

УДК 669.721'5'863'859

Рохлин Л. Л., Лукьянова Е. А., Добаткина Т. В., Тарыгина И. Е.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИТЫХ СПЛАВОВ Mg–Y–Gd–Zr И Mg–Sm–Tb–Zr, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Несмотря на более высокий уровень механических свойств магниевых деформируемых сплавов, значительная часть изделий из магниевых сплавов производится путем фасонного литья. Преимуществом литейных сплавов перед деформируемыми является экономия металла при производстве деталей, поскольку высокая точность размеров и хорошая чистота поверхности отливок почти исключают их обработку резанием. Результаты исследования магниевых сплавов, содержащих редкоземельные металлы (РЗМ), показали целесообразность их использования в качестве легирующих элементов для повышения прочности и жаропрочности магния [1]. Причем легирование магния двумя редкоземельными металлами, принадлежащими разным подгруппам (цериевой и иттриевой), может быть весьма перспективным для увеличения эффекта упрочнения при старении магниевых сплавов [2]. В последние годы в области исследования магниевых сплавов с РЗМ наибольшее внимание уделяется сплавам системы Mg–Y–Gd–Zr, в которых достигаются наиболее высокие прочностные свойства при комнатной и повышенных температурах [3–6]. На основе данной системы разработан деформируемый сплав ИМВ7-1 состава Mg–(5–6,5) %Y–(3,5–5) %Gd–(0,15–0,7) %Zr [7]. Сплавы системы Mg–Sm–Tb–Zr ранее не исследовались. Однако можно было ожидать, что в сплавах системы Mg–Sm–Tb–Zr уровень прочностных свойств окажется высоким, поскольку каждый их РЗМ в своей подгруппе (самарий в цериевой и тербий в иттриевой) в двойных сплавах с магнием является наиболее эффективным упрочнителем магния [1].

Целью настоящего исследования было изучение структуры и свойств литых магниевых сплавов двух указанных систем Mg–Y–Gd–Zr и Mg–Sm–Tb–Zr, содержащих гадолиний, иттрий, самарий и тербий в пределах их совместной растворимости в твердом магнии.

Сплавы для исследования выплавляли в электрической печи сопротивления в стальных тиглях с использованием защитного флюса ВИ-2, состоящего из 38–46 % MgCl₂, 32–40 % KCl, 3–5 % CaF₂, 5–8 % BaCl₂, 1,5 % MgO, < 8 % (NaCl+CaCl₂). Для приготовления сплавов использовали следующие материалы: магний Мг95 (> 99,95 % Mg), самарий См-1 (> 99,83 % Sm), тербий ТбМ-1 (> 99,85 % Tb), иттрий ИтМ-1 (> 99,83 % Y), гадолиний ГдМ-1 (> 99,85 % Gd) и промышленную лигатуру Mg–9,6 % Zr. Все РЗМ вводили в сплавы в виде предварительно приготовленных лигатур: Mg–43,6 % Sm, Mg–39,2 % Tb, Mg–39,15 % Gd, Mg–42 % Y, Mg–47,7 % Y. Из тигля расплав отливался в изложницу из нержавеющей стали, нагретую до 750° С, которая затем медленно погружалась в холодную воду. Такой способ отливки обеспечивал направленную кристаллизацию расплава вдоль вертикальной оси изложницы и, как следствие, плотную однородную структуру слитка с минимальной пористостью.

Составы сплавов для оценки механических свойств выбирались следующим образом: Y : Gd = 1 : 1, близким к соотношению их в сплаве ИМВ7-1, а Sm : Tb равным от 1 : 2 до 1 : 5 (масс. %). При этом суммарное содержание РЗМ в каждом сплаве не превышало 14 масс.%, а небольшая добавка циркония ~0,5 % вводилась для измельчения зерна литой структуры. Сплавы системы Mg–Y–Gd–Zr изучались в более широком концентрационном интервале по содержанию иттрия и гадолиния по сравнению с указанным в авторском свидетельстве [7].

Состав слитков всех сплавов принимался по химическому анализу, который осуществлялся методом атомно-эмиссионной спектроскопии с использованием индукционной плазмы на приборе Inductivity Coupled Plasma-Atomic Spectrometer, ULTIMA2C, Jobin-YvonFirm.

