

На правах рукописи



ЛУКЬЯНОВА Елена Александровна

**ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ С РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ
МЕТАЛЛАМИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НОВЫХ ЛЕГКИХ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении
науки Институте металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова
Российской академии наук (ИМЕТ РАН)

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник, ИМЕТ РАН

Рохлин Лазарь Леонович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
начальник сектора «Деформируемые
магниевые сплавы»,
Федеральное государственное унитарное
предприятие «Всероссийский институт
авиационных материалов» (ФГУП ВИАМ)

Волкова Екатерина Фёдоровна

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Открытое акционерное общество
«Всероссийский институт легких сплавов»
(ОАО ВИЛС)

Бер Леонид Борисович

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «МАТИ – Российский
государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского»,
г. Москва

Защита состоится « » _____ 2014 г. в _____ часов на заседании
диссертационного совета Д 002.060.01 в ИМЕТ РАН по адресу: 119991,
Москва, Ленинский проспект, 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИМЕТ РАН.

Автореферат разослан « » _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

В. М. Блинов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие таких отраслей современной техники, как авиация, ракетостроение, космонавтика и автомобилестроение требует улучшения существующих и создания новых легких конструкционных материалов с высокой прочностью и жаропрочностью. Магниевого сплавы, характеризующиеся выгодным сочетанием плотности и механических свойств, находят широкое применение в этих областях техники. Повышение прочности магниевых сплавов и рабочих температур их использования позволяет снизить вес конструкций и улучшить технико-эксплуатационные характеристики летательных аппаратов и машин. Известно, что редкоземельные металлы (РЗМ) в качестве легирующих добавок позволяют значительно повысить прочность магниевых сплавов при комнатной и повышенных температурах, но только часть из них используется в настоящее время. Исследования двойных сплавов магния с РЗМ выявили среди них несколько новых эффективных упрочняющих легирующих добавок, таких как самарий, гадолиний, тербий и диспрозий. В последние годы наибольшее внимание уделяется сплавам с РЗМ системы Mg-Y-Gd-Zr, и к числу сплавов таких систем относится высокопрочный и жаропрочный сплав ИМВ7-1 (Mg – основа, 5,0-6,5% ¹Y, 3,5-5,5% Gd и 0,15-0,7% Zr), на котором были достигнуты высокие прочностные свойства: при комнатной температуре – $\sigma_B = 435$ МПа, $\sigma_{0,2} = 338$ МПа, $\delta = 4,9\%$; при температуре 250°C – $\sigma_B^{250^\circ} = 336$ МПа, $\sigma_{0,2}^{250^\circ} = 286$ МПа, $\delta^{250^\circ} = 14,2\%$. Однако имелись основания считать, что возможности повышения прочностных свойств этого сплава еще далеко не исчерпаны, и поэтому целесообразным являлось рассмотрение путей улучшения сплава за счет применения к нему различных технологий и дополнительного легирования (самарием). Наряду с этим, целесообразно было также исследовать влияние на магний других РЗМ (самария и тербия), совместное действие которых на магний ранее не изучалось, но можно было предполагать, что их использование для легирования обеспечит создание на основе магния новых легких высокопрочных конструкционных материалов.

Целью работы являлось изыскание возможностей создания магниевых сплавов с РЗМ, обладающих более высокими прочностными свойствами при комнатной и повышенных температурах, путем усовершенствования технологии и состава сплава ИМВ7-1 и использования сплавов ранее не изученной системы Mg-Sm-Tb.

¹ Далее, если специально не оговаривается, содержание элементов приводится в масс.%

Для достижения указанной цели в работе решались следующие **основные задачи**:

- 1) Установить влияние температуры нагрева (отжига) на структуру и свойства горячепрессованного магниевого сплава ИМВ7-1;
- 2) Исследование возможности упрочнения сплава ИМВ7-1 путем использования холодной пластической и интенсивной пластической деформации;
- 3) Изучение влияния легирования самарием на фазовый состав, поведение при термической обработке и свойства сплавов системы Mg-Y-Gd-Zr, предполагая возможность улучшения прочностных характеристик сплава ИМВ7-1;
- 4) Изучение фазовых равновесий, поведения при термической обработке и механических свойств в зависимости от состава и структуры в сплавах тройной системы Mg-Sm-Tb.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

- 1) Показано, что высокотемпературный отжиг приводит к незначительному разупрочнению сплава ИМВ7-1, после которого сплав сохраняет возможность упрочняться в процессе старения;
- 2) Установлена возможность дополнительного упрочнения сплава ИМВ7-1 системы Mg-Y-Gd-Zr путем холодной пластической деформации и интенсивной пластической деформации;
- 3) Изучены фазовые равновесия в сплавах систем Mg-Y-Gd-Sm и Mg-Sm-Tb в области, богатой магнием, и построены фрагменты соответствующих диаграмм состояния;
- 4) Установлено положительное влияние самария на кинетику старения и свойства сплавов Mg-Y-Gd-Zr, заключающееся в повышении прочностных свойств и сокращении времени упрочняющей термообработки;
- 5) Показано, что в сплавах Mg-Sm-Tb самарий сокращает время упрочняющей термообработки, а тербий способствует их наибольшему упрочнению, которое обусловлено выделением дисперсной пластинчатой орторомбической фазы в результате распада магниевого твердого раствора.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

- 1) Определена температура допустимого нагрева сплава ИМВ7-1, выше которой наступает его резкое разупрочнение;
- 2) Установлены концентрации дополнительной легирующей добавки самария, способствующего повышению свойств сплавов на основе системы Mg-Y-Gd и сокращению времени упрочняющей термообработки;

- 3) Определены режимы термической обработки, обеспечивающие повышение прочностных характеристик сплавов систем Mg-Y-Gd-Sm и Mg-Sm-Tb.
- 4) Заложены основы для разработки новых сплавов на базе системы Mg-Sm-Tb, обладающих высокими механическими свойствами при комнатной и повышенных температурах.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) Особенности влияния высокотемпературного отжига, холодной пластической и интенсивной пластической деформаций, дополнительного легирования на свойства высокопрочного и жаропрочного деформируемого магниевого сплава ИМВ7-1 системы Mg-Y-Gd-Zr;
- 2) Установленные особенности строения диаграммы состояния сплавов системы Mg-Y-Gd-Sm в области, богатой магнием;
- 3) Установленные особенности строения диаграммы состояния сплавов системы Mg-Sm-Tb в области, богатой магнием;
- 6) Особенности кинетики распада пересыщенного твердого раствора на основе магния и сопровождающих его фазовых превращений в сплавах системы Mg-Sm-Tb.
- 7) Оценка механических свойств сплавов систем Mg-Y-Gd-Sm-Zr и Mg-Sm-Tb.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы доложены на конференциях: всероссийская конференция молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов» Москва, ИМЕТ РАН, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013; евразийская научно-практическая конференция «Прочность неоднородных структур», Москва, НИТУ МИСиС, 2010, 2012; Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов, Москва, НИТУ МИСиС, 2011; международный симпозиум «Металлургия и материалы», Шибеник, Хорватия, 2010, 2012; международная конференция по кристаллохимии интерметаллидных соединений, Львов, Украина, 2010, 2013; Менделеевский съезд по общей и прикладной химии, Волгоград, 2011; международная научно-техническая конференция «Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве», Краматорск, Украина, 2011, 2013; международная конференция HighMatTech, Киев, Украина, 2011; международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», Москва, ИМЕТ РАН, 2011, 2013; конференция «Современные магниево- и литейные алюминиевые сплавы», Москва, ФГУП ВИАМ, 2011, 2013; школа-конференция стран СНГ «Ультрамелкозернистые и нанокристаллические материалы», Уфа, 2012; международная молодежная конференция «Junior

Euromat», Швейцария, Лозанна, 2012, международная техническая конференция «Современные металлические материалы и технологии» (СММТ'13), Санкт-Петербург, 2013; всероссийская конференция «НАНО 2013», Москва, ИМЕТ РАН, 2013.

Публикации. Основное содержание работы изложено в 35 научных работах, 8 из которых – в списке отечественных рецензируемых журналов, рекомендуемых ВАК. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка цитируемой литературы и приложения. Объем диссертации составляет 155 страниц, включая 55 рисунков, 28 таблиц и список литературы из 149 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Во введении отмечается актуальность работы, её направленность на создание новых легких конструкционных магниевых сплавов с лучшими прочностными характеристиками, чем применяемые в настоящее время. Сформулированы цель и задачи исследования.

1. Литературный обзор. В первой главе представлен анализ литературных данных, в котором рассмотрено влияние отдельных РЗМ на структуру и свойства магния, закономерности строения двойных и тройных диаграмм состояния магния с РЗМ, особенности распада пересыщенного магниевого твердого раствора, его кинетика, фазовые превращения и эффект упрочнения. Выявлены малоиспользуемые РЗМ, которые могли бы обеспечивать наибольшее упрочнение магниевых сплавов при комнатной и повышенной температурах. Показана перспективность легирования магния сочетанием нескольких РЗМ, особенно принадлежащих разным подгруппам (цериевой и иттриевой). Приведены сведения о промышленных, предложенных для использования, разрабатываемых и исследуемых в настоящее время магниевых сплавах, содержащих РЗМ, среди которых отмечается наиболее высокопрочный сплав ИМВ7-1 системы Mg-Y-Gd-Zr.

На основе анализа литературных данных показана актуальность и обосновывается направленность настоящей работы, заключающаяся в изыскании возможностей улучшения сплава ИМВ7-1 путем применения к нему различных технологий, дополнительного легирования (самарием), а также в исследовании ранее неизученной системы (Mg-Sm-Tb), на базе которой можно

было предполагать создание новых высокопрочных и жаропрочных магниевых сплавов.

2. Материалы и методы исследования сплавов. Во второй главе приводится чистота используемых материалов, описываются условия приготовления сплавов и методы их исследования.

В качестве шихтовых материалов использовался магний чистотой не менее 99,96%; РЗМ – Y, Gd, Sm, Tb, Nd с содержанием основного элемента не менее 99,82%, Zn, Al – не менее 99,6%; промышленные лигатуры – Mg-15%Zr, Mg-9,6%Zr, Mg-2%Mn. РЗМ вводились в сплавы в виде предварительно приготовленных лигатур.

