

**АКИНИНА МАРИЯ ВЛАДИМИРОВНА**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРУЕМОГО  
МАГНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Mg-Zn-Zr-РЗЭ (Y, Nd, La)  
С ПОВЫШЕННЫМ УРОВНЕМ ПРОЧНОСТНЫХ И  
ЖАРОПРОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ)

**Научный руководитель:** **Волкова Екатерина Федоровна**  
доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ

**Официальные оппоненты:** **Бецофен Сергей Яковлевич**  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры 1101 «Технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

**Овчинников Виктор Васильевич**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение» ФГАОУ ВО «Московский Политехнический университет»

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва» (Самарский университет)

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_\_ г. в \_\_\_:\_\_\_ на заседании диссертационного совета 31.1.002.01, созданного на базе НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ, по адресу: 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17; тел.: (499) 261-86-77, факс: (499) 267-86-09, e-mail: admin@viam.ru; www.viam.ru.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, ученому секретарю диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук \_\_\_\_\_ Горбовец М.А.

© НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ, 2025.

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы

Новые конструкционные материалы являются одним из основных сегментов авиастроения, в котором в той или иной степени проявляются переломные моменты технологической эволюции сектора. Исторически развитие авиации было направлено на преодоление двух барьеров – максимальных высот и скоростей полета.

Одним из самых эффективных способов улучшить динамику полета авиационной техники остается снижение массы самой конструкции, двигателя, систем и оборудования.

Снижение массы в значительной степени может быть достигнуто за счет внедрения новых легких конструкционных материалов.

Деформируемые магниевые сплавы являются наиболее легкими металлическими конструкционными материалами, по степени прочности на единицу своего веса они превосходят некоторые легированные стали и алюминиевые сплавы. Использование конструкционных материалов на магниевой основе обеспечивает дополнительное преимущество в виде уменьшения массы и позволяет изыскивать новые способы облегчения конструкции.

Кроме того, известно, что магниевые сплавы по сравнению с другими металлическими материалами обладают такими существенными преимуществами, как: высокая удельная жесткость (при изгибе они превосходят по значениям этой характеристики стали и алюминиевые сплавы на 50 % и 20 %, соответственно), высокая удельная вибрационная прочность магниевых сплавов (с учетом демпфирующей способности значения этой характеристики почти в 100 раз больше, чем у дюралюмина, и в 20 раз больше, чем у легированной стали), способность работать в широком диапазоне температур – от криогенных (-70 °С) до высоких (+250 °С), стабильность механических свойств при длительном хранении благодаря практически полному отсутствию способности естественно стариться.

Магниевые сплавы являются весьма многообещающей альтернативой некоторым алюминиевым сплавам, которые в настоящее время широко используются в самолетостроении. Практическую значимость имеет тот факт, что масса деталей, изготовленных из магниевых сплавов, примерно на 25 % ниже, чем из алюминиевых, в связи с чем применение деформируемых магниевых сплавов в конструкциях летательных аппаратов (самолетов, вертолетов, ракет, снарядов и др.), обеспечивая снижение их массы, улучшает тем самым летно-технические характеристики (дальность и скорость полета, увеличение объема полезной нагрузки и т.д.) и повышает экологическую безопасность.

Для успешной конкуренции с алюминиевыми сплавами необходимо повысить на 10 - 15 % значения временного сопротивления и пределов текучести при растяжении и сжатии деформируемых магниевых сплавов.

В некоторых случаях условия эксплуатации деформируемых магниевых сплавов в конструкции предусматривают использование области повышенных рабочих температур (150 - 250) °С. Температурный интервал эксплуатации существующих серийных высокопрочных деформируемых магниевых сплавов ограничен 100 - 150 °С. Серийные деформируемые жаропрочные магниевые сплавы не отличаются достаточно высокими прочностными характеристиками при повышенных температурах и в то же время обладают неудовлетворительными прочностными характеристиками при комнатной температуре.

Таким образом, возникает необходимость в разработке новых деформируемых сплавов на основе магния с более высоким и стабильным уровнем свойств при повышенных температурах и сохранением хороших прочностных характеристик при нормальной температуре, а также в разработке серийных технологий их производства.

С позиции повышения уровня механических свойств при нормальной температуре наиболее перспективной системой легирования деформируемых магниевых сплавов является система Mg-Zn-Zr. Сплавы этой системы характеризуются высокой прочностью при нормальной температуре и удовлетворительной коррозионной стойкостью. Сбалансированное легирование сплавов системы Mg-Zn-Zr определенными редкоземельными элементами (РЗЭ), оказывающими

благоприятное воздействие на структуру и фазовый состав сплава, позволяет повысить их прочность при повышенных температурах, а при нормальной температуре сохранить необходимый запас пластичности.

Особого внимания заслуживает предположение о возможном проявлении синергетического эффекта при совместном легировании магния элементами иттриевой и цериевой подгрупп РЗЭ в определенных количествах. Легирование несколькими РЗЭ, относящимися к разным подгруппам, позволяет усилить эффект упрочнения твердого раствора и, как следствие, повысить прочностные характеристики магниевых сплавов.

В связи с вышеизложенным, задача создания нового поколения деформируемых высокопрочных жаропрочных магниевых сплавов, легированных РЗЭ, остается весьма актуальной.

#### **Цель и задачи исследований**

Разработка нового деформируемого магниевого сплава, легированного редкоземельными элементами (иттрием, неодимом, лантаном), обеспечивающего комплекс основных механических свойств прессованных полуфабрикатов ( $\sigma_B \geq 320$  МПа,  $\sigma_{0,2} \geq 230$  МПа,  $\delta_5 \geq 12,0$  %), интервал температуры эксплуатации изделий длительно – до 200 °С, кратковременно – до 300 °С, и научно обоснованной технологии получения прессованных полуфабрикатов из него.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Обоснование выбора легирующих элементов, входящих в состав деформируемого высокопрочного жаропрочного магниевого сплава системы Mg-Zn-Zr-РЗЭ (Y, Nd, La).

2. Исследование влияния технологических параметров выплавки слитков на структуру, фазовый состав и основные механические свойства ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta_5$ ) деформируемого высокопрочного жаропрочного магниевого сплава системы Mg-Zn-Zr-РЗЭ (Y, Nd, La) в литом состоянии.

3. Исследование влияния термической обработки (гомогенизационного отжига) на структуру, фазовый состав и основные механические свойства ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta_5$ ) деформируемого высокопрочного жаропрочного магниевого сплава системы Mg-Zn-Zr-РЗЭ (Y, Nd, La) в литом состоянии, выбор режима гомогенизационного отжига.

