

УДК 669.721'859'864.5:539.27

СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДЕФОРМИРОВАННЫХ СПЛАВОВ Mg-Sm-Tb-Zr¹

©2023 г. **Е.А. Лукьянова, Л.Л. Рохлин, Т.В. Добаткина, И.Е. Тарыгина,
Н.С. Мартыненко, О.В. Рыбальченко, Д.Р. Темралиева, П.Б. Страумал,
С.В. Добаткин, О.А. Овчинникова**

*ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва
E-mail: helenelukyaynova@gmail.com*

Поступила в редакцию 29 марта 2023 г.

После доработки 31 мая 2023 г. принята к публикации 9 июня 2023 г.

Исследованы структура, кинетика старения и механические свойства сплавов новой системы Mg-Sm-Tb-Zr с разным содержанием редкоземельных металлов и их соотношением при получении горячим прессованием. Установлено разное влияние самария и тербия на процесс рекристаллизации при деформации и характер упрочнения сплавов при дополнительном старении в зависимости от его длительности в результате распада пересыщенного раствора на основе магния. Определены механические свойства сплавов после горячего прессования и старения, в том числе при нагреве в диапазоне температур до 300 °С.

Ключевые слова: магниевые сплавы; редкоземельные металлы; распад твердого раствора; механические свойства.

Магниевые сплавы являются наиболее легкими конструкционными материалами, их применение позволяет снижать вес изделий при сохранении ими прочности, поэтому они широко востребованы при создании транспортных средств и летательных аппаратов [1—4]. Повышение прочностных свойств магниевых сплавов, в том числе в условиях нагрева, является постоянной технологической задачей, подход к решению которой требует разработок сплавов на основе новых систем легирования. Для обеспечения высокой прочности магниевых сплавов при обычных и повышенных температурах целесообразно использование редкоземельных металлов [5]. Именно к магниевым сплавам, содержащим редкоземельные металлы, проявляется большой интерес. В основном проводимые исследования сосредоточены на сплавах с иттрием, гадолинием, в том числе с добавками других редкоземельных металлов [6—22].

В качестве новой системы, на основе которой могут быть созданы сплавы с улучшен-

ными свойствами, можно рассматривать систему Mg-Sm-Tb-Zr. Ее особенностью является то, что самарий и тербий относятся к разным подгруппам ряда лантана и имеют заметно различающуюся растворимость в твердом магнии [23, 24]. Ранее в системе Mg-Sm-Tb в области, богатой магнием, были изучены фазовые равновесия [25, 26] и показана возможность упрочнения сплавов на ее основе за счет распада пересыщенного магниевых твердого раствора при старении [27]. Целью настоящей работы было исследование структуры, кинетики старения и механических свойств деформированных сплавов Mg-Sm-Tb-Zr, полученных горячим прессованием.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования были сплавы Mg-4,2%Sm-1,2%Tb-0,3%Zr, Mg-3,6%Sm-7,9%Tb-0,8%Zr и Mg-1,9%Sm-16,3%Tb-0,5%Zr (мас.%). Составы сплавов выбирали с разным соотношением содержания самария и тербия в них, но в пределах области магниевых твердого раствора при 500 °С, установленной в работе [25]. Сплавы выплавляли в электрической печи сопротивления в стальных тиглях с использованием защитного флюса ВИ-2, состав которых, мас.%: MgCl₂

¹Работа выполнена по государственному заданию №075-01176-23-00.

38—46; KCl 32—40; CaF₂ 3—5; BaCl₂ 5—8; MgO 1,5; (NaCl+CaCl₂) <8. Для выплавки сплавов использовали следующие материалы: магний Mg96 (>99,96% Mg), самарий СмМ-1 (>99,82% Sm), тербий ТбМ-1 (>99,83% Tb). Самарий и тербий вводили в сплавы в виде предварительно приготовленных лигатур Mg-43,6%Sm, Mg-41%Tb, а цирконий — с использованием промышленной лигатуры Mg-9,6%Zr. Из тигля расплав отливался в нагретую до 350 °С стальную изложницу диаметром 52 мм. Содержание легирующих элементов в отливках сплавов определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с использованием индуктивно-связанной плазмы (Inductivity Coupled Plasma-Atomic Spectrometer) на приборе ULTIMA 2C (Jobin-YvonFirm).

Полученные слитки подвергались гомогенизационному отжигу при 515 °С в течение 6 ч для приведения структуры сплавов в равновесное при этой температуре состояние. Дальнейшее охлаждение слитков на воздухе обеспечивало образование в них пересыщенного твердого раствора на основе магния. Горячее прессование слитков диаметром 52 мм проводилось на вертикальном гидравлическом прессе с усилием 1,6 МН (160 тс) в прутки диаметром 14 мм со степенью деформации ~93% (коэффициент вытяжки ~13,8). Температура прессования составляла 430±10 °С, а температура контейнера была на 20—40 °С ниже температуры нагрева слитков. После прессования прутки охлаждались на воздухе, так как такая скорость охлаждения препятствовала распаду пересыщенного твердого раствора на основе магния.