Сплавы и лигатуры выплавлялись в электрической печи сопротивления под слоем покровного флюса ВИ-2. Разливка расплава производилась в стальной кокиль или методом погружения изложницы с расплавом в воду.

Химический состав слитков всех сплавов принимался по химическому анализу, который осуществлялся методом атомно-эмиссионной спектроскопии с использованием индуктивно-связанной плазмы (Inductivity Coupled Plasma-Atomic Spectrometer) на приборе ULTIMA 2С, Jobin-Yvon Firm.

Обработка давлением сплавов осуществлялась путем горячего прессования (экструзии) со степенью деформации ~93% при температуре $430 \pm 10^\circ\text{C}$, либо путем холодной прокатки со степенью деформации ~9%. Кроме того использовалась интенсивная пластическая деформация кручением под гидростатическим давлением 6 ГПа с количеством оборотов $N = 10$.

Для построения изотермических сечений сплавы отжигались в печах с воздушной атмосферой при 500, 400, 300°C в течение 24, 50 и 100 ч соответственно. Для обработки сплавов на твердый раствор проводилась гомогенизация 510-520°C в течение 6-8 ч с последующей закалкой в воде комнатной температуры. Старение сплавов осуществлялось в сушильном шкафу при 175, 200, 225 и 250°C общей продолжительностью до 128 ч. Температура в печах и сушильном шкафу поддерживалась с точностью не более $\pm 2^\circ\text{C}$.

Микроструктура сплавов методом оптической микроскопии изучалась на микроскопах Neophot 2, NU-2E (VEB Carl Zeis, Jena, Германия) и Me-F Reichert (Вена, Австрия) при увеличениях от 200 до 1000 раз. Растровая электронная микроскопия структуры сплавов проводилась на растровых электронных микроскопах: 1) LEO 430i со встроенной системой энергодисперсионного микроанализа ISIS 300; 2) LEO 1420, оснащенным системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy, в режиме вторичной

электронной эмиссии. Электронномикроскопические исследования на просвет на тонких фольгах проводились на электронном микроскопе JEM-2100. Съемка рентгенограмм осуществлялась на дифрактометре ДРОН-3.

Дифференциальный термический анализ (ДТА) проводился на установке, собранной на базе двухкоординатного самопишущего потенциометра ПДС-021М.

Для определения границ фазовых областей и исследования процессов распада пересыщенного магниевых твердого раствора применялся метод измерения удельного электросопротивления.

Измерение микротвердости проводилось по методу Виккерса на микротвердомере 401/402-MVD фирмы Instron Wolpert Wilson Instruments при нагрузке 25 г. Твердость измерялась по методу Бринелля на приборе ТШ–2М с диаметром вдавливаемого шарика 5 мм под нагрузкой 250 кг.

Характеристики механических свойств (σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ) при комнатной и повышенной температуре 250°C определялись при испытаниях на универсальных испытательных машинах Instron 3382 и Instron 5800.

3. Исследование возможности улучшения свойств сплава ИМВ7-1 путем отжига и пластической деформации. В главе описываются результаты исследований, целью которых являлось более полное изучение особенностей сплава ИМВ7-1, поведения его при отжигах и воздействия пластической деформации, с тем, чтобы выявить возможность улучшения его механических свойств, применяя соответствующие обработки.

3.1. Поведение сплава ИМВ7-1 при отжиге. Испытания сплава ИМВ7-1 показали высокие прочностные свойства в горячепрессованном состоянии с последующим упрочняющим старением. В этом состоянии структура его была рекристаллизованной не полностью, так что можно было предполагать, что проводя отжиг, обеспечивающий завершение рекристаллизации удастся повысить пластичность сплава, которая после старения до максимальной прочности была не высока. Кроме того, исследование влияния отжига на свойства горячепрессованного сплава ИМВ7-1 представляло интерес в связи с тем, что для практического использования важно изучить его поведение при нагреве, который может быть случайным при эксплуатации изделий из него или целесообразным при их изготовлении.

В работе была использована плита сплава ИМВ7-1 с поперечным сечением 200x40 мм² и длиной ~1,5 м, полученная путем горячего (430±10°C) прессования (экструзии) круглого слитка со степенью вытяжки около 13.

Согласно химическому анализу в сплаве содержалось 4,71%Y, 4,58%Gd, 0,31%Zr, основа – Mg.

При исследовании влияния отжига сплав ИМВ7-1 показал высокую термостабильность горячедеформированной структуры, что имеет немаловажное значение для его эксплуатационных характеристик. Было установлено, что в интервале температур 250-400°C кратковременный нагрев с выдержкой 1-2 ч приводит лишь к небольшому разупрочнению сплава (рис.1).

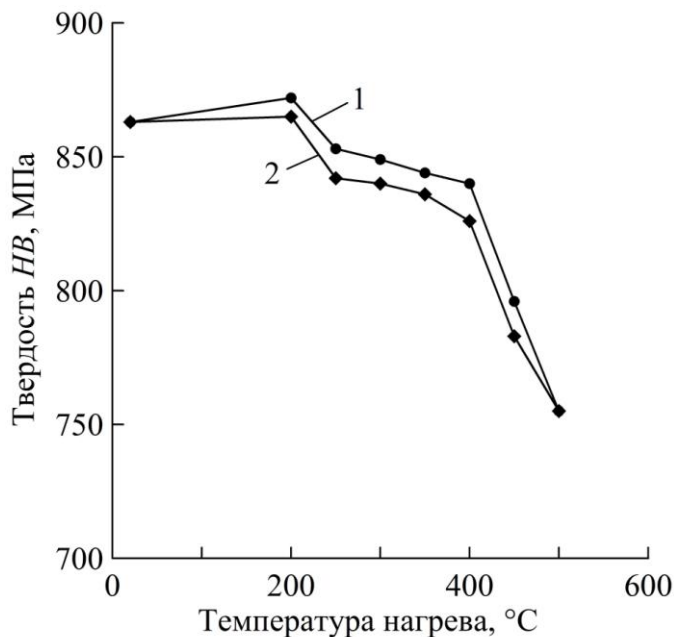


Рис. 1. Влияние температуры нагрева на твердость горячепрессованного сплава ИМВ7-1 (1 – продолжительность нагрева 1 ч, 2 – 2 ч)

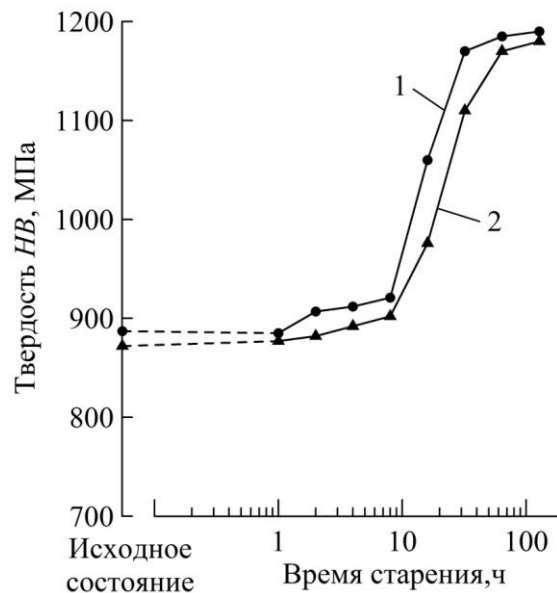


Рис. 2. Влияние продолжительности старения при 200°C на твердость сплава ИМВ7-1, после горячего прессования (1) и после дополнительного отжига при 400°C, 1 ч (2)

После отжига при более высоких температурах 450 и 500°C наблюдается резкое снижение твердости. Некоторое повышение твердости, сопровождаемое при нагреве до 200°C, по-видимому, можно объяснить выделением дисперсной пластинчатой орторомбической фазы β' , обогащенной Y и Gd, в результате распада пересыщенного магниевого твердого раствора.

Установлено, что в структуре сплава при температурах нагрева до 400°C процесс рекристаллизации не получает существенного развития. Дальнейшее увеличение температуры отжига приводит к полному исчезновению вытянутых деформированных зерен, имеющих в сплаве в горячепрессованном состоянии, и значительному росту новых рекристаллизованных зерен, что обуславливает наблюдаемое резкое разупрочнение сплава.

В соответствии с проведенным исследованием кинетики старения при 200°C установлено, что после отжига при 400°C сплав ИМВ7-1 сохраняет способность значительного упрочнения за счет распада пересыщенного твердого раствора (рис.2).

В таблице 1 приведены механические свойства плиты сплава в продольном направлении после отжига и дополнительного старения до максимума твердости. Предел прочности сплава, подвергнутого отжигу, оказался несколько ниже, чем без отжига, со значительно меньшей пластичностью.

Таблица 1. Механические свойства сплава ИМВ7-1 в горячепрессованном состоянии и после дополнительного отжига (продольное направление)

Обработка	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Горячее прессование	322	231	21,4
Горячее прессование + старение 200°С, 64 ч	435	338	4,9
Горячее прессование + отжиг 400°, 1 ч	314	229	14,8
Горячее прессование + отжиг 400°, 1 ч + старение 200°, 64 ч	404	329	1,7

3.2. Влияние холодной пластической деформации на структуру и свойства сплава ИМВ7-1. В горячепрессованном состоянии плита сплава ИМВ7-1 имела достаточно высокую пластичность с относительным удлинением 21,4%, что позволяло осуществить значительную для магниевых сплавов холодную деформацию.

Горячепрессованная плита сплава ИМВ7-1 подвергалась холодной прокатке вдоль направления прессования в несколько проходов с общей степенью обжатия 9%.

