельных элементов. Показано, что легирование магниевых сплавов Sc, Nd и Y способствует образованию сферических интерметаллидов меньших размерных групп. Исследовано их положительное влияние на механические свойства и жаропрочность металла.

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

1. Введение

Снижение массы машин и механизмов является приоритетной задачей для их производителей [1]. Однако, несмотря на это, масса конструкций постоянно возрастает из-за усложнения техники и введения многочисленных дополнительных устройств, повышающих комфорт и безопасность движения [2]. Для разрешения этого противоречия большое внимание уделяется расширению применения литья из магниевых сплавов для узлов и агрегатов, взамен существующим алюминиевым и стальным отливкам. При этом, требования, предъявляемые к магниевым сплавам постоянно растут [3]. Поэтому повышение механических свойств и жаропрочности отливок из магниевых сплавов является актуальной задачей.

2. Анализ литературных данных

Одним из перспективных направлений получения высокого комплекса свойств литых магниевых сплавов является их модифицирование редкоземельными элементами (РЗМ) [4]. Системы магний – РЗМ образуют отдельную группу сплавов, характеризу-

ются однотипными фазами, имеющих одинаковую кристаллическую структуру [5]. При этом, редкоземельные металлы взаимодействуют с магнием и образуют интерметаллиды, значительно влияющие на структуру и свойства литого металла [6].

Образование интерметаллидов и их свойства обусловлены электронным строением взаимодействующих элементов, входящих в сплав. Редкоземельные металлы с недостроенными *d*-оболочками и имеющими близкие атомные диаметры с магнием, позволяют им образовывать сложнелегированные твердые растворы и способствуют образованию большого числа интерметаллидных соединений [7]. В магниевых сплавах, содержащих РЗМ (Sc, Y, Nd), образуется устойчивая интерметаллидная фаза $Mg_3Al_4Zn_2Re$, которая измельчает зерно, повышает микротвердость сплава и способствует повышению его механических свойств [8].

Скандий представляет перспективный материал для создания легких сплавов с повышенными свойствами [9] и может измельчать литое зерно в сплавах. Однако скандий не образует химических соединений с магнием и его целесообразно вводить в магниевые сплавы, содержащие алюминий [10].

Влияние скандия на структуру и свойства отливок из магниевых сплавов практически не изучалось.

Исследователи, изучавшие влияние иттрия на свойства магниевых сплавов, приходят к выводу, что его положительное влияние на магний обусловлено образованием тугоплавкой интерметаллидной фазы $Mg_{24}Y_5$, которая дает возможность повысить жаропрочность сплавов до 300 °С [11]. В других работах указывается, что добавки иттрия в магниевый сплав повышают его жаропрочность за счет дисперсных частиц оксидов иттрия [12].

Однако, рациональное содержание иттрия и скандия в магниевых сплавах требует уточнений. Ряд исследователей считают, что оптимальная присадка иттрия и скандия составляет 1,5...1,6 % [13], другие [14] — до 5,2 %. В то же время, их выводы однозначны в том, что образующиеся интерметаллиды измельчают микроструктуру, повышают прочность и жаропрочность при снижении относительных удлинения и сужения магниевых сплавов.

Таким образом, анализ литературных данных по влиянию отдельных редкоземельных элементов на механические свойства и жаропрочность литья из магниевых сплавов изучены не достаточно, противоречивы и требуют дальнейших исследований для определения их оптимального содержания [15].

3. Постановка проблемы и задачи исследования

Сплавы магния с редкоземельными металлами представляют значительный практический интерес, поскольку их свойства улучшаются при введении небольших количеств редкоземельных элементов.

Поэтому, изучение влияния РЗМ на структурообразование и комплекс свойств магниевых сплавов, позволяющее улучшить литье для машиностроения, позволит расширить их область применения и повысить технические характеристики узлов и агрегатов [16].

В задачи исследования входило:

- ➔ определение оптимальных содержаний редкоземельных элементов в магниевом сплаве МЛ5;
- ➔ изучение влияния Sc, Y и Nd на структурообразование в сплаве, морфологию и топологию образующихся фаз;
- ➔ определение зависимостей влияния количества и формы интерметаллидной фазы на механические свойства и жаропрочность магниевых сплавов.