Микроструктуру сплавов изучали на световом микроскопе Neophot 2, NU-2E (VEB Carl Zeiss, Jena, Германия) с использованием травителя для выявления зеренной структуры, содержащего 60% этиленгликоля, 20% уксусной кислоты, 1% азотной кислоты, 19% воды. Размер структурных элементов определялся методом случайных секущих с использованием программного обеспечения NEXSYS ImageExpert™ Pro 3.

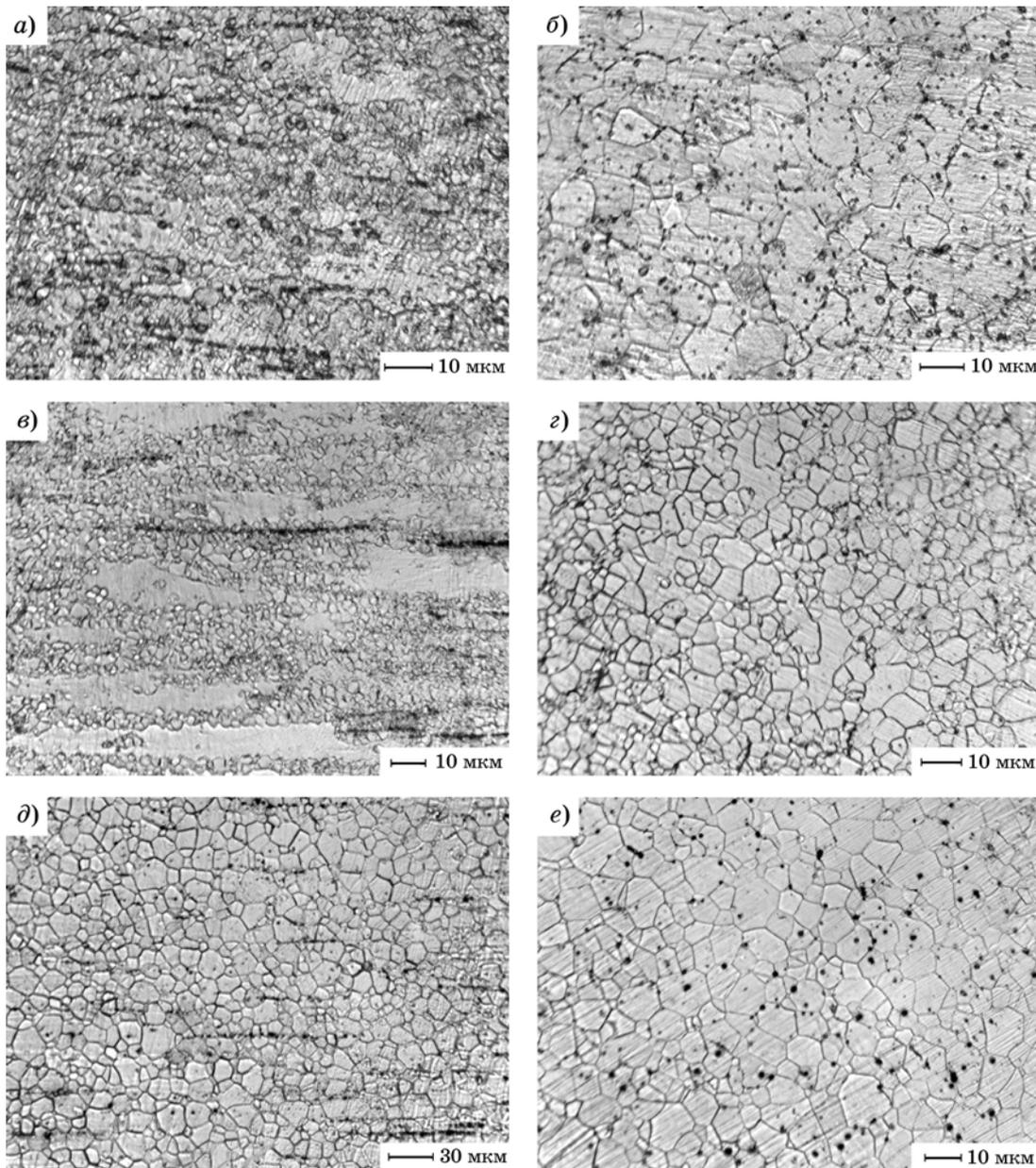
Методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на электронном микроскопе JEM-2100 с ускоряющим напряжением 200 кВ исследовали образцы в виде фольг. Утонение фольг сплавов осуществлялось механической шлифовкой с последующей

струйной электролитической полировкой в 1%-ном растворе HClO₄ в спирте.