4. Исследование влияния технологических параметров деформации и режимов термической обработки на структуру, фазовый состав и основные механические свойства ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta_5$ ) прессованных полуфабрикатов из деформируемого высокопрочного жаропрочного магниевого сплава системы Mg-Zn-Zr-РЗЭ (Y, Nd, La).

5. Определение механических свойств прессованных полуфабрикатов из деформируемого высокопрочного жаропрочного магниевого сплава системы Mg-Zn-Zr-РЗЭ (Y, Nd, La) в интервале температур от -70 до +300 °С в рамках общей квалификации (паспортизации).

#### **Научная новизна работы**

1. Практически подтверждена возможность реализации синергетического эффекта от совместного легирования магния элементами иттриевой и цериевой подгрупп РЗЭ в установленных пределах на примере разработанного деформируемого магниевого сплава системы Mg-Zn-Zr-РЗЭ (Y, Nd, La), что выразилось в достижении высокого уровня прочностных и жаропрочных характеристик за счет формирования новых интерметаллидных фаз сложного состава.

2. Выявлены и изучены особенности влияния бесфлюсовой плавки на структуру и свойства деформируемого магниевого сплава системы Mg-Zn-Zr-РЗЭ (Y, Nd, La) в литом состоянии. Установлено, что использование защитной газовой атмосферы в процессе проведения бесфлюсовой плавки приводит к снижению содержания примесей в слитках (в 1,3 - 5 раз) и как следствие, к улучшению коррозионной стойкости сплава (практически в 5 раз), а также способствует формированию высокодисперсных интерметаллидов – цирконидов цинка и вызывает повышение прочностных свойств сплава в литом состоянии на 9 - 15 %.

3. Доказан факт зарождения самоорганизующихся упорядоченных длиннопериодных фаз (long period stacking ordered phases) – LPSO-фаз в литом состоянии и дальнейшее их

сохранение в гомогенизированном и деформированном состояниях деформируемого магниевого сплава системы Mg-Zn-Zr-P3Э (Y, Nd, La).

4. Установлено, что расположение LPSO-фаз как в объеме зерен, так и в виде блоков в многослойных фрагментах эвтектической составляющей, и равномерное распределение высокодисперсных интерметаллидных включений размером (70 - 100 нм), в том числе, частиц цирконидов цинка, в объеме зерен сплава системы Mg-Zn-Zr-P3Э (Y, Nd, La) в совокупности способствуют достижению повышенного уровня прочностных свойств прессованных полуфабрикатов в исходном состоянии в широком интервале температур ( $\sigma_B \geq 320$  МПа,  $\sigma_{0,2} \geq 230$  МПа,  $\delta_5 \geq 12,0$  %,  $\sigma_B^{-70} \geq 375$  МПа,  $\sigma_{100}^{200} = 167$  МПа,  $\sigma_{0,2/100}^{200} \geq 98$  МПа).

#### **Практическая значимость**

1. Разработан и защищен патентом RU 2554269 химический состав высокопрочного жаропрочного магниевого сплава марки ВМД16, легированного P3Э (Y, Nd, La), который обеспечивает высокий уровень прочности в широком интервале температур, а при нормальной температуре сохраняет необходимый запас пластичности прессованных полуфабрикатов ( $\sigma_B^{300} \geq 165$  МПа,  $\sigma_B \geq 320$  МПа,  $\delta_5 \geq 12,0$  %).

2. Разработаны технология изготовления и режим термической обработки (гомогенизационного отжига) слитков деформируемого высокопрочного жаропрочного магниевого сплава системы Mg-Zn-Zr-P3Э (Y, Nd, La) марки ВМД16 и выпущена технологическая рекомендация ТР 1.2.2828-2020 «Бесфлюсовая плавка и литье слитков из жаропрочного магниевого сплава марки ВМД16». Технология опробована в производстве ООО «СОМЗ».

3. Разработана технология изготовления прессованных полуфабрикатов из деформируемого высокопрочного жаропрочного магниевого сплава системы Mg-Zn-Zr-P3Э (Y, Nd, La) марки ВМД16 и выпущена технологическая инструкция ТИ 303.85.0647-13 «Полоса, пруток прессованные из магниевого сплава ВМД16. Изготовление (опытная партия)», а также технические условия ТУ 1-804-531-2013 «Прессованные полуфабрикаты (полоса, пруток) из магниевого сплава марки ВМД16». Технология опробована в производстве ПАО «КУМЗ».

4. Проведены всесторонние исследования свойств деформируемого высокопрочного жаропрочного магниевого сплава системы Mg-Zn-Zr-P3Э (Y, Nd, La). Выпущен паспорт на сплав марки ВМД16.

#### **На защиту выносятся:**

1. Обоснование выбора легирующих элементов, входящих в состав деформируемого высокопрочного жаропрочного магниевого сплава системы Mg-Zn-Zr-P3Э (Y, Nd, La).

2. Установленные особенности влияния бесфлюсовой плавки и термической обработки (гомогенизационного отжига) на структуру и основные механические свойства ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta_5$ ) деформируемого высокопрочного жаропрочного магниевого сплава системы Mg-Zn-Zr-P3Э (Y, Nd, La) в литом состоянии.

3. Установленные особенности влияния технологических параметров деформации и термической обработки (рекристаллизационного отжига) на структуру, фазовый состав и основные механические свойства ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta_5$ ) прессованных полуфабрикатов из деформируемого высокопрочного жаропрочного магниевого сплава системы Mg-Zn-Zr-P3Э (Y, Nd, La).

4. Результаты определения механических свойств прессованных полуфабрикатов из деформируемого высокопрочного жаропрочного магниевого сплава системы Mg-Zn-Zr-P3Э (Y, Nd, La) в интервале температур от -70 до +300 °С в рамках общей квалификации (паспортизации).

**Личный вклад автора** состоит в выполнении всех этапов диссертационного исследования, включающих анализ научно-технической литературы, в участии в разработке экспериментальных композиций, выборе состава деформируемого высокопрочного жаропрочного магниевого сплава системы Mg-Zn-Zr-P3Э (Y, Nd, La) и оформлении заявки на охраноспособное техническое решение (изобретение), участии в выборе технологических параметров и технологическом сопровождении выплавки слитков, разработке режима

гомогенизационного двухступенчатого отжига слитков, выборе технологических параметров изготовления прессованных полуфабрикатов (полоса, прутки), участии в разработке программы общей квалификации (паспортизации), обработке и анализе полученных экспериментальных данных, в том числе в разработке необходимой научно-технической документации, написании научных публикаций и выступлениях с докладами на научных конференциях.

#### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались на конференциях:

- Доклад «Пути повышения основных механических характеристик магниевых деформируемых сплавов» на III Всероссийской научно-технической конференции «Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники» (г. Москва, Россия, 17 июля 2017 г.)

- Доклад «Перспективы применения магниевого деформируемого LPSO-фазосодержащего сплава нового поколения в изделиях современной авиационной техники» на V Всероссийской научно-технической конференции «Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники» (г. Москва, Россия, 19 июля 2021 г.).

- Доклад «Легкие и прочные деформируемые сплавы на магниевой основе для изделий ракетно-космической отрасли» на XXII Научно-технической конференции учёных и специалистов (г. Королёв, Россия, 13 – 17 сентября 2021 г.).

#### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 8 работ, в том числе 3 статьи в журналах из перечня ВАК РФ, 1 статья в издании, индексируемом базами Web of Science и Scopus, 3 доклада в сборниках трудов конференций и 1 патент на изобретение.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы, благодарности. Содержит 164 страницы машинописного текста, в том числе 64 рисунка и 20 таблиц. Список литературы включает 174 наименования.

### **Основное содержание работы**

**Во введении** представлено обоснование актуальности работы, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту, личный вклад автора и апробация работы.

**В первой главе** на основе литературного обзора научных публикаций изложены теоретические основы создания высокопрочных и жаропрочных деформируемых магниевых сплавов. Представлен обзор серийных высокопрочных и жаропрочных деформируемых магниевых сплавов. Рассмотрены закономерности строения двойных и многокомпонентных диаграмм состояния магния с различными легирующими элементами. Проанализировано влияние различных элементов, включая PЗЭ, на структуру и свойства магния, показана целесообразность использования системы Mg-Zn-Zr в качестве исходной системы легирования при дополнительном легировании Y, Nd, La. На основе проведенного обзора сформулированы цель и задачи настоящей работы.

**Во второй главе** приведено описание объектов и методов исследования. В качестве объектов исследования использовали слитки, прессованные полуфабрикаты (прутки, полосы) из деформируемого высокопрочного жаропрочного магниевого сплава системы Mg-Zn-Zr-PЗЭ (Y, Nd, La), а также прессованные прутки из сплавов экспериментальных составов, легированных Y, Zn, Zr, La, Nd.

В работе применяли методы оптической, электронной (растровой, просвечивающей) микроскопии, рентгенофазового анализа, исследований технологических, механических, жаропрочных и физических свойств деформируемого высокопрочного жаропрочного магниевого сплава системы Mg-Zn-Zr-PЗЭ (Y, Nd, La). Химический состав определялся атомно-абсорбционным и атомно-эмиссионным методами химического анализа.

**В третьей главе** в соответствии с поставленной целью в лабораторных условиях было изучено влияние легирующих элементов на основные механические свойства сплавов магния в горячепрессованном состоянии.

Исходя из результатов анализа литературных данных, для исследования были намечены следующие интервалы легирования выбранных элементов, мас. %: (0,1-3,0) Zn, (0,05-1,0) Zr, (0,5-12,0) Y, (0,05-2,5) Nd, (0,05-2,5) La.

По результатам испытаний основных механических свойств прессованных прутков диаметром 20 мм построены графические зависимости состав – свойство (рисунок 1).

С увеличением содержания иттрия отмечается эффективное повышение прочностных характеристик при одновременном снижении пластичности (рисунок 1 а).

Как видно из графика (рисунок 1 а), для получения благоприятного сочетания прочностных и пластических свойств сплава, следует ограничить интервал легирования по иттрию в диапазоне от 5 до 9 мас. %.

Двойные сплавы, содержащие итрий в этих пределах, в горячепрессованном состоянии обладают следующими механическими свойствами:  $\sigma_B = (250 - 350)$  МПа,  $\sigma_{0,2} = (175 - 250)$  МПа,  $\delta = (17 - 12)$  % (рисунок 1 а).

Изучение механических свойств прутков сплава состава в мас. %: Mg-(7,2-8,3) Y при содержании до 3 мас. % Zn (рисунок 1 б) показало, что в исследованном интервале легирования цинк способствует равномерному повышению механических свойств: предел прочности возрастает с 310 до 350 МПа, предел текучести с 250 до 300 МПа. Следует отметить, что введение цинка более 2,0 мас. % вызывает падение относительного удлинения с 11,5 до 6 %.

Цирконий оказывает модифицирующее и упрочняющее воздействие. Увеличение содержания циркония от 0,05 до 1,0 мас. % в сплаве состава в мас. %: Mg-(7,2-8,3) Y-(1,9-2,1) Zn приводит к повышению пределов прочности и текучести одновременно снижая величину относительного удлинения (рисунок 1 в).

Принимая во внимание тот факт, что пластичность двойных магниевых сплавов с увеличением содержания РЗЭ цериевой подгруппы (La, Nd и т.д.) снижается, а при концентрации их более 4 % относительное удлинение становится менее 2 %, легирование сплава неодимом и лантаном было ограничено интервалом от 0,05 до 2,5 мас. %.

Изучение механических свойств прутков сплава состава в мас. %: Mg-(7,2-8,3) Y-(1,9-2,1) Zn-(0,1-0,55) Zr при содержании неодима в интервале от 0,05 до 2,5 мас. % показало, что легирование неодимом приводит к равномерному повышению механических свойств на ~ 10 МПа (рисунок 1 г).

Легирование сплава состава в мас. %: Mg-(7,2-8,3) Y-(1,9-2,1) Zn-(0,1-0,55) Zr-(2,1-2,5) Nd лантаном до 2,5 мас. % практически не влияет на прочностные свойства прутков, однако приводит к повышению их пластичности на ~ 10 % (рисунок 1 д).

Полученные опытным путём данные о влиянии совместного легирования элементами иттриевой и цериевой подгрупп РЗЭ (иттрием, неодимом и лантаном) на основные механические свойства магниевых сплавов при нормальной температуре свидетельствуют об усилении эффекта их взаимного воздействия (явление синергетического эффекта).

Проведенные в лабораторных условиях исследования позволяют утверждать, что из всех изученных сплавов наиболее перспективным с точки зрения получения высоких прочностных свойств ( $\sigma_B \geq 320$  МПа,  $\sigma_{0,2} \geq 230$  МПа) наряду с удовлетворительной пластичностью ( $\delta \geq 12$  %) в прессованном состоянии, является магниевый сплав, содержащий в мас. %: цинк – (0,1 - 3,0); цирконий – (0,05 - 0,9); итрий – (3,5 - 9,5); неодим – (2,0 - 2,5); лантан – (0,05 - 1,5).

Химический состав вышеуказанного сплава защищен патентом RU 2554269 и сплаву присвоена марка ВМД16.