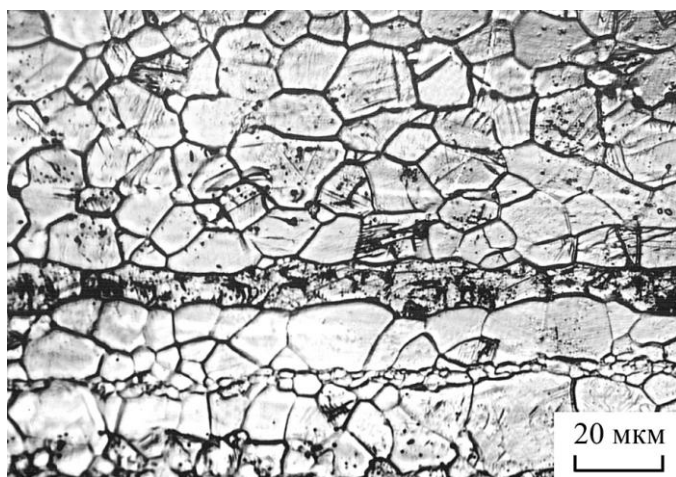


Рис. 3. Микроструктура сплава ИМВ7-1 (продольное направление) после горячего прессования и дополнительной холодной прокатки на 9%

Структура горячепрессованной плиты после дополнительного подката на 9% (рис.3), как и структура горячепрессованной плиты без подката, состояла из мелких рекристаллизованных зерен и небольшого количества больших деформированных зерен магниевого твердого раствора, вытянутых вдоль направления деформации, однако внутри этих зерен можно было наблюдать признаки пластической деформации в виде двойников.

Кривые изменения твердости и удельного электросопротивления (рис.4) при старении при 200°С показали, что распад пересыщенного магниевого твердого раствора в горячепрессованном сплаве ИМВ7-1 после холодной

пластической деформации происходит быстрее, чем без дополнительной деформации. Об этом свидетельствует уменьшение времени старения, при котором начинает возрастать твердость и снижаться удельное электросопротивление. Твердость после холодной пластической деформации, при этом, имеет более высокие значения.

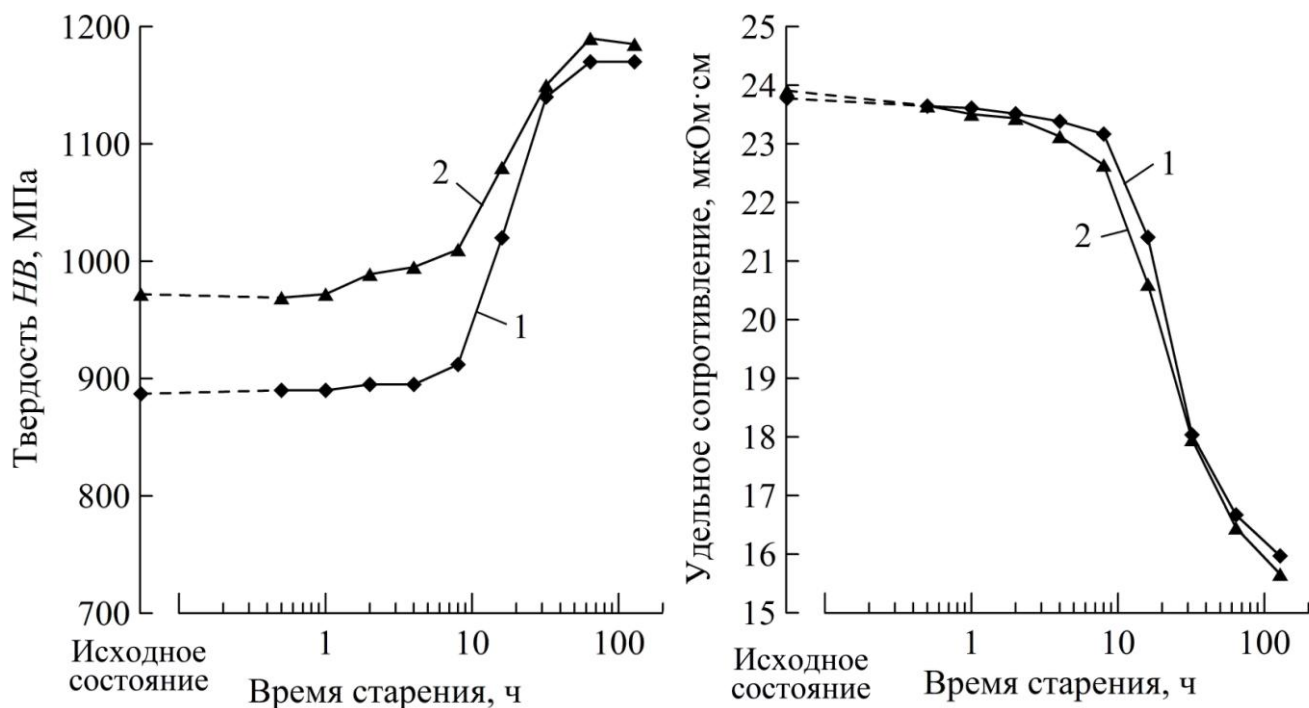


Рис. 4. Влияние продолжительности старения при температуре 200°C на твердость и удельное электросопротивление сплава ИМВ7-1 после горячего прессования (1) и после дополнительной холодной деформации (2)

При испытаниях на растяжение при комнатной температуре предел прочности после холодной прокатки и старения остался на уровне состаренного горячепрессованного сплава без холодной пластической деформации, предел текучести оказался несколько большим, а относительное удлинение снизилось до неприемлемого уровня (таблица 2).

Таблица 2. Механические свойства сплава ИМВ7-1 в горячепрессованном состоянии и после дополнительной холодной пластической деформации (продольное направление)

Обработка	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Горячее прессование	322	231	21,4
Горячее прессование + старение 200°C, 64 ч	435	338	4,9
Горячее прессование + 9 % холодная прокатка	357	321	10,1
Горячее прессование + 9 % холодная прокатка + старение 200°C, 16 ч	414	360	2,4
Горячее прессование + 9 % холодная прокатка + старение 200°C, 64 ч	426	379	1,3

3.3. Влияние интенсивной пластической деформации на свойства сплава ИМВ7-1. Ещё одним способом, позволяющим повысить уровень прочностных характеристик сплава ИМВ7-1, рассматривалась интенсивная пластическая деформация (ИПД). ИПД осуществлялась кручением под гидростатическим давлением (КГД) на плоских образцах диаметром 20 мм и толщиной ~1 мм, вырезанных из той же горячепрессованной плиты сплава ИМВ7-1. Перед кручением образцы подвергались гомогенизации при 510°C в течение 4 ч с охлаждением в воде.

Измерение микротвердости сплава при различных температурах нагрева показало, что кратковременный нагрев (1 ч) сплава ИМВ7-1, подвергнутого ИПД, при температурах до 250°C приводит к дополнительному упрочнению за счет распада пересыщенного твердого раствора на основе магния. При температурах 250 и 300°C упрочнение, созданное ИПД, снижается, однако остается на более высоком уровне, чем в сплаве, не подвергнутом ИПД (рис.5).

Сплав ИМВ7-1 после ИПД методом КГД способен упрочняться в процессе старения за счет распада пересыщенного твердого раствора на основе магния, при этом ИПД в некоторой степени ускоряет распад магниевого твердого раствора.

При КГД при 200°C в сплаве ИМВ7-1 было достигнуто наибольшее упрочнение ($\sigma_B = 475$ МПа, $\sigma_{0,2} = 450$ МПа при $\delta = 2,5\%$) (рис.6), которое превысило максимальные значения прочностных характеристик в сплаве, полученных на горячепрессованной плите после старения при 200°C, 64 ч ($\sigma_B = 435$ МПа, $\sigma_{0,2} = 338$ МПа, $\delta = 4,9\%$).

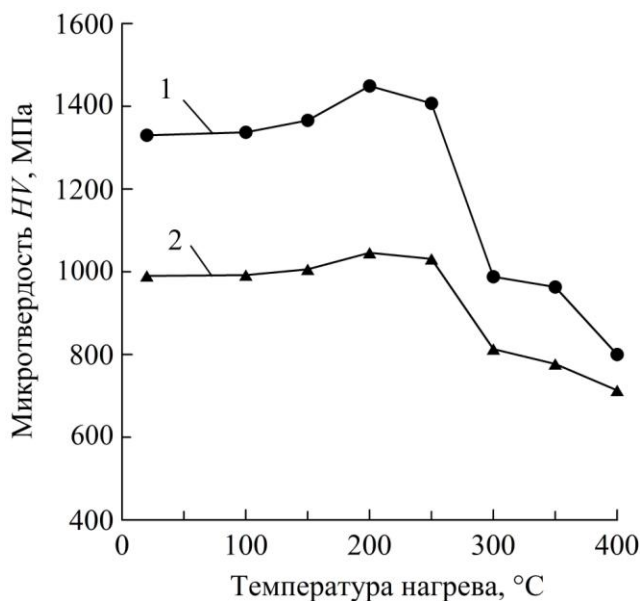


Рис. 5. Влияние температуры нагрева на микротвердость сплава ИМВ7-1: 1 — после КГД при 200°C; 2 — без КГД

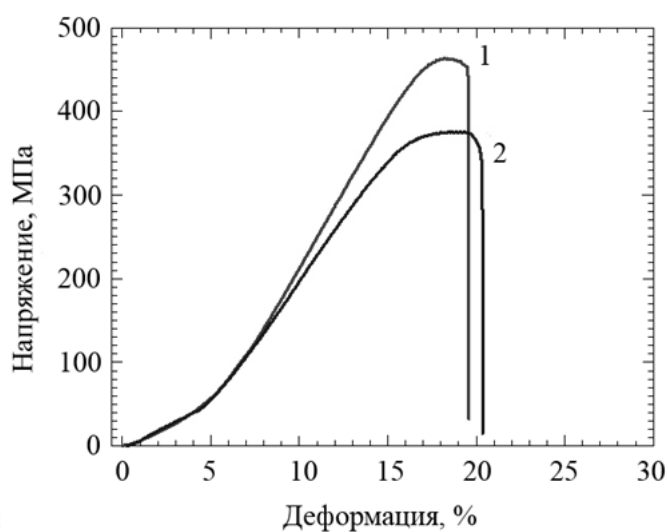


Рис. 6. Диаграмма напряжение-деформация испытаний на растяжение сплава ИМВ7-1 после КГД при 200°C (1) и 300°C (2)

4. Исследование сплавов системы Mg-Y-Gd-Sm. В главе исследуется возможность создания новых сплавов на базе системы Mg-Y-Gd-Zr путем их дополнительного легирования давкой Sm.