4. Исследование влияния Sc, Y и Nd на структурообразование, механические свойства и жаропрочность сплава МЛ5

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, выдерживали и 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 (τ_{150}^{80}) 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»).

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).

Макрофрактографическое исследование изломов литых образцов из стандартного сплава МЛ5 показало наличие в структуре излома крупнокристаллического строения (рис. 1, а). Введение редкоземельных элементов заметно измельчало микроструктуру металла, и характер излома становился матовым мелкокристаллическим (рис. 1, б-г).

Микроструктура термообработанного стандартного сплава МЛ5 представляла собой δ -твердый раствор с наличием эвтектики $\delta + \gamma(Mg_{17}Al_{12})$ и интерметаллидов $\gamma(Mg_{17}Al_{12})$ (рис. 2, а). Введение редкоземельных металлов в исследуемый сплав от 0,05 % до 1,0 % каждого измельчало микрозерно и структурные составляющие сплава (рис. 2, б-г).

С увеличением содержания Sc, Y и Nd (до 1,0 % каждого) в сплаве МЛ5 размер микрозерна 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 увеличива-

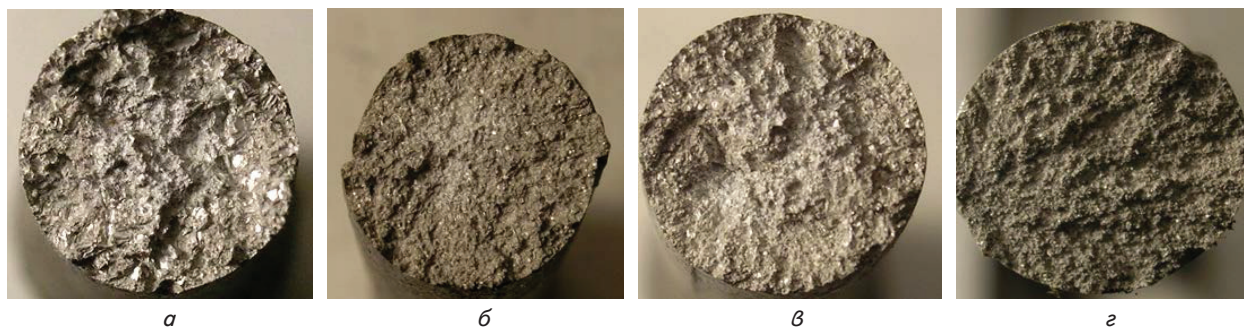


Рис. 1. Влияние РЗМ (мас. доля 0,1 %) на макроструктуру (× 5) сплава МЛ5:
 а — стандартный; б — Y; в — Nd; з — Sc

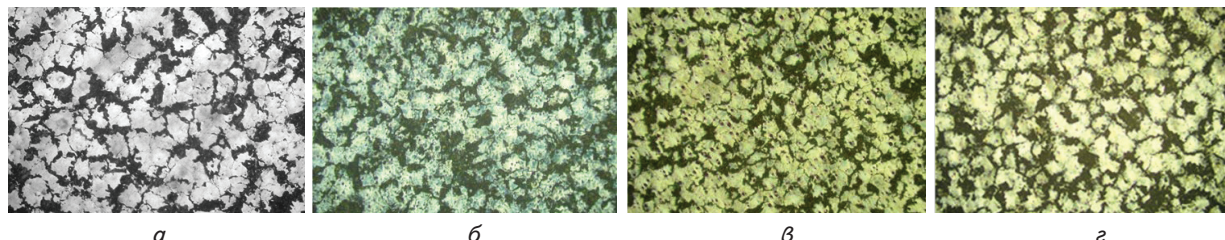


Рис. 2. Влияние РЗМ (мас. доля 0,1 %) на микроструктуру (× 200) сплава МЛ5:
 а — стандартный; б — Y; в — Nd; з — Sc

лась, 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.

Таблица 1

Характеристики структурных составляющих термообработанного сплава МЛ5, содержащего Sc, Y и Nd

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

Примечание: в таблице приведены средние значения.