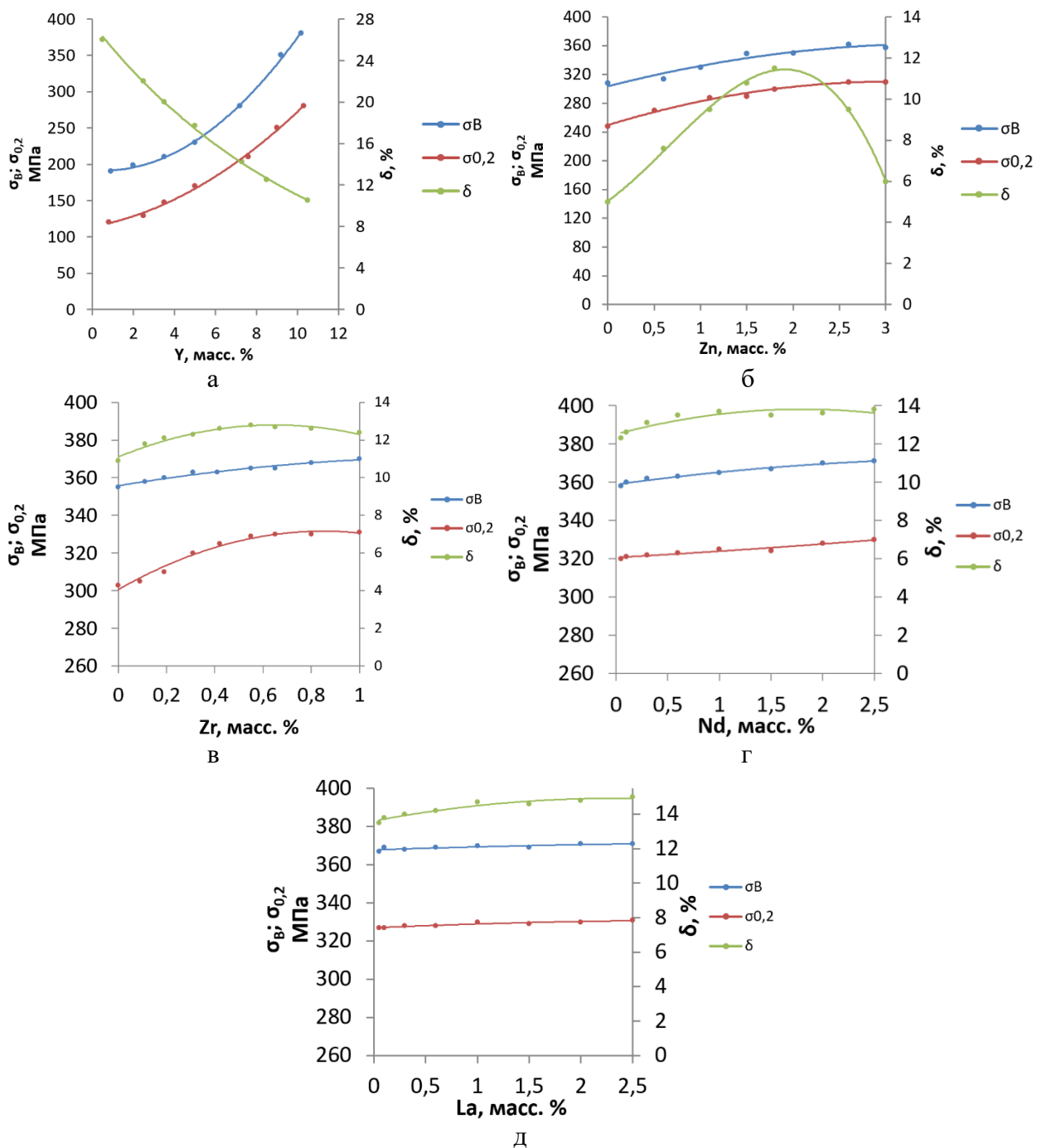


Рисунок 1 – Влияние иттрия (а), цинка (б), циркония (в), неодима (г), лантана (д) на механические свойства пресованных прутков экспериментальных составов

**В четвёртой главе** представлены результаты исследования влияния технологических параметров изготовления на структуру, фазовый состав и механические свойства слитков магниевого сплава ВМД16.

Наличие РЗЭ в качестве легирующих компонентов вносит определенные практические трудности при проведении плавки и литья магниевых сплавов. Наиболее распространенной технологией плавки с целью получения заготовительного литья из деформируемых магниевых сплавов у нас в стране остается плавка под флюсом. В качестве защитных сред в первую очередь используются жидкотекучие солевые флюсы на основе хлоридов магния и калия с различными добавками, служащими загустителями и утяжелителями. Использование флюса, содержащего в большом количестве в своём составе хлориды при приготовлении магниевых сплавов, легированных РЗЭ, приводит к неконтролируемым потерям этих элементов. Наряду с этим, возможно попадание



флюсовых включений в тело слитка при разливке расплава. Наличие хлористых флюсовых включений на поверхности слитков вызывает интенсивную флюсовую коррозию.

При отказе от применения флюса, в качестве наиболее надежного и эффективного способа защиты магниевого расплава от окисления следует рассматривать процесс проведения плавки с использованием защитной атмосферы (как правило, при использовании смесей различных инертных и активных газов).

Существенное отрицательное влияние на коррозионную стойкость магниевого сплава оказывают примесные элементы, такие как, Fe, Ni, Cu. В таблице 1 приведены результаты химического анализа по содержанию примесей в слитке в зависимости от условий проведения плавки.

Таблица 1 – Результаты химического анализа содержания примесей в слитках сплава ВМД16

№ образца	Условия проведения плавки	Содержание примесей, мас. %				
		Fe	Si	Cu	Ni	Be
1	Плавка под флюсом (ВИ-2)	0,018	0,005	0,003	0,004	0,0005
2	Плавка в защитной атмосфере (Ar + SF <sub>6</sub> )	0,004	<0,001	0,002	0,003	0,0001
3	Плавка в защитной атмосфере (Ar + Хладон 12)	0,011	<0,001	0,002	0,002	0,0002
4	Плавка в защитной атмосфере (He + SF <sub>6</sub> )	0,011	<0,001	0,002	0,001	0,0001

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что плавка с применением выбранных защитных атмосфер позволяет значительно снизить наличие вредных примесей в слитках сплава ВМД16 по сравнению со слитками, изготовленными по технологии с использованием флюса. Так, содержание наиболее вредной примеси – Fe снижается в 4,5 раза; примесных элементов Si, Cu, Ni, Be – в 1,3 - 5 раз (таблица 1).