Для исследования кинетики распада твердого раствора на основе магния в сплавах после горячего прессования были изготовлены образцы для измерения твердости и удельного электросопротивления, которые подвергались изотермическому старению при температуре 200 °С с выдержками общей длительностью до 128 ч. Так как магниевый твердый раствор, содержащий самарий и тербий, имеет высокую устойчивость к распаду при охлаждении, старение сплавов проводилось непосредственно после горячего прессования. Твердость измеряли по методу Бриелля (ГОСТ 9012—59) на приборе ТШ-2М вдавливанием в испытываемый образец стального шарика диаметром 5 мм под действием нагрузки 2,5 кН (250 кгс). Удельное электросопротивление сплавов измеряли при комнатной температуре на образцах диаметром 6 мм на участке с расстоянием между клеммами 21,8 мм с помощью микрометра БСЗ-010-2. Рассчитанная погрешность измерений не превышала ±0,7%.

Механические свойства горячепрессованных, а также дополнительно состаренных прутков определяли при комнатной и повышенных (200—300 °С) температурах путем испытаний на растяжение круглых образцов диаметром 5 и рабочей длиной 28 мм на универсальной испытательной машине Instron 3382 со скоростью нагружения 1 мм/мин.

Результаты исследования и их обсуждение. В гомогенизированном при 515 °С состоянии структура всех сплавов состояла из зерен магниевых твердого раствора размером 70—90 мкм. На фиг. 1 представлена микроструктура сплавов после горячего прессования в направлениях относительно оси прессования в продольном (*a, в, д*) и поперечном (*б, г, е*). Структура сплава Mg-4,2%Sm-1,2%Tb-0,3%Zr (фиг. 1, *a*), в котором наибольшее содержание самария, была частично рекристаллизованной. В продольном направлении в ней наблюдались вытянутые вдоль оси прессования деформированные зерна и мелкие рекристаллизованные зерна со средним размером 2,86±0,11 мкм. Кроме того, помимо зерен магниевых твердого раствора, в богатом самарием сплаве после деформации присутствовали частицы богатых редкоземельными металлами фаз размером ~2 мкм, которые хорошо видны в попереч-



Фиг. 1. Микроструктуры горячепрессованных сплавов Mg-4,2%Sm-1,2%Tb-0,3%Zr (а, б), Mg-3,6%Sm-7,9%Tb-0,8%Zr (в, г) и Mg-1,9%Sm-16,3%Tb-0,5%Zr (д, е) в продольном (а, в, д) и поперечном (б, г, е) направлениях

ном направлении на фиг. 1, б. Поскольку содержание самария в данном сплаве близко к его максимальной растворимости в магнии [23], можно предположить, что это частицы богатой самарием фазы, которые образовались в процессе нагрева при деформации в результате распада пересыщенного магниевого твердого раствора, полученного после гомогенизации, предшествовавшей горячему прессованию. Согласно проведенным исследованиям фазовых равновесий в системе Mg-Sm-Tb [25] в области концентраций, богатой самарием, в которую попадает сплав Mg-

4,2%Sm-1,2%Tb-0,3%Zr, выделившиеся частицы принадлежат фазе $Mg_{41}(Sm,Tb)_5$.

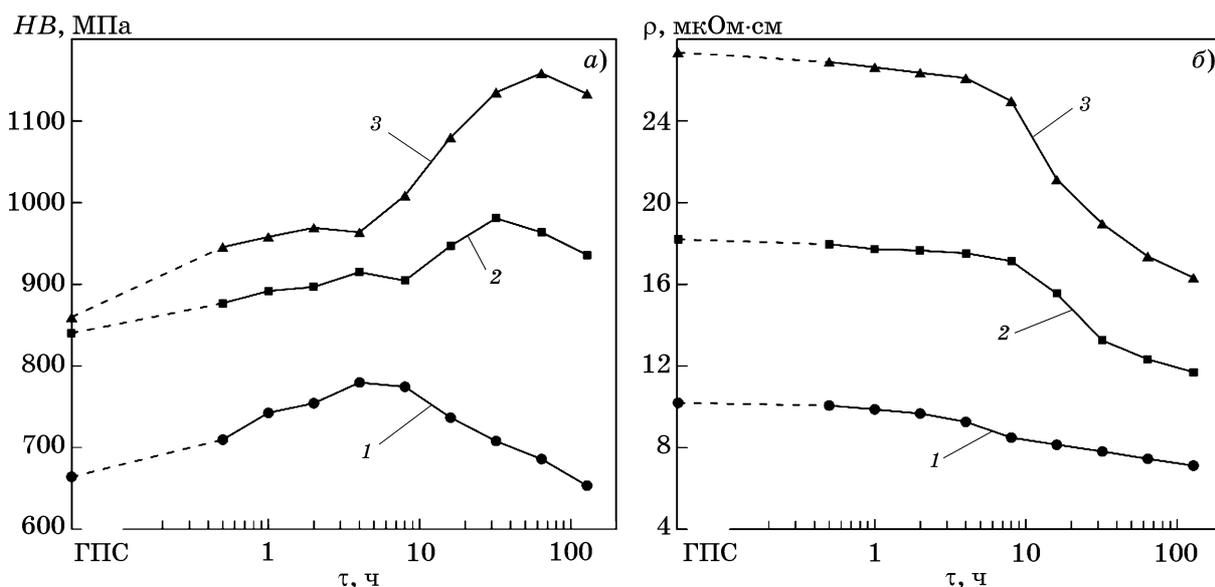
Структура сплава Mg-3,6%Sm-7,9%Tb-0,8%Zr была также частично рекристаллизованной (фиг. 1, в) и состояла из вытянутых деформированных зерен и мелких рекристаллизованных зерен размером $2,32 \pm 0,06$ мкм, однако рекристаллизация в нем прошла в несколько большей степени, чем в предыдущем сплаве. Других фаз, кроме зерен магниевого твердого раствора и темных включений α -Zr, не наблюдалось. Структура же сплава Mg-1,9%Sm-16,3%Tb-0,5%Zr