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

Таблица 2

Химический состав интерметаллидов в сплаве МЛ5, легированного различными химическими элементами

Вариант легирования сплава	Содержание элементов в интерметаллидах, % мас.				
	Легированный 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

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 объемный процент сферических интерметаллидов по сравнению с пластинчатыми увеличивался в большей степени. Дальнейшее увеличение содержания легирующих (до 1,0 %) приводило к незначительному росту объемного процента сферических включений, находящихся внутри зерна, и интенсивному увеличению числа пластинчатых.

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						Всего
		< 2	2...3,9	4...7,9	8...11,5	11,6...15	15,1...19	
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.

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. Исследуемые 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). Установлено, что количество, размер и форма интерметаллидов зависят от содержания редкоземельных элементов в сплаве и в значительной степени определяют механические свойства сплава (табл. 4).

Таблица 4

Механические свойства и жаропрочность сплава МЛ5 с Y, Nd и Sc

Элемент	Содерж. масс. % (расчетн.)	Механические свойства				τ_{150}^{80} , час
		до термообработки		после термообработки		
		σ_b , МПа	δ , %	σ_b , МПа	δ , %	
стандартный		165,3	2,8	232,1	2,9	141,5
Y	0,05	171,5	3,3	235,9	5,9	180,5
	0,1	178,8	3,5	240,2	6,1	192,1
	1,0	184,8	3,4	249,1	4,6	272,5
Nd	0,05	153,2	2,9	244,3	4,6	165,4
	0,1	157,8	3,6	250,2	5,5	186,5
	1,0	178,2	3,4	265,0	4,0	234,1
Sc	0,05	165,6	3,8	246,8	4,4	208,5
	0,1	177,4	4,1	258,3	5,3	222,1
	1,0	180,2	3,8	272,0	5,0	283,4

Примечание: в таблице приведены средние значения.

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

процента сферических интерметаллидов, располагающихся внутри зерна, измельчалось микроструктура, повышались прочность и пластичность сплава. Дальнейшее повышение содержания элементов в сплаве до 1,0 % увеличивало объемный процент пластинчатых и сферических интерметаллидов, повышало предел прочности и несколько снижало пластические характеристики металла. При этом, жаропрочность сплава МЛ5 возрастала с увеличением содержания легирующих элементов.

Таким образом, оптимальное содержание редкоземельных элементов в сплаве, обеспечивающее лучшее сочетание прочности, пластичности и жаропрочности, составляет ~ 0,1 %. Такое содержание Sc, Y и Nd в сплаве МЛ5 обеспечивает повышение прочности до 10 %, пластичности ~ в 2 раза и жаропрочности — до 60 %.

5. Выводы

1. При легировании магниевых сплавов редкоземельными металлами образуются комплексные интерметаллидные фазы, отличающиеся топологией и морфологией. Под их влиянием измельчается макро- и микроструктура металла и повышается микротвердость структурных составляющих.

2. Установлено влияние размера интерметаллидной фазы, ее морфологии и топологии на механические свойства отливок из магниевых сплавов. Содержание РЗМ в сплаве 0,05...0,1 % каждого способствует повышению, как прочности, так и пластичности металла за счет образования комплексных сферических интерметаллидов.

3. Увеличение содержания иттрия, неодима и скандия в сплаве МЛ5 до 1,0 % дополнительно повышает объемный процент интерметаллидов в металле и улучшает его прочность и жаропрочность.

4. Легирование магниевых сплавов МЛ5 редкоземельными элементами расширяет его область применения и делает перспективным конструкционным материалом для машиностроения.