Исследование на растровом электронном микроскопе (РЭМ) позволило подтвердить, что характер микроструктуры в образцах №№ 1 - 4 практически идентичен. Выявлено содержание двух основных групп структурных составляющих: α - твердый раствор на основе магния в теле зерна и группа эвтектических составляющих, представленных выделениями интерметаллидных фаз на основе магния, цинка, лантана и неодима, а также на основе магния с иттрием и цинком по границам зерен (рисунок 2).

Показано, что проведение плавки с использованием флюса или различных защитных сред оказывает незначительное влияние на размер зерна сплава в литом состоянии. Однако следует отметить, что несколько более крупные зерна характерны для образца, изготовленного по технологии флюсовой плавки, а также для образцов №№ 2, 4 от слитков, изготовленных под смесью газов (рисунок 3 а, б, г). Наименьший размер зерна наблюдается для образца № 3 (рисунок 3 в).

При изучении тонкой структуры на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) было установлено, что для структуры всех образцов, независимо от условий проведения плавки, характерно наличие самоформирующихся тонких пластин длиннопериодных фаз – LPSO-фаз (long period stacking ordered phases), имеющих различную толщину: от 0,5 до 80 нм. Пластины LPSO-фаз на основе магния, содержащие иттрий и цинк, представляют собой чередующиеся слои с различным содержанием иттрия и цинка, располагающиеся в строго определенном порядке внутри зерен в объеме α - твердого магниевого раствора. Количество внутренних слоёв в пластинах LPSO-фаз меняется в основном от трех до пятидесяти (рисунок 4).

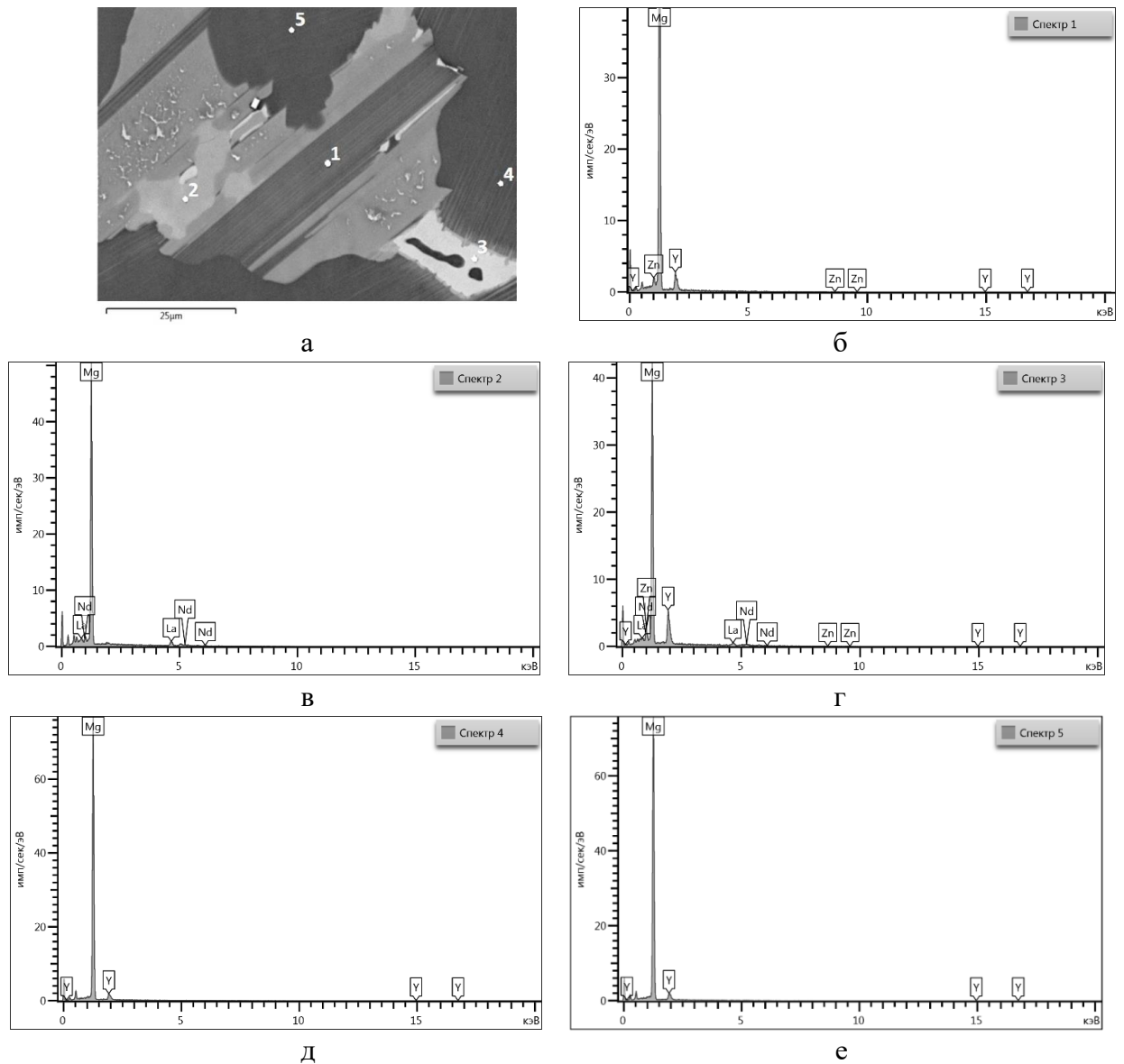


Рисунок 2 – Рентгенспектральный микроанализ (РСМА) структурных составляющих слитка сплава ВМД16 (образец № 3): а – общий вид, эвтектическая составляющая, маркер 25 мкм; точки набора спектров и соответствующие им спектрограммы качественного микроанализа структурных составляющих: б, в, г – фазы в эвтектической составляющей; д, е – основа сплава

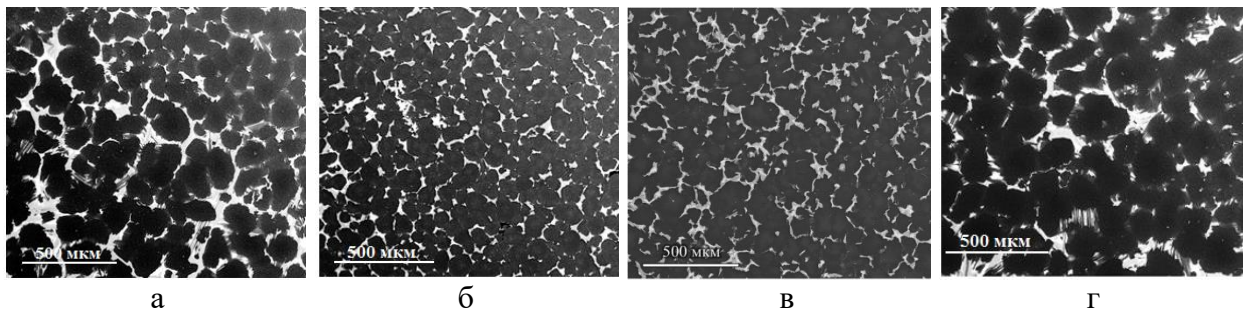


Рисунок 3 – Микроструктура магниевого сплава ВМД16 (РЭМ): а – образец № 1; б – образец № 2; в – образец № 3; г – образец № 4. Маркер 500 мкм