(фиг. 1, в), в котором содержится наибольшее количество тербия, оказалась полностью рекристаллизованной со средним размером зерен магниевого твердого раствора $11,15 \pm 0,32$ мкм.

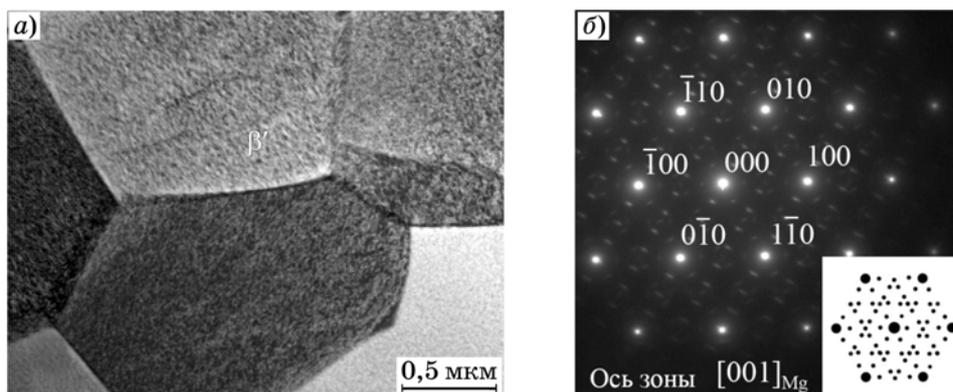
Таким образом, в зависимости от содержания самария и тербия и их соотношений в сплавах Mg-Sm-Tb-Zr рекристаллизация в процессе деформации в одних и тех же условиях протекает не одинаково, а именно: с увеличением содержания самария рекристаллизация замедляется. Очевидно, что отличия протекания рекристаллизации связаны с разной растворимостью самария и тербия в твердом растворе магния. Растворимость этих элементов определяет степень насыщения ими магниевого твердого раствора, а также характер его распада, который с понижением температуры сопровождается выделением богатых редкоземельными металлами фаз.

Наиболее четко особенности распада магниевого твердого раствора деформированных сплавов при разном соотношении содержания самария и тербия проявились в процессе изотермического старения при 200 °С. Как было показано в работе [27], именно при температуре старения 200 °С обеспечивается наибольшее упрочнение сплавов системы Mg-Sm-Tb. Кривые изменения твердости (фиг. 2, а) и удельного электросопротивления (фиг. 2, б) сплавов Mg-Sm-Tb-Zr с увеличением длительности старения характеризуют кинетику

распада магниевого твердого раствора. Полученные кривые показывают, что горячепрессованные сплавы упрочняются также при распаде магниевого твердого раствора, причем с увеличением содержания тербия упрочнение при дополнительном старении возрастает. Следует отметить различие общего хода кривых для сплавов с разным содержанием самария и тербия. Для сплава Mg-4,2%Sm-1,2%Tb-0,3%Zr с большим содержанием самария твердость непрерывно возрастает, достигает максимума при выдержке 4 ч, а затем снижается, что характерно для двойных сплавов с элементами цериевой подгруппы [5], к которой относится самарий. Для сплава Mg-1,9%Sm-16,3%Tb-0,5%Zr с наибольшим содержанием тербия в изменении твердости с увеличением длительности старения прослеживаются две стадии. На первой стадии (до 1 ч) отмечается небольшое повышение твердости, после чего она устанавливается на приблизительно одинаковом уровне. Затем, на второй стадии (при выдержке более 4 ч) происходит существенный рост твердости, максимум которой достигается при более длительной выдержке (64 ч) с последующим снижением. Кривая изменения твердости для сплава с большим содержанием тербия и малым самария соответствует двойным сплавам с элементами иттриевой подгруппы редкоземельных металлов [5]. В сплаве Mg-3,6%Sm-7,9%Tb-0,8%Zr кривая изменения твердости зани-