4.1. Исследование фазовых равновесий в сплавах системы Mg-Y-Gd-Sm (построение фрагментов диаграммы состояния). Исследование влияния Sm на свойства сплава ИМВ7-1 на первом этапе работы базировалось на исследовании четверной диаграммы Mg-Y-Gd-Sm. Рассматривалась область сплавов при постоянном равном содержании Y и Gd до 5% каждого и содержании Sm от 0 до 8%.

На основании наблюдения микроструктуры, рентгеновского спектрального микроанализа и рентгенофазового анализа было установлено, что в твердом состоянии в равновесии с магниевым твердым раствором находятся соединения $Mg_{41}Sm_5$ соответствующей двойной системы Mg-Sm, и $Mg_{24}(Y,Gd)_5$, представляющее собой

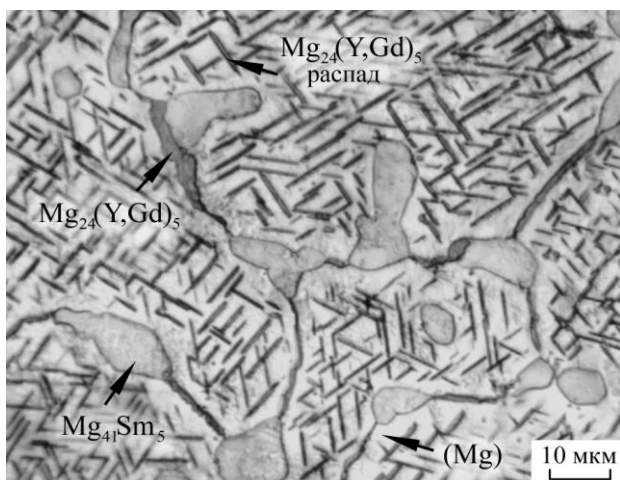


Рис. 7. Микроструктура сплава Mg-4,62% Y-5,63% Gd-5,77% Sm после отжига 300°C, 100 ч

$Mg_{24}(Y,Gd)_5$, представляющее собой твердый раствор Gd в соединении $Mg_{24}Y_5$ двойной системы Mg-Y. Микроструктура сплава, на которой одновременно присутствуют указанные фазы, представлена на рис.7. Кроме того, было показано, что существует значительная растворимость Y и Gd в фазе $Mg_{41}Sm_5$ (~14%) и Sm в фазе $Mg_{24}(Y,Gd)_5$ (~17%).

При постоянном отношении Y:Gd=1:1 в системе Mg-Y-Gd-Sm были определены границы области магниевого твердого раствора при температурах 500, 400 и 300°C. Установлено, что Sm, входя в магниевый твердый раствор, снижает совместную растворимость Y и Gd в твердом магнии, а область магниевого твердого раствора сужается с понижением температуры (рис.8), предопределяя возможность упрочнения сплавов при старении.

На рис.9 представлены политермические сечения диаграммы состояния Mg-Y-Gd-Sm: I – с увеличением содержания (Y + Gd) от 5,5% до 8,5% при 0-8% Sm; II – с постоянным содержанием 5% Y + 5% Gd, которые были построены, используя результаты дифференциального термического анализа и измерения удельного электросопротивления. Согласно проведенным исследованиям в системе имеет место четырехфазное неинвариантное равновесие переходного типа: $L+Mg_{24}(Y,Gd)_5 = (Mg)+Mg_{41}Sm_5$, протекающее при 536°C.

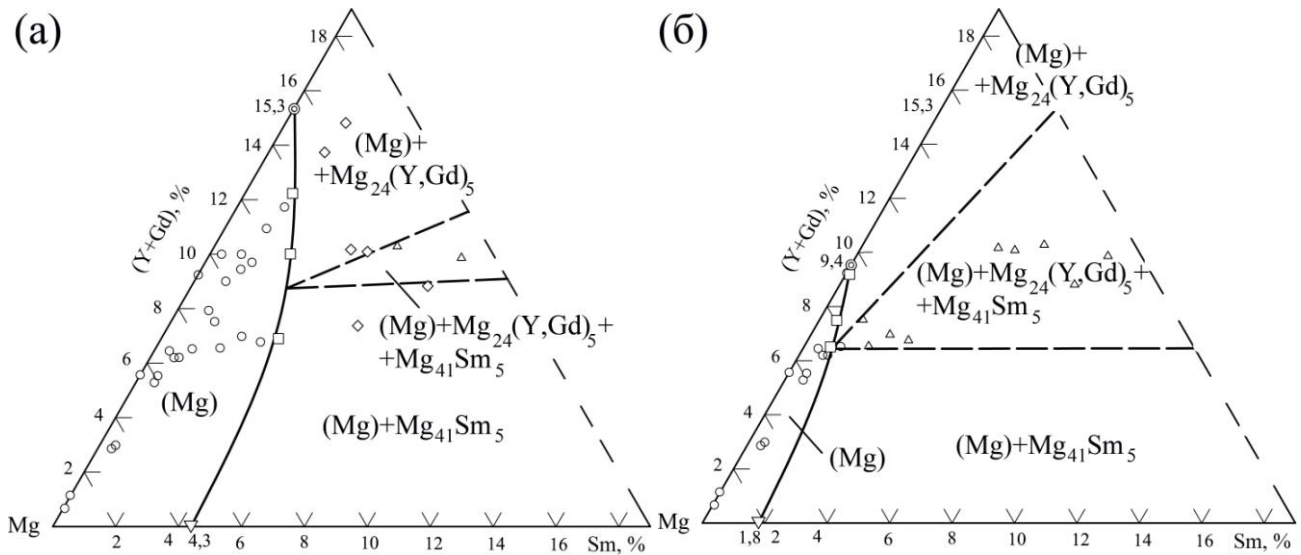


Рис. 8. Частичные изотермические сечения системы Mg-Mg₂₄(Y,Gd)₅-Mg₄₁Sm₅ при температурах: а – 500°C, б – 400°C

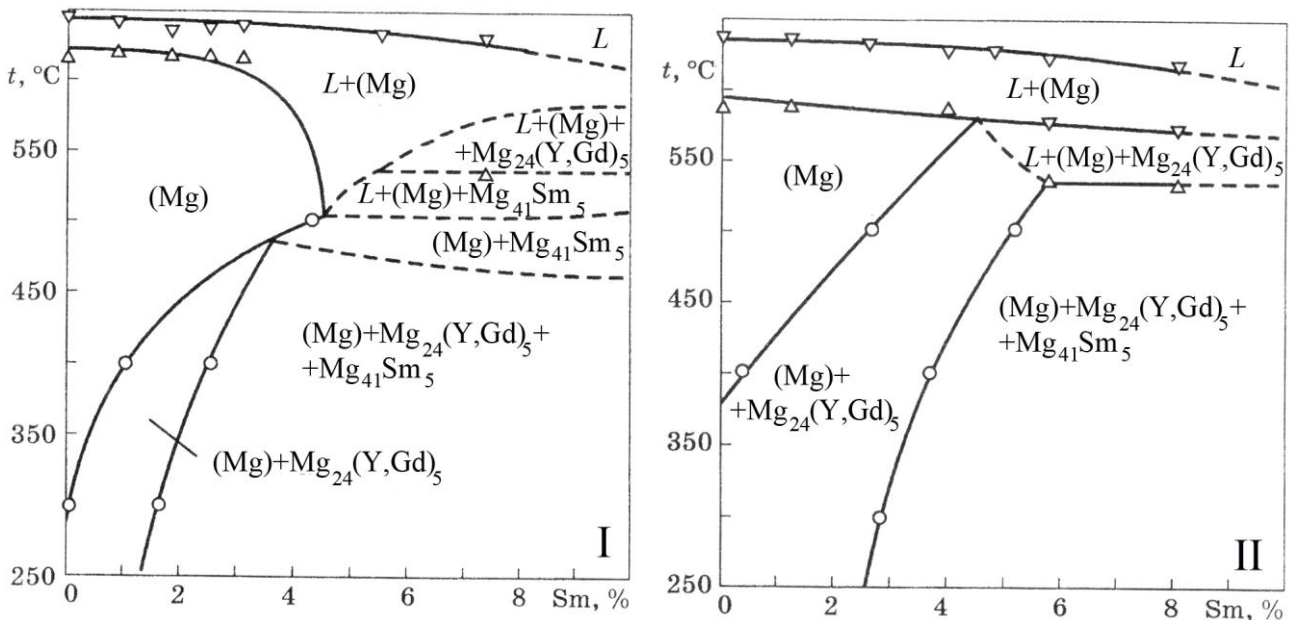


Рис. 9. Частичные политермические сечения I и II диаграммы состояния Mg-Y-Gd-Sm

4.2. Исследование механических свойств сплавов системы Mg-Y-Gd-Sm-Zr. Исследование кинетики старения горячепрессованных сплавов Mg-Y-Gd-Sm-Zr показало, что они упрочняются в процессе старения за счет распада пересыщенного твердого раствора. Предположительно упрочнение обусловлено выделением из магниевого твердого раствора дисперсных пластинок орторомбической β' -фазы, богатой Y и Gd. В процессе старения при температуре 200°C сплав Mg-3,27%Y-5,32%Gd-1,7%Sm-0,66%Zr, содержащий небольшое количество Sm (1,7%), показал более высокие значения твердости, чем сплав Mg-3,19%Y-5,25%Gd-0,4%Zr с близким содержанием Y и Gd, соответствующим их содержанию в сплаве ИМВ7-1, но не содержащий Sm

(рис. 10). Кроме того, полученные кривые показывают, что Sm ускоряет распад магниевого твердого раствора, так что при более кратковременном старении при 200°C в течение 24 ч уже достигается максимальное упрочнение.