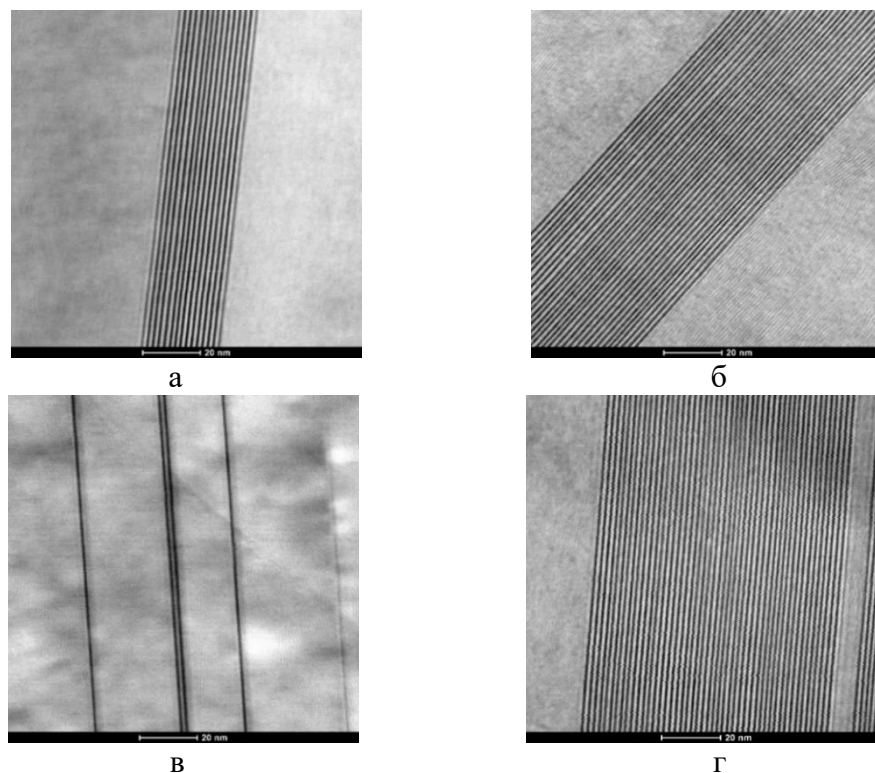


Рисунок 4 – Пластины LPSO-фаз в структуре слитков (ПЭМ), изготовленных по технологии: а – флюсовой плавки; с применением различных защитных сред: б – образец № 2; в – образец № 3; г – образец № 4. Маркер 20 нм

Как подтвердили исследования при значительном увеличении, в фазовом составе сплава, отлитого по бесфлюсовой технологии, установлено повышенное содержание высокодисперсных стержневидных цирконидов цинка ( $Zn_2Zr_3$ ,  $Zn_2Zr$ ). Эти интерметаллидные фазы выделяются как в объёме зерна, так и на межзёрнных границах (рисунок 5).

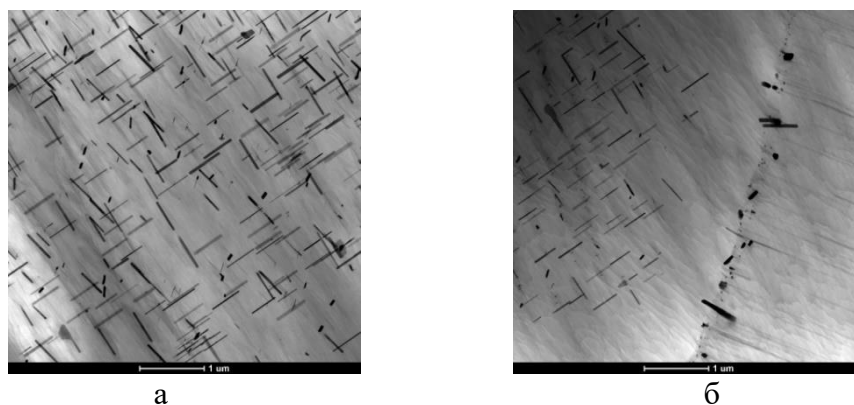


Рисунок 5 – Высокодисперсные выделения цирконидов цинка в слитке сплава ВМД16 (образец № 3, ПЭМ): а – в объёме зерна; б – на межзёрнных границах. Маркер 1 мкм

Применение защитной атмосферы в процессе проведения плавки вызывает повышение значений прочностных характеристик сплава при растяжении на 9 - 15 % (таблица 2). Скорость коррозии образцов из слитков, изготовленных с применением бесфлюсовой плавки, снижается практически в 5 раз (таблица 2).

По результатам испытания основных механических свойств слитков сплава ВМД16, изготовленных с использованием различных условий плавки, установлено, что морфологические и топологические особенности высокодисперсных цирконидов цинка оказывают определенное положительное воздействие на уровень прочностных свойств (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты испытаний на растяжение при 20 °С и определение средней скорости коррозии образцов из слитков сплава ВМД16 при различных условиях плавки

Условия проведения плавки (в соответствии с таблицей 1)	Временное сопротивление $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Относительное удлинение $\delta_5$ , %	Средняя скорость коррозии, см <sup>3</sup> /см <sup>2</sup> за 48 ч
1	$\frac{150-165}{160}$	$\frac{135-140}{135}$	$\frac{0,8-2,3}{1,9}$	10,03
2	$\frac{175-195}{185}$	$\frac{150-165}{160}$	$\frac{1,2-3,3}{2,6}$	2,00
3	$\frac{170-175}{175}$	$\frac{160-165}{160}$	$\frac{0,7-1,5}{1,2}$	2,05
4	$\frac{175-180}{175}$	$\frac{155-160}{155}$	$\frac{0,9-1,6}{1,3}$	2,34

Примечание – в числителе указаны минимальные и максимальные значения характеристик, в знаменателе – средние значения по результатам испытания пяти образцов.

По результатам проведенных исследований разработана технология бесфлюсовой плавки и литья слитков сплава ВМД16 с использованием защитной атмосферы, состоящей из смеси газов (Ar + SF<sub>6</sub>).