Фиг. 2. Влияние длительности старения τ при температуре 200 °С на твердость HV (а) и удельное электросопротивление ρ (б) горячепрессованных (ГПС) сплавов: 1 — Mg-4,2%Sm-1,2%Tb-0,3%Zr; 2 — Mg-3,6%Sm-7,9%Tb-0,9%Zr; 3 — Mg-1,9%Sm-16,3%Tb-0,5%Zr



Фиг. 3. Микроструктура (ПЭМ) сплава Mg-3,6%Sm-7,9%Tb-0,8%Zr (а) и электронограмма после старения при 200 °С, 64 ч (б)

мает промежуточное положение между двумя указанными сплавами. При этом, с одной стороны, также наблюдается двустадийность распада, а с другой, виден более пологий характер кривой, при котором максимальное значение твердости достигается при меньшей выдержке (24 ч). Таким образом, с увеличением содержания тербия и уменьшением содержания самария эффект упрочнения возрастает, а максимум упрочнения смещается в сторону больших выдержек.

В процессе старения наблюдается снижение удельного электросопротивления всех сплавов (фиг. 2, б), свидетельствуя об обеднении матрицы магниевого твердого раствора редкоземельными металлами. В случае сплава с большим содержанием самария сопротивление снижается плавно, а по мере увеличения содержания тербия характер снижения сопротивления становится более крутым.

Анализ микроструктуры и микродифракции деформированного сплава Mg-3,6%Sm-7,9%Tb-0,8%Zr, состаренного при 200 °С в течение 64 ч после достижения максимального упрочнения (фиг. 3), показал, что в результате распада пересыщенного магниевого твердого раствора выделяются упрочняющие мелкодисперсные частицы фазы с орторомбической решеткой, обозначаемой как β' . Фаза β' имеет когерентную связь с магниевой матрицей, а ее кристаллическая решетка ориентирована относительно матрицы тремя симметричными способами с осью симметрии, совпадающей с гексагональной осью кристаллической решетки магниевого твердого раствора [27].

Установленные закономерности кинетики распада пересыщенного магниевого твердого раствора в горячепрессованных сплавах

Mg-Sm-Tb-Zr в зависимости от содержания и соотношения содержаний самария и тербия согласуются с разным характером протекания рекристаллизации в этих сплавах. С увеличением содержания самария распад пересыщенного магниевого твердого раствора протекает быстрее, а деформация проходит с выделением кристаллов вторых фаз. Дисперсные частицы фаз в структуре более твердые, чем магниевая матрица, препятствуют перемещению дислокаций и скольжению по границам зерен, а значит, оказывают сдерживающее влияние на механизмы деформации и развитие рекристаллизации.

Возможность практического использования сплавов системы Mg-Sm-Tb-Zr с дорогостоящими редкоземельными металлами в качестве легких конструкционных материалов определяли, исследуя механические свойства для двух менее легированных сплавов (Mg-4,2%Sm-1,2%Tb-0,3%Zr и Mg-3,6%Sm-7,9%Tb-0,8%Zr) в исходном горячепрессованном состоянии и после старения при температуре 200 °С с выдержками длительностью 24 и 64 ч, при которых достигается наибольшее упрочнение при старении. Полученные результаты испытаний на растяжение при комнатной температуре приведены в табл. 1. В горячепрессованном состоянии сплавы демонстрируют высокий уровень прочностных свойств с хорошей пластичностью. Старение после горячего прессования позволяет дополнительно повысить прочность и сохранить пластичность. Сплав Mg-3,6%Sm-7,9%Tb-0,8%Zr с более высоким, чем у сплава 1, содержанием тербия имеет и более высокие значения пределов прочности и текучести. При этом лучшие свойства (предел прочности 343 МПа, условный пре-

Таблица 1

Механические свойства горячепрессованных сплавов Mg-4,2% Sm-1,2% Tb-0,3% Zr (1) и Mg-3,6% Sm-7,9% Tb-0,8% Zr (2) при испытаниях на растяжение при комнатной температуре

Сплав	Вид деформации до испытаний								
	горячее прессование			горячее прессование + старение при 200 °С, 24 ч			горячее прессование + старение при 200 °С, 64 ч		
	σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
	МПа			МПа			МПа		
1	224	149	22,9	281	177	15,7	265	171	14,3
2	267	196	15,8	327	267	5,0	343	267	7,9

Таблица 2

Механические свойства горячепрессованных сплавов, содержащих самарий или тербий, при испытаниях на растяжение при комнатной температуре по данным разных источников