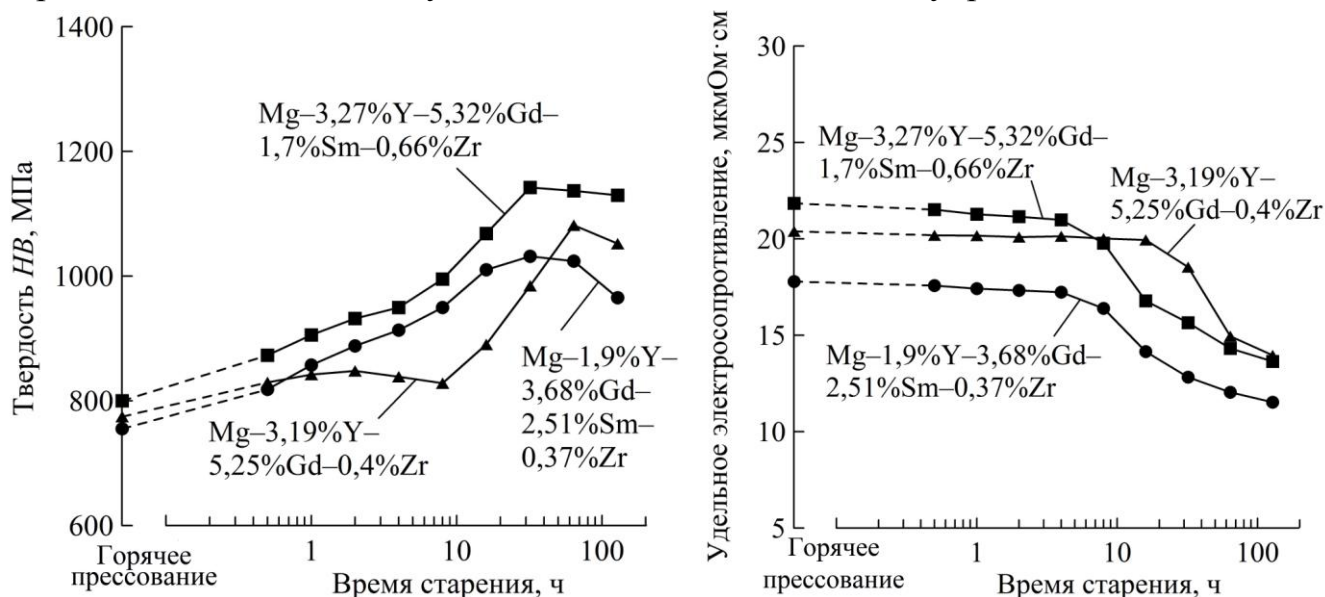


Рис. 10. Влияние продолжительности старения при 200°C на твердость и удельное электросопротивление горячепрессованных сплавов Mg-Y-Gd-Zr и Mg-Y-Gd-Sm-Zr

Механические свойства горячепрессованных сплавов системы Mg-Y-Gd-Sm-Zr при комнатной температуре и 250°C приведены в таблицах 3, 4.

Таблица 3. Механические свойства при комнатной температуре горячепрессованных сплавов систем Mg-Y-Gd-Zr и Mg-Y-Gd-Sm-Zr

Сплав	Обработка	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Mg-3,19% Y-5,25% Gd-0,4%Zr	старение 200°C, 64 ч	328	280	1,8
Mg-3,27% Y-5,32% Gd-1,7%Sm-0,66%Zr	старение 200°C, 24 ч	380	333	1,4
Mg-1,9% Y-3,68% Gd-2,51%Sm-0,37%Zr	старение 200°C, 24 ч	356	272	6,1

Таблица 4. Механические свойства при 250°C горячепрессованных сплавов систем Mg-Y-Gd-Zr и Mg-Y-Gd-Sm-Zr, состаренных при 200°C, 64 ч

Сплав	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Mg-3,19% Y-5,25% Gd-0,4%Zr	314	259	4,9
Mg-3,27% Y-5,32% Gd-1,7%Sm-0,66%Zr	358	310	2,3
Mg-1,9% Y-3,68% Gd-2,51%Sm-0,37%Zr	315	252	10,7
ИМВ7-1	336	286	14,2

Результаты испытаний показали, что механические свойства сплава Mg-3,19%Y-5,25%Gd-0,4%Zr без Sm уступают механическим свойствам горячепрессованного сплава ИМВ7-1 близкого состава, полученного в заводских условиях, однако их можно сравнить со свойствами двух других сплавов, приготовленных в тех же условиях, и тем самым показать положительное влияние Sm на свойства сплавов системы Mg-Y-Gd-Zr.

Можно видеть, что присутствие Sm способствует повышению прочностных свойств сплавов Mg-Y-Gd-Zr даже при меньшем суммарном содержании Y и Gd (таблица 3). При испытаниях на растяжение при 250°C (таблица 4) сплав Mg-3,27%Y-5,32%Gd-1,7%Sm-0,66%Zr показал более высокую жаропрочность, чем горячепрессованная плита сплава ИМВ7-1.

Таким образом, добавка Sm не только повышает прочностные характеристики сплава ИМВ7-1, но и может понизить стоимость сплавов Mg-Y-Gd-Zr частичным замещением более дорогостоящих Y и Gd и сокращением времени старения.

5. Исследование сплавов системы Mg-Sm-Tb. В главе исследуется система Mg-Sm-Tb, которая рассматривалась как перспективная с точки зрения создания на её основе новых прочных и жаропрочных магниевых сплавов.

5.1. Исследование фазовых равновесий в сплавах системы Mg-Sm-Tb.

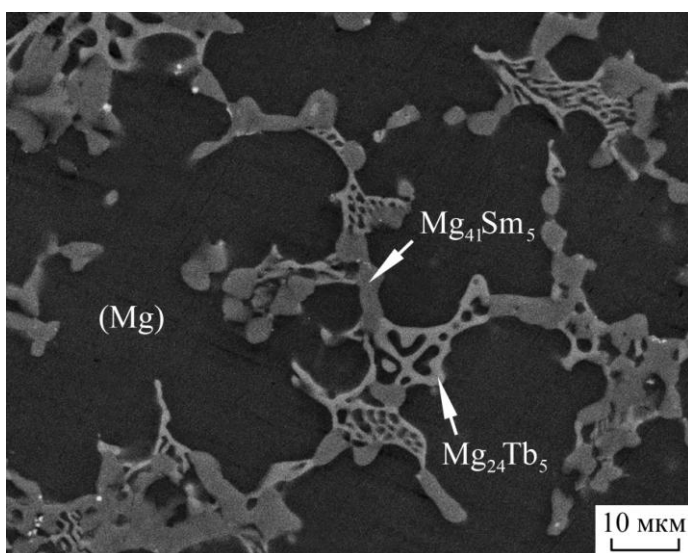


Рис. 11. Микроструктура сплава Mg-11,4%Sm-14,9%Tb после отжига 500°C, 24 ч, полученная в растровом электронном микроскопе в режиме вторичной электронной эмиссии.

В области сплавов, богатой магнием, были исследованы фазовые равновесия, протекающие в тройной системе Mg-Sm-Tb, с построением тройной диаграммы состояния. Было установлено, что в равновесии с магниевым твердым раствором находятся только фазы $Mg_{41}Sm_5$ и $Mg_{24}Tb_5$ соответствующих двойных систем Mg-Sm и Mg-Tb. Локальный спектральный анализ сплавов, содержащих одновременно магниевый твердый раствор и фазы $Mg_{41}Sm_5$ и $Mg_{24}Tb_5$ (рис.11),

позволил определить составы всех трех фаз, находящихся в равновесии. Средние значения содержаний Mg, Sm и Tb в фазах, находящихся в равновесии

при 500°C, рассчитанные по нескольким результатам локального спектрального анализа приведены в таблице 5. Они показывают значительную растворимость Sm в соединении Mg₂₄Tb₅ (21,3%) и Tb в соединении Mg₄₁Sm₅ (14,3%).

Таблица 5. Химические составы фаз: магниевого твердого раствора (Mg), Mg₄₁Sm₅ и Mg₂₄Tb₅, находящихся в равновесии при 500°C

Фаза	Содержание компонентов, масс.%			Содержание компонентов, ат.%		
	Mg	Sm	Tb	Mg	Sm	Tb
(Mg)	85,05	3,44	11,51	97,35	0,64	2,02
Mg ₄₁ Sm ₅	57,00	28,70	14,30	89,30	7,27	3,42
Mg ₂₄ Tb ₅	52,10	21,30	26,60	87,40	5,78	6,83

При 500 и 300°C была исследована протяженность области магниевого твердого раствора, которая с понижением температуры сужается, указывая на возможность образования пересыщенного твердого раствора на основе магния и его распада в процессе старения (рис. 12).

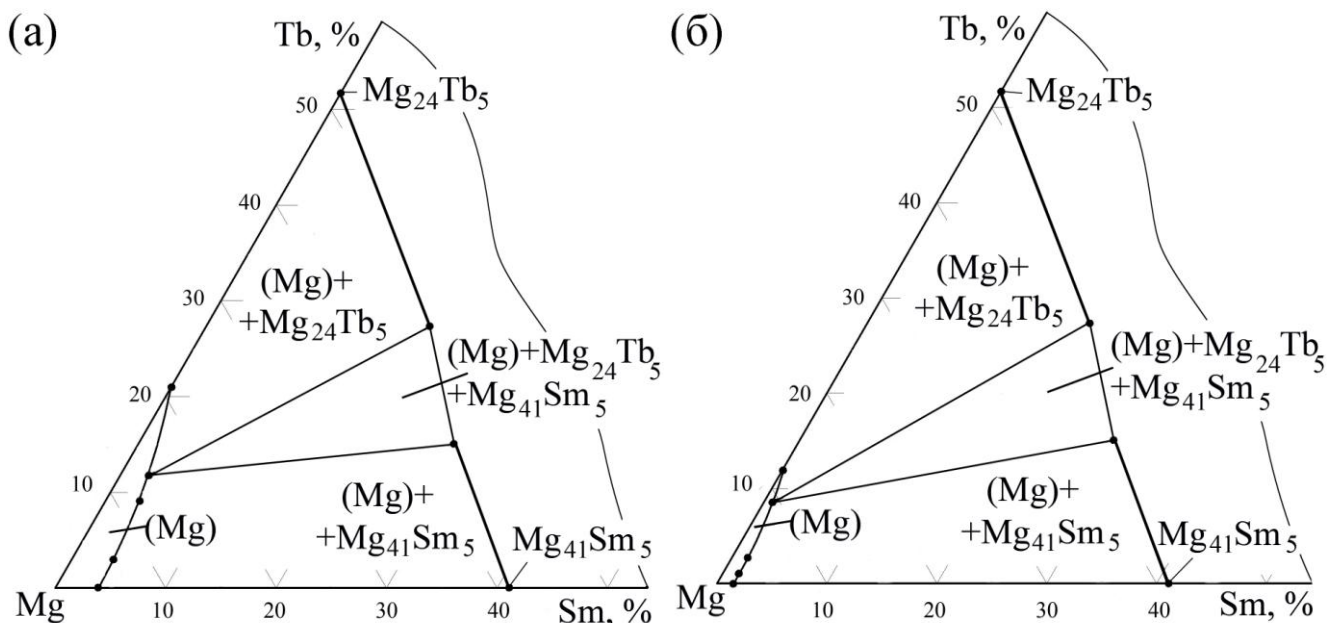


Рис. 12. Частичные изотермические сечения системы Mg-Mg₂₄Tb₅-Mg₄₁Sm₅ при температурах: а – 500°C, б – 300°C