В промышленных условиях с применением защитной газовой атмосферы были изготовлены крупногабаритные слитки разработанного сплава ВМД16 Ø 365 мм, массой ~135 кг. Полученные слитки отличались достаточно однородным химическим составом, хорошим качеством поверхности и отсутствием ликвационных наплывов и трещин (рисунок 6).



Рисунок 6 – Слитки сплава ВМД16 Ø 365 мм, масса ~135 кг (общий вид)

Микроструктура сплава ВМД16 в литом состоянии характеризуется наличием явно выраженной эвтектики, располагающейся по границам зерен (дендритов), рисунок 7.

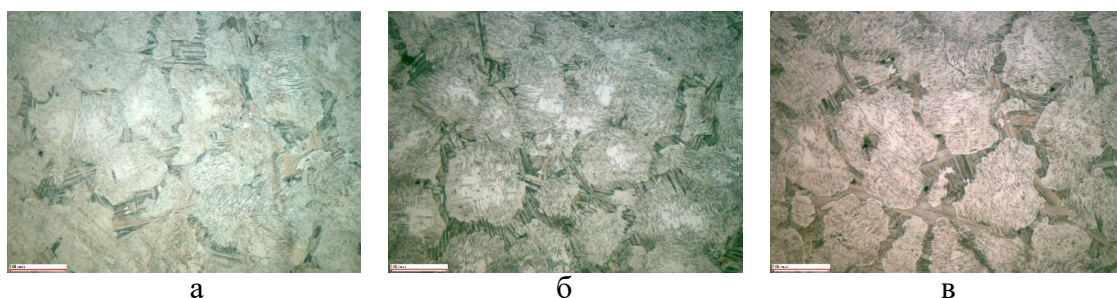


Рисунок 7 – Микроструктура сплава ВМД16 в литом состоянии, продольное направление, маркер 100 мкм (оптическая микроскопия): а – центр слитка; б – ½ радиуса слитка; в – приповерхностная зона слитка

Размеры дендритных ячеек, независимо от местоположения и направления шлифа, в достаточной степени близки между собой. Отличия составляют не более 10 - 15 % и связаны с тем, что скорость отвода тепла и, следовательно, скорость кристаллизации в поверхностных слоях слитка выше, чем в центре.

Благодаря тому, что химический состав слитков сплава ВМД16 достаточно однороден, а микроструктура сплава в соответствующих точках сечения слитка практически не имеет отличий, механические свойства сплава по длине слитка меняются незначительно: величины временного сопротивления и предела текучести в донной части

слитков на 10 - 15 МПа превышают величину аналогичных характеристик в литниковой части (рисунок 8 а, б). В таком же диапазоне находятся различия в механических свойствах по сечению слитка: прочностные характеристики возрастают по направлению от центра к периферии на ~10 МПа, относительное удлинение – на 1,5 - 2 % (рисунок 8).

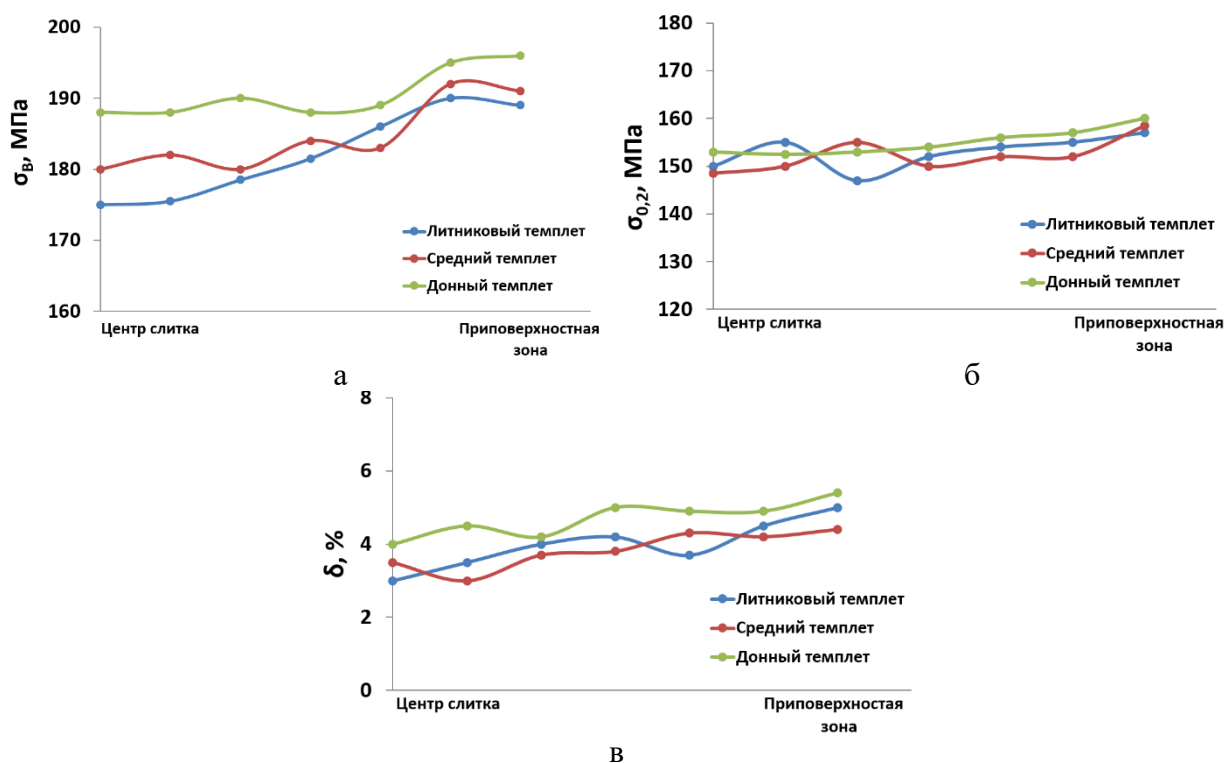


Рисунок 8 – Распределение механических свойств по длине и сечению слитка сплава ВМД16: а – временное сопротивление, МПа; б – предел текучести, МПа; в – относительное удлинение, %

С целью получения более однородной структуры, снятия внутренних напряжений и предотвращения трещинообразования и пережога был проведен двухступенчатый гомогенизационный отжиг (гомогенизация) слитков сплава ВМД16.

Температура 1-ой ступени гомогенизации была выбрана ниже температуры плавления ( $T_{пл.}$ ) наиболее легкоплавкой эвтектической составляющей сплава (в данном случае тройной эвтектики Mg-Y-Zn) в соответствии с выражением  $(0,8 - 0,95)T_{пл.}$ . Таким образом был предложен температурный интервал (390 - 425) °С (таблица 3).