Сплав	Обработка	σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	Источник
		МПа			
Mg-4%Sm-0,4%Zr	Горячее прессование	277	135	21	[28]
Mg-4%Y-4%Sm-0,5%Zr	Горячее прессование + старение	387	254	6	[29]
Mg-10,2%Gd-2,9%Sm-0,5Zr	То же	345	287	6,4	[30]
Mg-4%Tb	Горячее прессование	190	130	20	
	Горячее прессование + старение	220	150	16	
Mg-10,5%Tb	Горячее прессование	225	160	22	[5]
	Горячее прессование + старение	280	205	14	

Таблица 3

Механические свойства горячепрессованных сплавов Mg-4,2% Sm-1,2% Tb-0,3% Zr (1) и Mg-3,6% Sm-7,9% Tb-0,8% Zr (2), состаренных при температуре 200 °С, 64 ч, при повышенных температурах + испытания на растяжение

Сплав	$t = 200 \text{ }^\circ\text{C}$			$t = 250 \text{ }^\circ\text{C}$			$t = 300 \text{ }^\circ\text{C}$		
	σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
	МПа			МПа			МПа		
1	211	181	23,0	183	149	18,9	167	142	28,1
2	303	256	11,0	299	240	10,5	245	216	13,3

дел текучести 267 МПа при относительном удлинении 7,9%) достигаются после старения при длительной выдержке 64 ч. Сплав 1 (Mg-4,2%Sm-1,2% Tb-0,3% Zr) с большим, чем в сплаве 2, содержанием самария обладает лучшей пластичностью с относительным удлинением 22,9% в горячепрессованном состоянии, а наилучшее сочетание прочностных и пластических характеристик (предел прочности 281 МПа, условный предел текучести 177 МПа при относительном удлинении

15,7%) обеспечивается после старения при гораздо меньшей выдержке (24 ч). Уровень механических свойств указанных горячепрессованных сплавов системы Mg-Sm-Tb-Zr в целом близок к уровню свойств горячепрессованных сплавов, в составе которых присутствует самарий или тербий (табл. 2).

В табл. 3 представлены механические свойства сплавов системы Mg-Sm-Tb-Zr, полученные при испытаниях при температурах 200, 250 и 300 °С. Испытания при повы-

шенных температурах проводились на горячепрессованных сплавах после их дополнительного старения при 200 °С в течение 64 ч. Сплав с большим содержанием редкоземельных металлов обладает более высокими прочностными характеристиками при повышенных температурах испытаний, как и при комнатной температуре. С повышением температуры оба сплава постепенно разупрочняются, а их относительное удлинение возрастает. При этом механические свойства сплавов сохраняются на достаточно высоком уровне в рассматриваемом диапазоне температур испытаний, что предопределяет возможность надежной их работы в условиях нагрева.

Выводы. 1. Установлено, что в сплавах Mg-Sm-Tb-Zr в процессе горячего прессования происходит рекристаллизация, которая обеспечивает измельчение зерна гомогенизированной структуры сплавов. В зависимости от содержания самария и тербия рекристаллизация при деформации протекает не одинаково. С увеличением содержания самария рекристаллизация замедляется и полностью не завершается.

2. После горячего прессования сплавы системы Mg-Sm-Tb-Zr дополнительно упрочняются при старении в результате распада пересыщенного магниевого твердого раствора. С увеличением содержания тербия прочность повышается, однако время достижения максимального упрочнения при старении смещается в сторону более длительных выдержек.

3. В сплавах Mg-Sm-Tb-Zr в горячепрессованном состоянии обеспечивается хорошее сочетание прочностных характеристик и пластичности. Старение после горячего прессования способствует дополнительному повышению пределов прочности и текучести. При повышенных до 300 °С температурах сплавы сохраняют свои механические свойства на достаточно высоком уровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu, B. Development and application of magnesium alloy parts for automotive OEMs : A review / B. Liu, J. Yang, X. Zhang, Q. Yang, J. Zhang, X. Li // *J. Magnesium and Alloys*. 2023. V.11. Is.1. P.15—47. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2022.12.015>
2. Волкова, Е.Ф. Новые исследования в области легирования и деформации современных магниевых сплавов. Обзор / Е.Ф. Волкова, М.В. Акинина, И.В. Мостяев, В.А. Дуюнова, А.А. Алиханян // *Металлы*. 2022. №2. С.3—13. —(Volkova, E.F. New studies in the field of alloying and deformation of modern