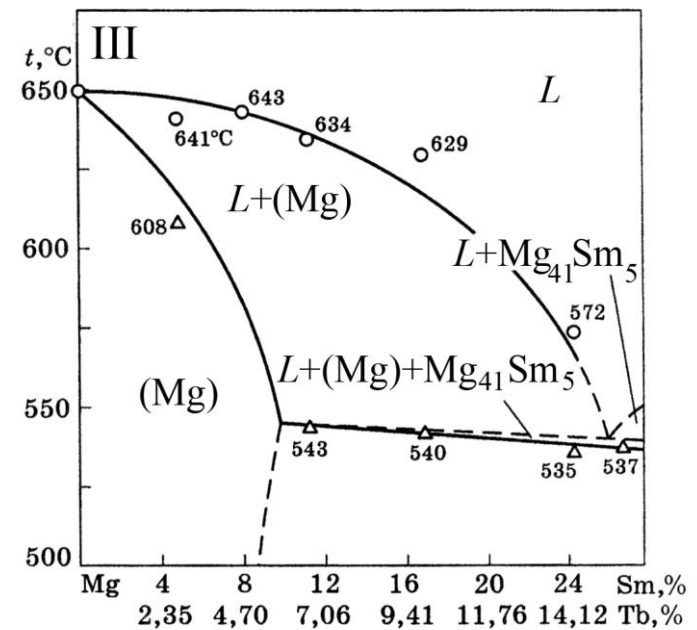
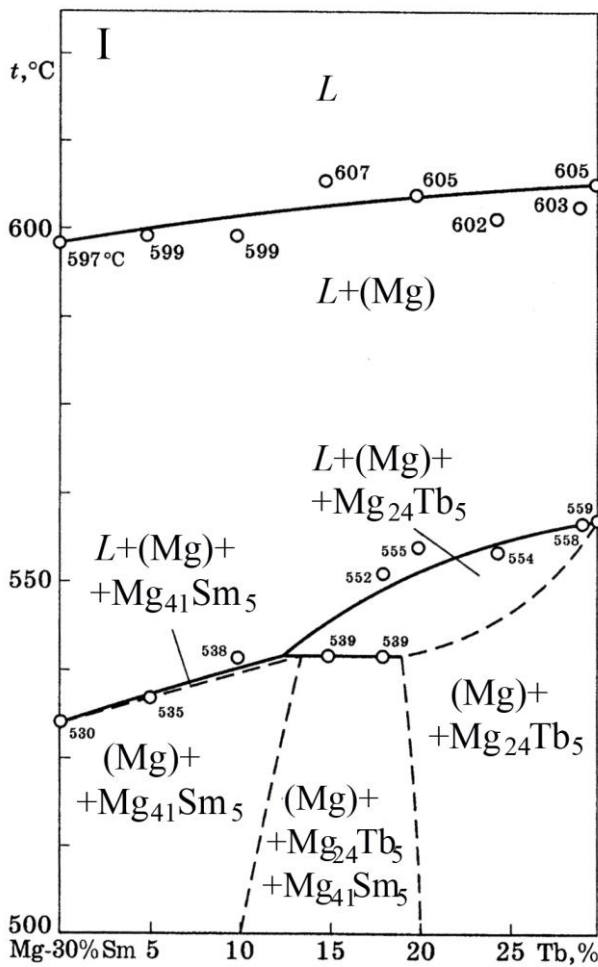
Построенные изотермические сечения показали, что при увеличении отношения содержаний Sm и Tb суммарная растворимость этих элементов в Mg уменьшается.

Исследование поверхностей кристаллизации диаграммы состояния проводилось по трем политермическим сечениям: I – при постоянном содержании Mg (~70%) (рис.13,а); II – при постоянном содержании Tb (~24%); III – при отношении содержаний Sm : Tb = 1,7 : 1 (рис.13,б), которые были

построены используя результаты дифференциального термического, микроструктурного и микрорентгеноспектрального анализов. Было установлено, что в системе Mg-Sm-Tb протекает невариантное четырехфазное равновесие переходного типа $L+Mg_{24}Tb_5=(Mg)+Mg_{41}Sm_5$ при 539°C . На рис.13,в показан четырехугольник, соответствующий плоскости четырехфазного невариантного равновесия переходного типа (состав жидкой фазы, участвующей в четырехфазном равновесии, соответствует точке U).

(б)

(а)



(в)

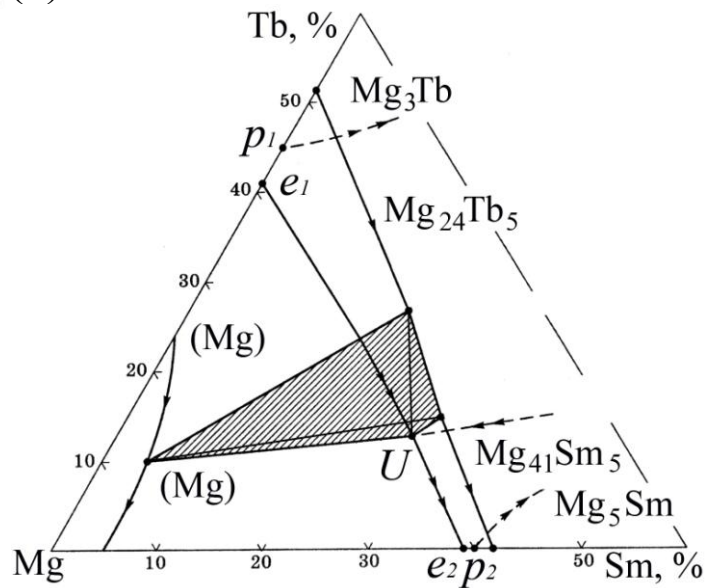


Рис. 13. Политермические сечения I (а) и III (б) и проекция поверхностей кристаллизации (в) диаграммы состояния Mg-Sm-Tb

5.2. Исследование распада пересыщенного твердого раствора на основе магния в сплавах системы Mg-Sm-Tb. Исследование кинетики распада магниевого твердого раствора в системе Mg-Sm-Tb проводилось на нескольких сплавах с различным соотношением Sm и Tb, но в пределах установленной их совместной растворимости в твердом магнии при температуре под закалку (рис.14). Результаты показали, что с увеличением содержания Tb эффект упрочнения возрастает, Sm несколько ускоряет распад магниевого твердого раствора, при этом кинетика старения тройных сплавов носит промежуточный характер между кинетиками распада в двойных магниевых сплавах Mg-Sm и Mg-Tb. Максимум твердости соответствует температуре 200°C с выдержкой около 60 ч. С увеличением температуры старения твердость снижается, а её максимум смещается в сторону меньших выдержек.

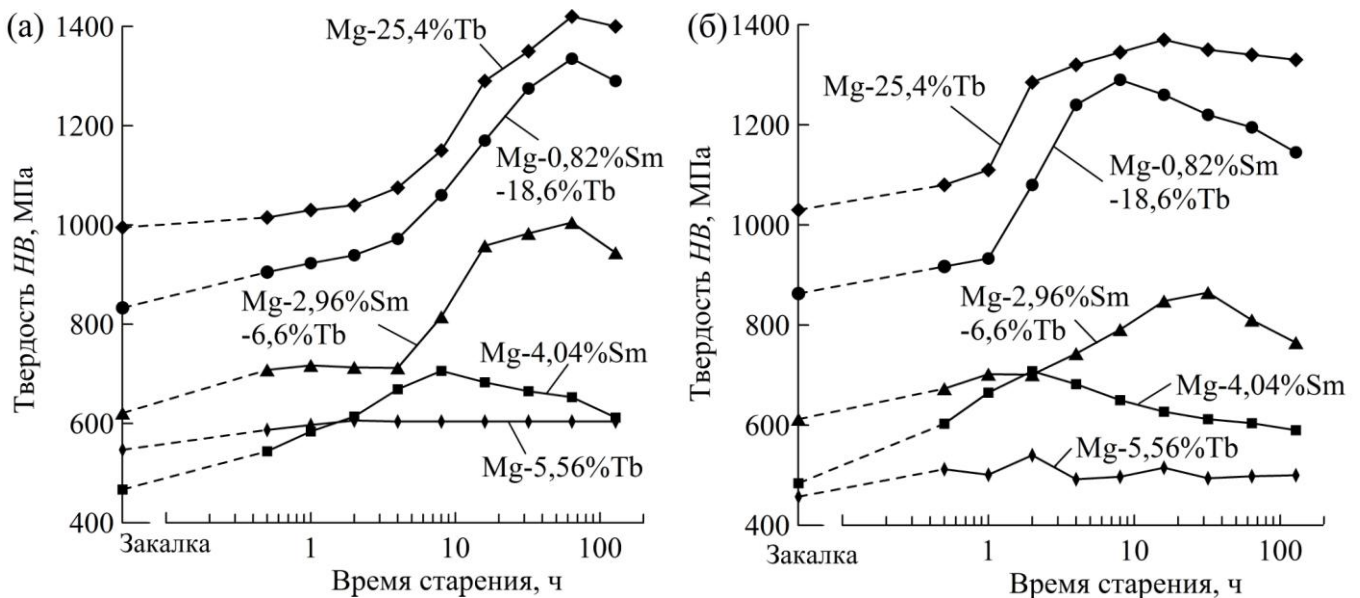


Рис. 14. Изменение твердости сплавов Mg-Sm-Tb с увеличением времени старения при: а – 200; б – 225°C

Электронномикроскопические исследования проводились на сплавах Mg-3,05%Sm-8,94%Tb и Mg-4,35%Sm-11,5%Tb, близких по соотношению Sm и Tb к сплаву Mg-2,96%Sm-6,6%Tb, которые обрабатывались по режимам, соответствующим различным стадиям распада магниевого твердого раствора по данным кинетики старения.