Из слитков сплавов готовили образцы, которые гомогенизировались при температуре 515°C в течение 6 ч для сплавов системы Mg–Y–Gd–Zr и при температуре 520°C в течение 8 ч для сплавов системы Mg–Sm–Tb–Zr с последующей закалкой в воде комнатной температуры для получения пересыщенного твердого раствора на основе магния. Закаленные образцы подвергали изотермическому старению при 200°C в течение 24, 32, 64 ч. Выбранные режимы старения обеспечивали получение оптимального сочетания прочности и пластичности (200°C, 24, 32 ч) или максимального упрочнения (200°C, 64 ч) [1, 5]. Механические свойства при растяжении определяли, используя универсальную испытательную машину ИНСТРОН 3382 со скоростью деформации 1 мм/мин на стандартных образцах с диаметром рабочей части 5 мм. Шлифы для исследования микроструктуры готовили путем полировки на сукне с использованием суспензии окиси хрома в воде. При травлении шлифов для выявления фазы использовался 0,5 %-ный раствор азотной кислоты в спирте, а для выявления границ зерен магниевое твердого раствора – раствор, содержащий 60 % этиленгликоля, 20 % уксусной кислоты, 1 % азотной кислоты и 19 % воды. Исследование микроструктуры проводилось на микроскопе М-24 фирмы Рейхерт.

Микроструктурные исследования сплавов показали, что в структуре литых сплавов при содержании РЗМ больше 3 % наблюдаются серые кристаллы соединений магния с РЗМ, образовавшихся в результате неравновесной кристаллизации (рис. 1 а, б). Количество кристаллов соединений магния с РЗМ в структуре увеличивалось по мере увеличения содержания РЗМ. Гомогенизация слитков приводила к растворению этих соединений магния с РЗМ практически полностью, даже в самых легированных сплавах (рис. 1 в, г). Были видны также отдельные дисперсные черные кристаллы циркониевой фазы (α Zr). Заметных изменений в структуре сплавов после старения при наблюдении ее в оптическом микроскопе не наблюдалось. Электронномикроскопические исследования отожженных при температуре старения 200°C сплавов системы Mg–Sm–Tb [8] и системы Mg–Y–Gd–Zr [9] в рассматриваемой области концентраций показали, что в структуре сплавов происходит образование метастабильных фаз β'' и β' , обеспечивающих упрочнение сплавов указанных систем в процессе старения.

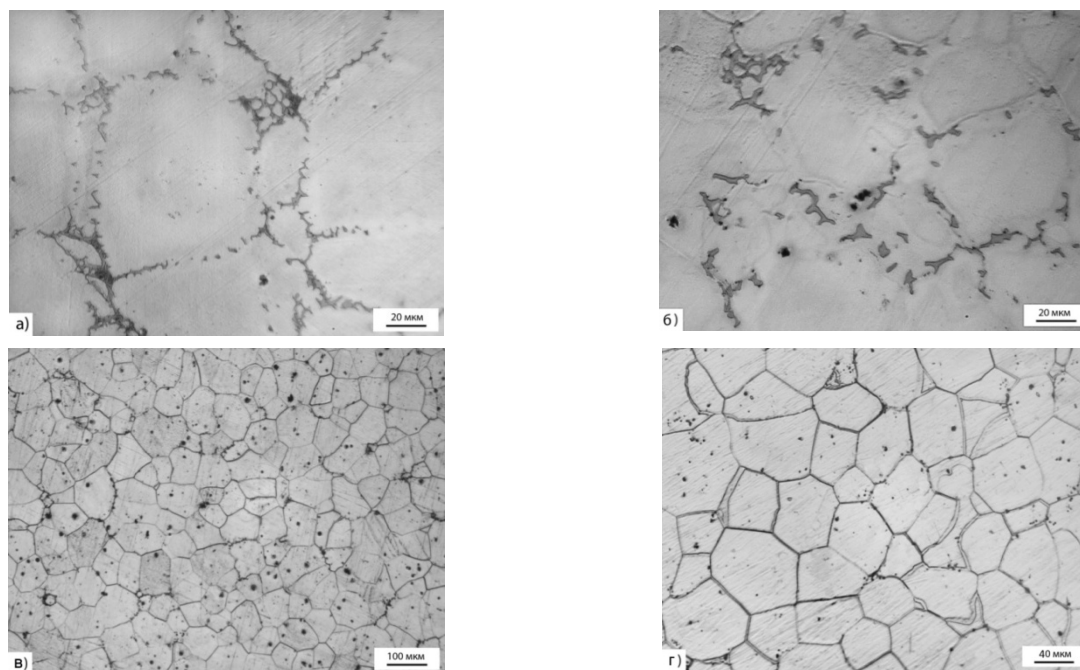


Рис.1. Микроструктура сплавов в литом и гомогенизированном состояниях:

а – сплав Mg–2,29 % Sm–5,66 % Tb–0,10 % Zr в литом состоянии; б – сплав Mg–4,3 % Y–5,32 % Gd–0,44 % Zr в литом состоянии; в – сплав Mg–2,29 % Sm–5,66 % Tb–0,10 % Zr в гомогенизированном состоянии; г – сплав Mg–4,3 % Y–5,32 % Gd–0,44 % Zr в гомогенизированном состоянии

В табл. 1 представлены результаты определения механических свойств сплавов системы Mg–Y–Gd–Zr в гомогенизированном состоянии при различных содержаниях иттрия и гадолиния. Можно видеть, что по мере увеличения содержания легирующих элементов возрастает как предел прочности, так и предел текучести при некотором снижении пластичности. Учитывая полученные данные, оптимальным содержанием легирующих элементов можно считать содержание иттрия и гадолиния порядка 5 % каждого, при котором они полностью растворяются в твердом магнии при температуре гомогенизации. Указанные значения соответствуют их содержанию в сплаве ИМВ7-1 [7].

Таблица 1

Механические свойства литых сплавов системы Mg–Y–Gd–Zr после гомогенизации при температуре 515°C, в течение 6 ч

Состав сплава по химическому анализу	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Mg–0,45 % Y–0,7 % Gd–0,58 % Zr	150	71	11,9
Mg–0,82 % Y–1,2 % Gd–0,47 % Zr	165	77	17,0
Mg–1,68 % Y–2,16 % Gd–0,46 % Zr	171	84	20,9
Mg–2,92 % Y–3,8 % Gd–0,45 % Zr	189	118	11,3
Mg–4,23 % Y–5,34 % Gd–0,42 % Zr	230	161	9,3
Mg–6,07 % Y–7,06 % Gd–0,26 % Zr	222	188	1,0

Дальнейшие исследования по изучению влияния различных видов термической обработки на прочностные свойства проводились на сплавах близкого к ИМВ7-1 состава, содержащих около 5 % Gd и около 3 % Y. В табл. 2 приведены механические свойства сплавов Mg–Y–Gd–Zr при комнатной температуре в различных состояниях: 1) литом, 2) гомогенизированном после литья, 3) состаренном после литья, 4) состаренном после гомогенизации. Из приведенных данных видно, что старение приводит к повышению прочностных свойств сплавов Mg–Y–Gd–Zr как непосредственно после литья, так и после гомогенизации. Следует отметить достаточно высокую пластичность сплавов во всех исследованных состояниях.

Таблица 2

Механические свойства литых сплавов системы Mg–Y–Gd–Zr в различных состояниях

Состав сплава по химическому анализу	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Mg–2,35 % Y–4,8 % Gd–0,3 % Zr Литое состояние	205	119	15,2
Mg–2,81 % Y–5,2 % Gd–0,35 % Zr Литое состояние + старение 200° С, 24 ч	223	137	5,6
Mg–2,96 % Y–4,57 % Gd–0,35 % Zr Гомогенизация 515° С, 6 ч	217	135	21,1
Mg–3,19 % Y–5,47 % Gd–0,3 % Zr Гомогенизация 515° С, 6 ч + старение 200° С, 24 ч	247	123	10,2

В табл. 3 приведены результаты определения механических свойств сплавов Mg–Sm–Tb–Zr в гомогенизированном и состаренном после гомогенизации состояниях. Полученные результаты показали, что с увеличением содержания РЗМ в сплавах Mg–Sm–Tb–Zr

также, как и в случае сплавов системы Mg–Y–Gd–Zr, прочностные свойства в общем повышаются, а пластичность снижается. Сплавы, содержащие больше 1,5 % Sm и 4 % Tb, заметно упрочняются в процессе старения. Можно считать, что наилучшие прочностные свойства с приемлемой пластичностью показал сплав, содержащий 2,29 % Sm и 5,66 % Tb, имеющий предел прочности – 303 МПа; предел текучести – 188 МПа; относительное удлинение – 5,6 %. Для сравнения, наиболее прочный зарубежный промышленный литейный магниевый сплав WE54, содержащий в основном иттрий, а также РЗМ цериевой подгруппы, в состаренном состоянии имеет следующие характеристики: предел прочности – 250 МПа; предел текучести – 172 МПа; относительное удлинение – 2 % [6]. Сплав Mg–2,29 % Sm–5,66 % Tb–0,10 % Zr имеет преимущество по сравнению с WE54 не только по пределу прочности и пределу текучести, но и по относительному удлинению.

Таблица 3.