- magnesium alloys. Review / E.F. Volkova, M.V. Akini-na, I.V. Mostyaev, V.A. Duyunova, A.A. Alikhanyan // *Russian Metallurgy (Metally)*, 2022. V.3. P.191—199. <https://doi.org/10.1134/S0036029522030120>.)
3. You, S. Recent research and developments on wrought magnesium alloys / S. You, Y. Huang, K.U. Kainer, N. Hort. // *J. Magnesium and Alloys*. 2017. V.5. P.239—253. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2017.09.001>
 4. Mordike, B.L. Magnesium : properties-applications-potential / B.L. Mordike, T. Ebert // *Mater. Sci. Eng.* : A. 2001. V.302. P.37—45. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01351-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01351-4)
 5. Rokhlin, L.L. Magnesium alloys containing rare-earth metals : structure and properties / L.L. Rokhlin. — Ser. Advances in Metallic Alloys. Publ. CRC Press. 2003. V.3 (February 20). 256 p.
 6. Chen, X. Microstructure and high temperature mechanical properties of the Mg-Gd-Y(-Nd)-Zr alloy / X. Chen, Q. Li, J. Yan, P. Chen // *J. Mater. Res. Technol.* 2023. V.24. P.866—878. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.065>
 7. Chen, X. Creep behavior and creep mechanism of Mg-Gd-Y-Sm-Zr alloy / Q. Li, Y. Zhou, P. Chen // *Vacuum*. 2023. V.212. Art.112009. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112009>
 8. Tang, C. The role of initial grain size on bimodal-grained microstructure and mechanical properties of an extruded Mg-Gd-Y-Nd-Zr alloy / C. Tang, L. Cui, H. Jiang, W. Liu, J. Li, X. Liu, H. Li // *J. Mater. Res. Technol.* 2023. V.23. P.4663—4677. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.056>
 9. Pang, H. Hot deformation behavior and microstructure evolution of Mg-Gd-Y(-Sm)-Zr alloys / H. Pang, Q. Li, X. Chen, P. Chen, X. Li, J. Tan // *J. Alloys and Compounds*. 2022. V.920. Art.165937. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165937>
 10. Ren, X. Formation of nanocrystalline grain structure in an Mg-Gd-Y-Zr alloy processed by high-pressure torsion / X. Ren, X. An, S. Ni, Y. Huang, M. Song // *Mater. Characterization*. 2022. V.191. Art.112088. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.112088>
 11. Zhao, S. High temperature mechanical properties and strain hardening mechanism of directionally solidified Mg-Gd-Y alloy / S. Zhao, Y. Xu, C. Geng, X. Lin, Q. Tang, Y. Dong // *Mater. Sci. Eng.* : A. 2022. V.833. Art.142337. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142337>
 12. Рохлин Л.Л. Свойства легкого конструкционного магниевого сплава типа ИМВ7-1 системы Mg-Y-Gd-Zr при введении в него добавок редкоземельных металлов цериевой группы: самария, неодима и лантана / Л.Л. Рохлин, Т.В. Добаткина, И.Е. Тарытина, Е.А. Лукьянова, О.А. Овчинникова // *Перспективные материалы*. 2022. №10. С.5—13. <https://doi.org/10.30791/1028-978X-2022-10-5-13>
 13. Li, J. Twin evolution in cast Mg-Gd-Y alloys and its dependence on aging heat treatment / J. Li, Z. Dong, X. Yi, D. Wu, R. Chen // *J. Magnesium and Alloys*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.09.023>
 14. Wu, Y. Flow softening and dynamic recrystallization behavior of a Mg-Gd-Y-Nd-Zr alloy under elevated temperature compressions / Y. Wu, Y. Jia, S. Zhang, Y. Liu, H. Xiong, G. Chen, Flow softening and dynamic recrystallization behavior of a Mg-Gd-Y-Nd-Zr alloy under elevated temperature compressions // *J. Magnesium and Alloys*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.11.009>