В закаленном состоянии какие-либо признаки распада отсутствовали: никаких видимых выделений в структуре сплавов и сверхструктурных рефлексов, помимо рефлексов магниевого твердого раствора, на электронограммах не наблюдалось.

При старении 200°C, 2 ч, соответствующего стадии небольшого повышения твердости, на электронограммах можно было наблюдать вытянутые сверхструктурные рефлексы, являющиеся признаком образования упорядочения ближнего порядка по типу Mg₃Cd (рис.15,а). Образующаяся в результате упорядочения β''-фаза является гексагональной с периодами $a_{\beta''}=2a_{Mg}$ и $c_{\beta''}=c_{Mg}$.

При старении 200°C, 8 ч, соответствующего началу второй стадии роста твердости, в теле зерна выявлялся матричный контраст, указывающий на развитие распада магниевого твердого раствора. Расшифровка сверхструктурных рефлексов на базисной плоскости в виде «косых крестов» (рис.15,б) показала, что образуется орторомбическая β'-фаза, ориентированная относительно матрицы тремя симметричными способами с параметрами решетки: $a_{\beta'}=8d_{100Mg}$, $b_{\beta'}=2a_{Mg}$ и $c_{\beta'}=c_{Mg}$.

При режиме старения 225°C, 32 ч, соответствующего максимуму твердости при этой температуре, распад магниевого твердого раствора происходит как по границам, так и в теле зерна, с образованием той же орторомбической фазы. Форма образовавшихся при распаде пересыщенного твердого раствора частиц указывала на то, что частицы являются пластинками (рис.15,в), а размытость их границ свидетельствовала о когерентной связи их с матрицей магния. Согласно микродифракционной картине пластинки выделившихся частиц располагаются большими плоскостями по призматическим плоскостям (110) магниевого твердого раствора. В структуре сплавов наблюдались также четко очерченные пластинчатые частицы, располагающиеся тремя симметричными способами по призматическим плоскостям (100) кристаллической решетки магния. Анализ электронограмм показал, что частицы с четко очерченными границами имеют более сложную кристаллическую решетку, некогерентную с кристаллической решеткой матрицы.

На стадии разупрочнения сплавов по режиму 250°C, 64 ч в структуре по-прежнему наблюдалось совместное присутствие частиц с размытыми и четко очерченными границами (рис.15,г), однако размеры и количество частиц с четко очерченными границами увеличились. Рентгеновское исследование показало, что выделившиеся частицы в основном принадлежат к равновесной фазе (β) Mg₂₄Tb₅ системы Mg-Tb, а Sm растворяется в продуктах распада.

Таким образом, в системе Mg-Sm-Tb при распаде пересыщенного магниевого твердого раствора последовательно протекают процессы упорядочения по типу Mg₃Cd (β''), образования пластинчатых выделений

орторомбической фазы (β') и пластинчатых выделений равновесной фазы (β) по призматическим плоскостям кристаллической решетки магниевого твердого раствора с симметрией третьего порядка. Такое расположение частиц, перпендикулярное базисным плоскостям кристаллической решетки, являющимися основными атомными плоскостями магния, по которым происходит скольжение при пластической деформации, должно в наибольшей степени способствовать упрочнению при распаде.

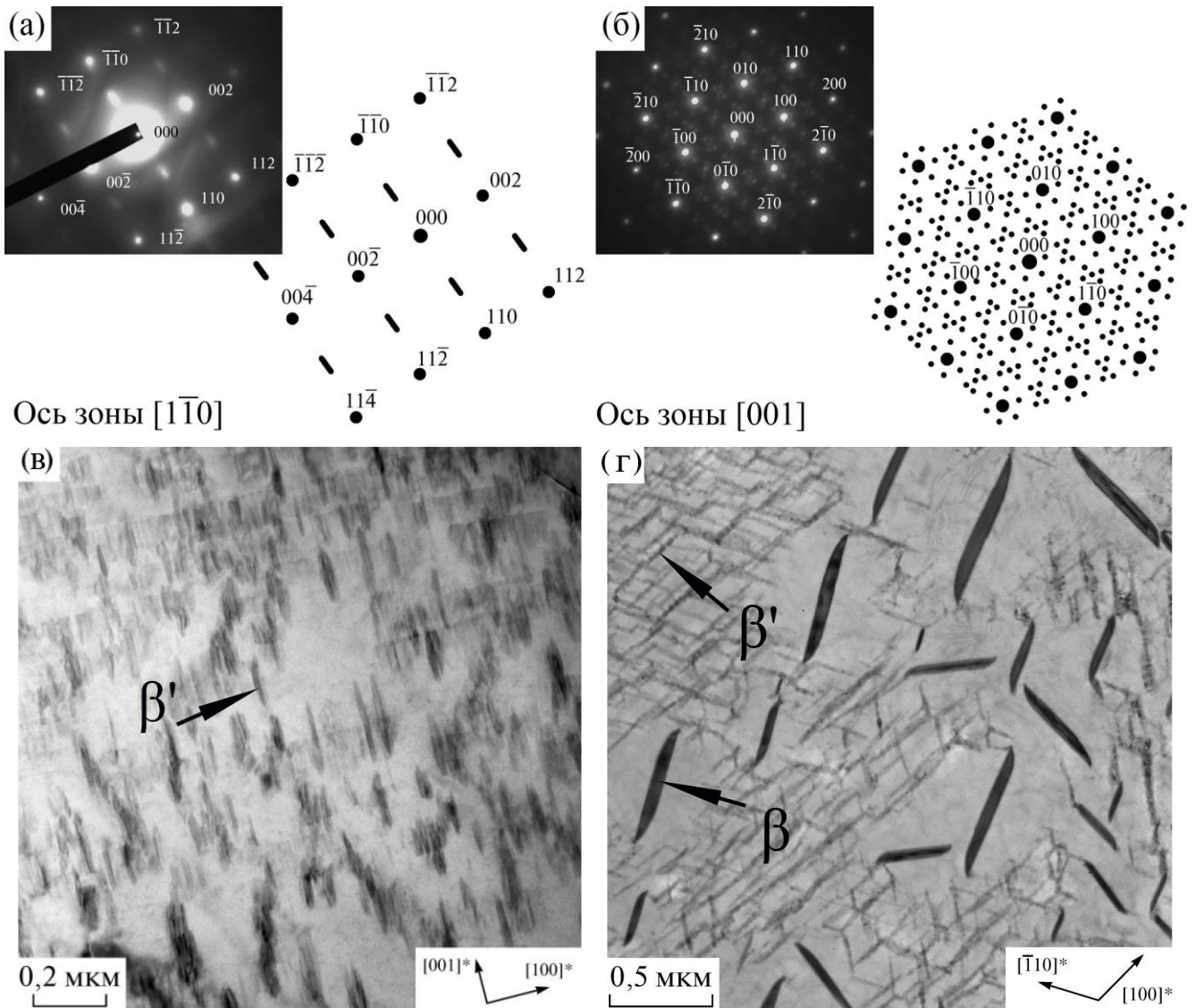


Рис. 15. Электронограммы (а, б) и электронные микрофотографии (в, г) сплавов: а – Mg–4,35% Sm–11,5% Tb после старения 200°C, 2 ч; б – Mg–4,35% Sm–11,5% Tb после старения 200°C, 8 ч; в – Mg–3,05% Sm–8,94% Tb после старения 225°C, 32 ч; г – Mg–4,35% Sm–11,5% Tb после старения 250°C, 64 ч

5.3. Исследование механических свойств сплавов системы. Испытания на механические свойства сплавов Mg-Sm-Tb-Zr показали, что они значительно упрочняются в процессе старения. В литом состоянии наилучшие механические свойства при комнатной температуре были достигнуты на сплаве Mg-2,29%Sm-

5,66%Tb-0,1%Zr, который после закалки и упрочняющего старения по пределу прочности превзошел промышленные литейные магниевые сплавы МЛ5, МЛ10, WE43 и WE54 при достаточном запасе пластичности. При повышенной температуре испытания 250°C в сплавах Mg-Sm-Tb-Zr также могут достигаться более высокие, чем у известных магниевых сплавов, значения прочностных характеристик. Значения механических свойств сплавов Mg-Sm-Tb-Zr указаны в таблицах 6,7, промышленных сплавов МЛ5, МЛ10, WE43, WE54 – в таблице 8.