Механические свойства литых сплавов системы Mg–Sm–Tb–Zr в гомогенизированном и состаренном после гомогенизации состояниях

Состав сплава по химическому анализу	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Гомогенизация 520° С, 8 ч			
Mg–0,33 % Sm–1,03 % Tb–0,59 % Zr	155	60	18,8
Mg–0,37 % Sm–1,97 % Tb–0,58 % Zr	157	68	14,8
Mg–0,94 % Sm–3,83 % Tb–0,42 % Zr	163	79	14,9
Mg–1,32 % Sm–5,33 % Tb–0,28 % Zr	164	81	12,4
Mg–1,82 % Sm–5,78 % Tb–0,16 % Zr	181	107	11,7
Гомогенизация 520° С, 8 ч + Старение 200° С, 24 ч			
Mg–1,21 % Sm–2,45 % Tb–0,30 % Zr	168	74	10,9
Mg–1,45 % Sm–2,48 % Tb–0,21 % Zr	168	114	4,1
Mg–1,9 % Sm–4,6 % Tb–0,19 % Zr	238	178	2,5
Mg–2,29 % Sm–5,66 % Tb–0,10 % Zr	303	188	5,6

Таким образом, проведенные исследования показали, что литые сплавы систем Mg–Sm–Tb–Zr и Mg–Y–Gd–Zr обладают достаточно высокими механическими свойствами при комнатной температуре. Кроме того, учитывая то, что эти сплавы содержат в значительном количестве такие легирующие добавки, как иттрий, гадолиний, самарий и тербий, повышающие жаропрочность магниевых сплавов [1, 5, 6], можно предполагать, что при повышенных температурах они будут иметь также высокие прочностные свойства и представят интерес в качестве жаропрочных литейных магниевых сплавов.

ВЫВОДЫ

1. Изучены микроструктура и механические свойства при растяжении при комнатной температуре магниевых сплавов систем Mg–Y–Gd–Zr и Mg–Sm–Tb–Zr, полученных методом направленной кристаллизации, в зависимости от содержания легирующих элементов и условий термической обработки.

2. Показано, что с увеличением содержания редкоземельных металлов в исследованных сплавах их прочностные свойства повышаются.

3. Наиболее высокие прочностные свойства сплавов систем Mg–Y–Gd–Zr и Mg–Sm–Tb–Zr достигаются после гомогенизации с последующим старением.

4. Сплавы систем Mg–Y–Gd–Zr и Mg–Sm–Tb–Zr можно рассматривать как перспективные литейные сплавы для использования в качестве легких конструкционных материалов, обладающих высокой удельной прочностью.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rokhlin L. L. *Magnesium Alloys Containing Rare Earth Metals: monograph* / L. L. Rokhlin. – London – NewYork : Taylor and Francis, 2003. – 245 p.
2. Рохлин Л. Л. Распад пересыщенного твердого раствора в тройном сплаве Mg–Nd–Y / Л. Л. Рохлин, Т. В. Добаткина, В. Н. Тимофеев, И. Е. Тарытина // *Физика металлов и металловедение*. – 2004. – Т. 97. – № 1. – С. 71–77.
3. Liu X. B. *Effects of ageing treatment on microstructures and properties of Mg–Gd–Y–Zr alloys with and without Zn additions* / X. B. Liu, R. S. Chen, E. Han. // *J. Alloy Compd.* – 2008. – V. 465. – P. 232–238.
4. Gao L. *Fracture behavior of high strength Mg–Gd–Y–Zr magnesium alloy* / L. Gao, R. Chen, E. Han // *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*. – 2010. – V. 20. – P. 1217–1221.
5. Исследование свойств высокопрочного магниевого сплава системы Mg–Y–Gd–Zr / Л. Л. Рохлин, Т. В. Добаткина, Н. И. Никитина, И. Е. Тарытина // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2010. – № 12. – С. 15–18.
6. Luo A. *Review Cast magnesium alloys for elevated temperature applications* / A. Luo, M. O. Pekguleryuz // *Journal of Materials Science*. – 1994. – № 29. – P. 5259–5271.A
7. А.с. 1010880 СССР, C22c 23/06. Сплав на основе магния / Дриц М. Е., Рохлин Л. Л., Никитина Н. И. [и др.] – № 3342275/02; заявл. 25.09.81; опубл. 20.10.1997, Бюл. № 29 (ч. 2).
8. Исследование распада пересыщенного твердого раствора на основе магния в сплавах системы Mg–Sm–Tb / Е. А. Лукьянова, Л. Л. Рохлин, Т. В. Добаткина, Н. Ю. Табачкова // *Физика металлов и металловедение*. – 2013. – Т. 114. – № 7, С. 658–669.
9. HRTEM observation of the precipitates in Mg–Gd–Y–Zr alloy / T. Kawabata, K. Matsuda, S. Kamado, Y. Kojima, S. Ikeno // *Materials Science Forum*. – 2003. – V. 419–422. – P. 303–306.