15. *Рохлин Л.Л.* Влияние самария на прочностные свойства сплавов системы Mg-Y-Gd-Zr / Л.Л. Рохлин, Т.В. Добаткина, И.Е. Тарытина, Е.А. Лукьянова, О.А. Овчинникова // *Металлы*. 2021. №2. С.18—23. — (Rokhlin, L.L. Effect of samarium on the strength properties of Mg-Y-Gd-Zr Alloys / L.L. Rokhlin, T.V. Dobatkina, I.E. Tarytina, E.A. Luk'yanova, O.A. Ovchinnikova // *Russian Metallurgy (Metally)*, 2021. V.3. P.267—271. <https://doi.org/10.1134/S0036029521030125>).
16. *Li, Y.* Exceptional aging hardening behaviour of nanocrystalline Mg-Y-Nd-Gd-Zr alloy prepared by high pressure torsion / Y. Li, C. Qu, J. Wang, R. Xu // *J. Alloys and Compounds*. 2020. V.813. Art.152123. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152123>
17. *Wang, B.* Dislocation arrays, precipitate bands and free zones in forged Mg-Gd-Y-Zr alloy / B. Wang, B. Tang, C. You, Y. Wan, Y. Gao, Z. Chen, L. Lu, C. Liu, J. Wang // *Mater. Sci. Eng. : A*. 2020. V.775. Art.138789. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138789>
18. *Yu, S.* Age-hardening and age-softening in nanocrystalline Mg-Gd-Y-Zr alloy / S. Yu, Y. Wan, C. Liu, J. Wang // *Mater. Characterization*. 2019. V.156. Art.109841. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.109841>
19. *Rokhlin, L.L.* Effect of cerium and erbium on the aging kinetics and the properties of an IMV7-1 alloy of the Mg-Y-Gd-Zr system / L.L. Rokhlin, E.A. Luk'yanova, T.V. Dobatkina, I.E. Tarytina, O.A. Ovchinnikova, D.R. Temralieva // *Russian Metallurgy (Metally)*, 2019. V.1. P.8—13. <https://doi.org/10.1134/S0036029519010105>
20. *Dobatkina, S.V.* Structure and mechanical properties of the Mg-Y-Gd-Zr alloy after high pressure torsion / S.V. Dobatkina, L.L. Rokhlin, E.A. Lukyanova, T.V. Dobatkina, N.Y. Tabachkova, M.Y. Murashkin // *Mater. Sci. Eng. : A*. 2016. V.667. P.217—223. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.05.003>
21. *Liu, N.* Microstructure evolution and mechanical properties of Mg-Gd-Sm-Zr alloys / N. Liu, Z. Zhang, L. Peng, W. Ding // *Mater. Sci. Eng. : A*. 2015. V.627. P.223—229. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.12.114>
22. *Lukyanova, E.A.* Reversion after ageing in an Mg-Y-Gd-Zr alloy / E.A. Lukyanova, L.L. Rokhlin, T.V. Dobatkina, N.I. Nikitina, N.Y. Tabachkova // *J. Alloys and Compounds*. 2015. V.635. P.173—179. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.02.115>
23. *Okamoto, H.* Mg-Sm (Magnesium-Samarium) / H. Okamoto // *J. Phase Equilibria and Diffusion*. 2009. V.30. №3. P.299. <https://doi.org/10.1007/s11669-009-9510-5>
24. *Cahn, R.W.* Binary alloy phase diagrams. 2 ed. / T.V. Massalski, Editor-in-Chief ; H. Okamoto, P.R. Subramanian, L. Kacprzak // *Advanced Materials*. 1991. V.3. P.628—629. <https://doi.org/10.1002/adma.19910031215>
25. *Рохлин Л.Л.* Исследование фазовых равновесий в богатых магнием сплавах системы Mg-Sm-Tb в твердом состоянии / Л.Л. Рохлин, Т.В. Добаткина, Е.А. Лукьянова, И.Г. Королькова, А.С. Поликанова // *Металлы*. 2010. №4. С.99—106. — (Rokhlin, L.L. Phase equilibria in solid Mg-Rich Mg-Sm-Tb alloys / L.L. Rokhlin, T.V. Dobatkina, E.A. Luk'yanova, I.G. Korol'kova, A.S. Polikanova // *Russian Metallurgy (Metally)*, 2010. V.7. P.663—668. <https://doi.org/10.1134/S0036029510070141>).
26. *Лукьянова Е.А.* Исследование поверхности ликвидуса диаграммы состояния Mg-Sm-Tb / Е.А. Лукьянова, Л.Л. Рохлин, Т.В. Добаткина, И.Г. Королькова // *Металлы*. 2011. №3. С.99—105. — (Luk'yanova, E.A. Liquidus surface of the Mg-Sm-Tb phase diagram / E.A. Luk'yanova, L.L. Rokhlin, T.V. Dobatkina, I.G. Korol'kova // *Russian Metallurgy (Metally)*, 2011. V.5. P.484—490. <https://doi.org/10.1134/S0036029511050077>).
27. *Luk'yanova, E.A.* Study of the decomposition of the magnesium-based solid solutions in Mg-Sm-Tb alloys / E.A. Luk'yanova, L.L. Rokhlin, T.V. Dobatkina, N.Yu. Tabachkova // *The Physics of Metals and Metallography*. 2013. V.114. №7. P.604—615. <https://doi.org/10.1134/S0031918X13050049>
28. *Yuan, M.* Effect of Sm addition on the microstructure and mechanical properties of Mg-xSm-0,4Zr alloys / M. Yuan, C. He, Z. Dong, B. Jiang, B. Song, N. Guo, T. Liu, S. Guo, F. Pan // *J. Mater. Res. Technol.* 2023. V.23. P.4814—4827. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.114>
29. *Wang, Q.* Microstructure and creep behavior of the extruded Mg-4Y-4Sm-0,5Zr alloy / Q. Wang, D. Li, J.J. Blandin, M. Suñry, P. Donnadiou, W. Ding // *Mater. Sci. Eng. : A*. 2009. V.516. Is.1—2. P.189—192. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.03.084>
30. *Pang, H.* Effect of Sm on microstructures and mechanical properties of Mg-Gd(-Sm)-Zr alloys by hot extrusion and aging treatment / H. Pang, J. Bao, Q. Li, X. Chen, P. Chen, X. Li, J. Tan // *J. Mater. Res. Technol.* 2022. V.19. P.3877—3893. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.128>