Таблица 6. Механические свойства сплавов Mg-Sm-Tb-Zr при комнатной температуре

Сплав	Обработка	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Mg-2,29%Sm-5,66% Tb-0,1%Zr	Литое состояние, закалка 520°C, 8 ч + старение 200°C, 24 ч	303	188	5,6
Mg-3,57%Sm-7,93% Tb-0,87%Zr	Горячее прессование	267	196	15,8
Mg-3,57%Sm-7,93% Tb-0,87%Zr	Горячее прессование + старение 200°C, 64 ч	342	269	7,2

Таблица 7. Механические свойства сплавов Mg-Sm-Tb-Zr при 250°C

Сплав	Обработка	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Mg-3,04%Sm-7,2% Tb-0,23%Zr	Литое состояние, закалка 520°C, 8 ч + старение 200°C, 24 ч	287	197	3,4
Mg-3,57%Sm-7,93% Tb-0,87%Zr	Горячее прессование + старение 200°C, 64 ч	299	240	10,5
Mg-1,93%Sm-16,33% Tb-0,47%Zr	Горячее прессование + старение 200°C, 64 ч	406	319	7,0

Таблица 8. Механические свойства сплавов МЛ5, МЛ10, WE43, WE54 после закалки и старения по режиму T6 при комнатной температуре и 250°C

Сплав	T _{исп} , °C	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
МЛ5 (Mg-Al-Zn-Mn)	20	255	120	4,0
МЛ10 (Mg-Nd-Zn-Zr)	20	226	137	3,0
	250	165	130	13,0
WE43(Mg-Y-Nd-Zr)	20	250	180	7,0
	250	210	150	15,0
WE54(Mg-Y-Nd-Zr)	20	280	205	4,0
	250	230	175	9,0

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Исследовано поведение сплава ИМВ7-1 системы Mg-Y-Gd-Zr при кратковременном отжиге (1-2 ч) в диапазоне температур 250-500°C. Показано, что нагрев до 400°C не приводит к существенному росту рекристаллизованных зерен в структуре сплава ИМВ7-1 и сопровождается сравнительно небольшим его разупрочнением. После этого нагрева сплав ИМВ7-1 сохраняет способность упрочняться при старении. Достижимые при этом прочностные свойства и пластичность оказываются более низкими, чем после старения без отжига.
2. Исследовано влияние холодной пластической деформации при прокатке на свойства горячепрессованного сплава ИМВ7-1. Установлено, что холодная пластическая деформация со степенью обжатия 9% с последующим старением (200°C, 64 ч) до максимальной твердости (НВ = 1190 МПа) приводит к повышению предела текучести (379 МПа) при значительном снижении пластичности ($\delta = 1,3\%$).
3. Исследовано влияние интенсивной пластической деформации методом кручения под гидростатическим давлением сплава ИМВ7-1 на его структуру и механические свойства при старении и отжигах. Показано, что интенсивная пластическая деформация обеспечивает в сплаве ИМВ7-1 более высокие прочностные свойства ($\sigma_B = 475$ МПа; $\sigma_{0,2} = 450$ МПа; $\delta = 2,5\%$), чем на горячепрессованном материале с последующим старением.
4. Проведено исследование части четверной диаграммы состояния Mg-Y-Gd-Sm в области сплавов, богатых магнием, при постоянном соотношении Y:Gd = 1:1. Установлены фазовые равновесия, в системе Mg-Y-Gd-Sm и состав фаз, находящихся в равновесии с твердым магнием. Показано, что самарий снижает растворимость иттрия и гадолиния в твердом магнии, а область магниевого твердого раствора сужается с понижением температуры, предопределяя возможность упрочнения сплавов при старении.
5. Установлено, что введение самария в сплавы системы Mg-Y-Gd-Zr типа ИМВ7-1 изменяет их кинетику и эффект упрочнения при старении. Небольшая добавка самария ~2% обеспечивает большее упрочнение сплавов при старении, которое достигается при меньших выдержках и способствует повышению прочности и жаропрочности сплавов системы Mg-Y-Gd-Zr типа ИМВ7-1 в состаренном состоянии.
6. Исследована тройная диаграмма состояния Mg-Sm-Tb в области сплавов, богатой магнием. Выявлено, что область магниевого твердого раствора сужается с понижением температуры. При увеличении отношения

содержаний самария и тербия суммарная растворимость этих элементов в магнии уменьшается. В соединениях самария и тербия, находящихся в равновесии с твердым магнием, растворяется в значительном количестве другой редкоземельный металл.

7. Исследованы кинетика и структурные превращения при распаде пересыщенного твердого раствора в сплавах Mg-Sm-Tb. Установлено, что эти сплавы значительно упрочняются при старении с оптимальной температурой 200°C, при этом с увеличением содержания тербия распад пересыщенного магниевого твердого раствора в сплавах происходит медленнее, а эффект упрочнения возрастает. С помощью просвечивающей электронной микроскопии установлено, что при распаде в структуре сплавов Mg-Sm-Tb при Tb:Sm ~2,5 происходит последовательное протекание процессов упорядочения по типу $M_{g3}Cd$, образования пластинчатых выделений орторомбической фазы, отвечающей за наибольшее упрочнение при распаде, и более крупных пластинчатых выделений равновесной фазы с другой ориентировкой.
8. Определены механические свойства литых и деформированных сплавов системы Mg-Sm-Tb-Zr при комнатной и повышенных температурах. Установлен высокий уровень прочностных свойств, достигаемый в этих сплавах. В литом состоянии сплавы Mg-Sm-Tb-Zr, содержащие около 8-10% (Sm+Tb), имеют более высокие характеристики прочности и жаропрочности, чем известные литейные магниевые сплавы МЛ5, МЛ10 и WE43, WE54.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Список публикаций в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК

1. Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Никитина Н.И., Лукьянова Е.А. Особенности физико-химического взаимодействия магния с отдельными редкоземельными металлами в тройных системах // Технология легких сплавов. –2009. –№ 3. –С. 21-27.
2. Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Лукьянова Е.А., Королькова И.Г., Поликанова А.С. Исследование фазовых равновесий в богатых магнием сплавах системы Mg-Sm-Tb // Металлы. –2010. –№ 4. –С. 99-106.
3. Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Лукьянова Е.А., Королькова И.Г. Исследование поверхности ликвидус диаграммы состояния Mg-Sm-Tb // Металлы. –2011. –№ 3. –С. 99-105.

4. Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Никитина Н.И., Тарытина И.Е., Лукьянова Е.А. Поведение при отжиге высокопрочного магниевого сплава ИМВ7-1 системы Mg–Y–Gd–Zr // Перспективные материалы. –2011. –№ 6. –С. 53-58.
5. Лукьянова Е.А., Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Королькова И.Г. Исследование растворимости самария в твердом растворе на основе магния, содержащем иттрий и гадолиний // Металлы. –2012. –№ 4. –С. 85-89.
6. Рохлин Л.Л., Лукьянова Е.А., Добаткина Т.В., Аладьев Н.А., Королькова И.Г. Фазовые равновесия в сплавах системы Mg–Y–Gd–Sm // Металлы. – 2012. –№ 5. –С. 71-77.
7. Лукьянова Е.А., Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Табачкова Н.Ю. Исследование распада пересыщенного твердого раствора на основе магния в сплавах системы Mg–Sm–Tb // Физика металлов и металловедение. –2013. –Т.114. – №7. –С. 658-669.
8. Рохлин Л.Л., Лукьянова Е.А., Добаткина Т.В., Королькова И.Г. Упрочнение магневых сплавов системы Mg–Sm–Tb ультрадисперсными частицами, образовавшимися при распаде пересыщенного твердого раствора // Письма о материалах. –2013. –Т.3. –№ 2. –С. 64-67.

Список публикаций в журналах, сборниках статей и конференций

9. Лукьянова Е.А. Исследование структуры и свойств системы Mg–Sm–Tb // Сборник статей VI российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов, 17-19 ноября. –2009. –С. 44-47
10. Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Лукьянова Е.А. Влияние холодной пластической деформации перед старением на механические свойства высокопрочного магниевого сплава ИМВ7-1 системы Mg–Y–Gd–Zr // Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов, Москва, НИТУ МИСиС, 26-28 сентября. –2011. –С. 32.
11. Лукьянова Е.А., Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Королькова И.Г. Диаграмма состояния сплавов Mg–Sm–Tb и их поведение при старении // Тезисы 3-ей Международной конференции HighMatTech, Киев, Украина, 3-7 октября. – 2011. С. 79.
12. Rokhlin L.L., Dobatkina T.V., Lukyanova E.A. New high-strength light alloys of the Mg–Y–Gd–Zr system // Сборник тезисов XIX Менделеевского съезда, 25-30 октября, Волгоград. –2011. –С. 348.
13. Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Лукьянова Е.А., Тарытина И.Е. Механические свойства и поведение при нагревах высокопрочных сплавов системы Mg–Y–Gd–Zr // Тезисы 4-ой Международной конференции «Деформация и

- разрушение материалов и наноматериалов», Москва, ИМЕТ РАН, 25-28 октября. –2011. –С. 382-384.
- 14.Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Лукьянова Е.А. Исследование механических свойств и характера разрушения стареющего магниевое сплава системы Mg-Y-Gd-Zr, подвергнутого холодной пластической деформации // Тезисы VI-ой Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур», Москва, МИСиС, 17-19 апреля. –2012. –С. 19.
- 15.Лукьянова Е.А., Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Королькова И.Г. Упрочнение магниевых сплавов ультрадисперсными частицами, образовавшимися при распаде пересыщенного твердого раствора // Тезисы школы-конференции стран СНГ «Ультрамелкозернистые и нанокристаллические материалы», 8-12 октября, Уфа. –2012. –С. 109.
- 16.Добаткина Т.В, Рохлин Л.Л., Лукьянова Е.А. Деформируемый магниевый сплав ИМВ7-1, содержащий редкоземельные металлы, для работы при близких к комнатной и повышенных температурах // Труды 10-й Международной технической конференции «Современные металлические материалы и технологии» (СММТ'13), Санкт-Петербург, 25-29 июня. –2013. –С. 560-566.
- 17.Добаткин С.В., Рохлин Л.Л., Мурашкин М.Ю., Добаткина Т.В., Тарытина И.Е., Лукьянова Е.А. Структура и свойства магниевое сплава Mg-5%Y-5%Gd-0,4%Zr после сдвига под давлением // Сборник тезисов V Всероссийской конференции «НАНО 2013» 23-27 сентября, Звенигород. – 2013. – С.287-288.
- 18.Рохлин Л.Л., Лукьянова Е.А., Добаткина Т.В. Механические свойства сплавов Mg-Y-Gd-Zr и Mg-Sm-Tb-Zr в литом состоянии, полученных методом направленной кристаллизации // Тезисы IV-ой Международной научно-технической конференции «Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве», ДГМА, Краматорск, Украина. – 2013, –С. 191-192.
- 19.Рохлин Л.Л., Лукьянова Е.А., Добаткина Т.В, Королькова И.Г. Peculiarities of the physico-chemical interaction in the ternary systems of magnesium with two rare-earth metals of the different subgroups // Тезисы XII International conference on crystal chemistry of intermetallic compounds, ЛНУ им. И. Франко, Львов, Украина –2013. –Р.47.
- 20.Лукьянова Е.А., Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В. Новые исследования магниевых сплавов, с редкоземельными металлами // Доклады конференции «Современные магниевые и литейные алюминиевые сплавы», ФГУП «ВИАМ», Москва, 27 ноября. –2013.