Литература

1. Brungs, D. Innovationen bei Gusswerkstoffen [Text] / D. Brungs, A. Mertz // Konstruktion : Zeitschrift fur Produktentwicklung. — 2000. — 52, № 7–8. — P. 33–36.
2. Kambe, H. Application of alloys of magnesium for details of cars [Text] / H. Kambe // Kinzoku = Metals and Technol. — 2001. — 71, № 6. — P. 51–54.
3. Kraus, J. Richtig kombiniert : Leichtbaukonzepte bei Automobilen sind nur uber Verbundsysteme realisierbar [Text] / J. Kraus. — Maschinenmarkt, Sonderausg, 1998. — P. 152–154.
4. Кан, Р. Хаазен Физическое материаловедение. Вып. 2: Фазовые превращения. Металлография [Текст] / Р. Хаазен Кан. — М.: Мир, 1968. — 490 с.
5. Алесковский, В. Б. Химия твердых веществ [Текст] / В. Б. Алесковский. — М.: Высшая школа, 1978. — 256 с.
6. Дриц, М. Е. Магниеые сплавы для работы при повышенных температурах [Текст] / М. Е. Дриц. — М.: Наука, 1964. — 229 с.
7. Wang, Q. Effects of RE microstructure and properties of AZ91 magnesium alloy [Text] / Q. Wang, Lu Yi-zhen, Zeng Xiao-qin // Trans. Nonferrous metals Soc. China. — 2000. — 10, № 2. — С. 235–239.
8. Rourke, D. J. Magnesium — current status and future prospects [Text] : Proc. Intern. Magnesium Conf. / D. J. Rourke // Conference in conjunction with METER 2000: Magnesium New Business Opportunies. — Brescia. — 2000. — С. 14–23.
9. Kaufmann, H. Metallurgical and processing aspects of the NRS semi-solid casting technology [Text] / H. Kaufmann, H. Wabusseg, P. J. Uggowitzzer // Aluminium. — 2000. — 76, N 1, 2. — С. 6–12.
10. Чернега, Д. Ф. Некоторые технологические особенности разработки скандийсодержащего модификатора для магниевых сплавов [Текст] / Д. Ф. Чернега, В. Ф. Сороченко, П. Д. Кудь [и др.] // Процессы литья. — 2002. — № 1. — С. 28–32.
11. Миклина, Н. В. Исследования в области производства высокопрочных магниевых сплавов, легированных иттрием [Текст] / Н. В. Миклина // Технология легких сплавов, ВИЛС. — 1975. — № 10. — С. 81–87.
12. Kouichi, M. Creep strength of Mg based alloys: Abstr. 130th Annual International Meeting and Exhibition of TMS, New Orleans, La, Febr. 11–15, 2001 [Text] / Maruama Kouichi, Suzuki Mayumi, Sato Hiroyuki // JOM: Miner., Metals and Mater. Soc. — 2000. — 52, N 11. — С. 103–109.
13. Zhang, Shi-chang. Effect of mischmetal and yttrium on microstructures and mechanical properties of Mg-Al alloy [Text] / Shi-chang Zhang, Wei Bo-chang, Cai Qizhou [and oth.] // Trans. Nonferrous Metals Soc. China. — 2003. — 13, N 1. — С. 83–87.
14. Liang, Weizhong. Effect of yttrium on microstructures and properties at elevated temperature of Mg-0,8Zr-0,35Zn alloys [Text] / Weizhong Liang, Ning Zhiliang, Wang Haibo [and oth.] // J. Rare Earths. — 2004. — 22, N 2. — С. 268–271.
15. Dieter, B. Innovations in casting alloys — aluminium and magnesium castings [Text] / B. Dieter, M. Andreas // Cast. Plant and Technol. Int. — 2000. — 16, № 4. — С. 8–12.
16. Kambe, H. Application of alloys of magnesium for details of cars [Text] / H. Kambe // Metals and Technol. — 2001. — 71, № 6. — С. 51–54.

Abstract. The influence of rare-earth elements (Sc, Nd, Y) on the structurization, mechanical properties and heat resistance of a widely used magnesium alloy ML5 was studied.

The role of intermetallic phases, formed by doping rare-earth metals of magnesium alloy ML5 was shown. The dependence of the morphology and topology of these phases on the chemical composition of magnesium alloys and their influence on the metal structure and properties was determined. It was shown that alloying of magnesium alloys Sc, Nd and Y reduces the intermetallic phase. It was found that spherical intermetallides of smaller-sized groups had a greater impact on improving the mechanical properties of magnesium alloys, and heat resistance of the alloy was determined by the number of a heat-resistant intermetallic phase.

It was found that the ultimate strength of alloy ML5 raises with increasing the content of rare-earth elements up to 1,0 %, and the ductility increases only when the content of elements is in the range of 0,05...0,1 %.

Applying rare-earth metals, when smelting magnesium alloy ML5 provides an increased level of mechanical properties and heat resistance of castings, which makes it promising in the development of new machines and units.

Keywords: magnesium alloy, rare-earth metals, alloying, structure, intermetallides, mechanical properties, heat resistance.