Таблица 3 – Режимы 1-й ступени гомогенизации

1-я ступень гомогенизации	
Температура, °С	Время, час
390	6
	10
425	3
	8
	12

В ходе выполнения РСМА установлено, что крупные фрагменты эвтектической составляющей имеют сложный химический состав и обогащены всеми легирующими элементами: иттрием, цирконием, цинком, неодимом и лантаном в различных соотношениях. Их соотношения меняются в процессе проведения 1-й ступени гомогенизации. Одновременно происходит уменьшение объемной доли фрагментов эвтектической составляющей (рисунок 9 а, в, д) и частичное ее растворение (рисунок 9 б, г, е). Максимальный эффект наблюдается при проведении гомогенизации по режиму 425°С, 12 ч (рисунок 9 д, е).



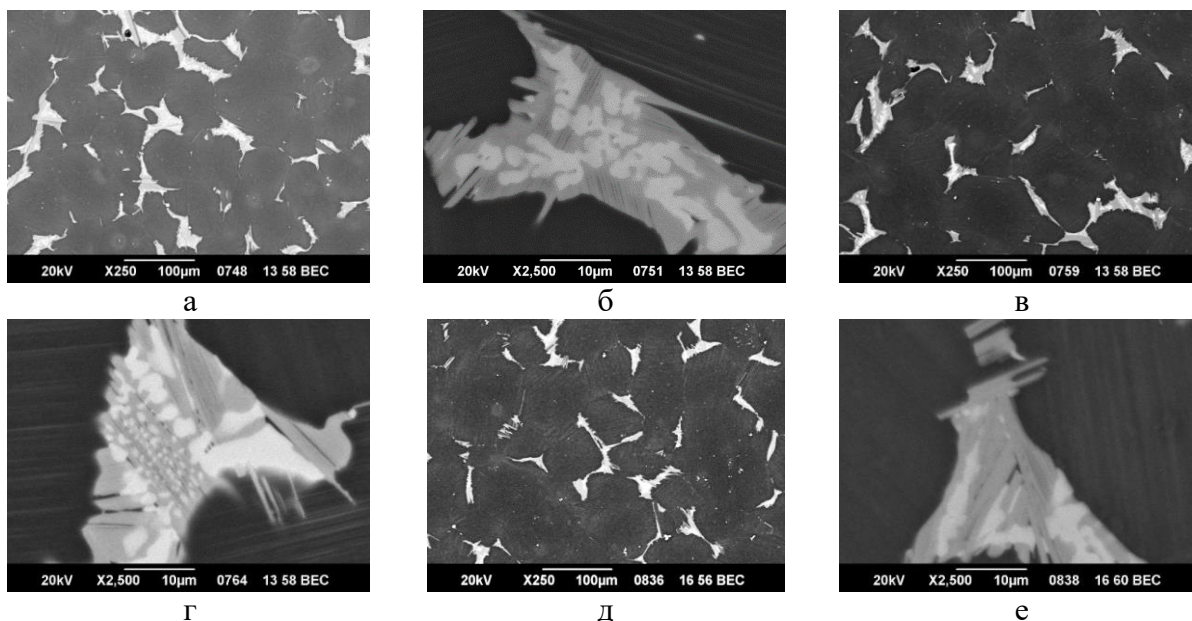


Рисунок 9 – Микроструктура сплава ВМД16 (РЭМ): а, б – литое состояние (без термической обработки); в, г – после 1-й ступени гомогенизации 390 °С, 10 ч; д, е – после 1-й ступени гомогенизации 425 °С, 12 ч; а, в, д – общий вид, маркер 100 мкм; б, г, е – эвтектическая фаза, маркер 10 мкм;

По данным РСМА и результатам исследования на просвечивающем электронном микроскопе LPSO-фазы обнаружены после всех режимов 1-й ступени гомогенизации. Они представляют собой тонкие пластины толщиной от 1,5 до 15 нм, проходящие через всё зерно (рисунок 10).

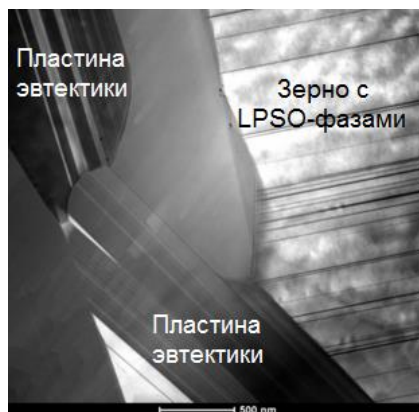


Рисунок 10 – Область фрагмента эвтектической составляющей после 1-й ступени гомогенизации (ПЭМ), маркер 500 нм

Локальный химический анализ позволяет выявить повышенное содержание легирующих элементов (цинка и иттрия) в LPSO-фазах. Изначальное количество Zn и Y в LPSO-фазе в литом образце достигает 10 ат. % и 7 ат. %, соответственно. Высокое содержание легирующих элементов в LPSO-фазе в литом состоянии может привести к снижению пластичности сплава и, как следствие, к ухудшению его способности к деформации без разрушения.

В процессе проведения гомогенизации наблюдается снижение содержания Zn и Y в LPSO-фазах.

Увеличение времени выдержки при температуре 390 °С до 10 ч вызывает снижение содержания Zn и Y в LPSO-фазах до 2,5 ат. %. Столь заметное обеднение LPSO-фаз Zn и Y нежелательно, так как может привести к понижению их термодинамической стабильности и ухудшению способности сплава к пластической деформации.

После проведения 1-й ступени гомогенизации при температуре 425 °С и увеличении времени выдержки до 12 ч столь значительного снижения содержания Zn и Y в LPSO-фазах не происходит: их содержание составляет 5 ат. % и 4 ат. %, соответственно.

Таким образом, по результатам исследования структурных изменений в сплаве в зависимости от параметров 1-й ступени гомогенизации, был выбран режим 425 °С, 12 ч.

Температура 2-й ступени гомогенизации была выбрана несколько выше температуры 1-й ступени.

Образцы, подвергнутые 1-й ступени гомогенизации по режиму 425 °С, 12 ч, затем были обработаны по различным режимам 2-й ступени гомогенизации: 1 ступень + 460 °С, 6 ч; 1 ступень + 460 °С, 12 ч; 1 ступень + 480 °С, 8 ч; 1 ступень + 480 °С, 10 ч; 1 ступень + 480 °С, 12 ч.

Микроструктура исследованных образцов сплава ВМД16 после термической обработки характеризуется наличием равноосных зёрен, по границам которых расположены фрагменты эвтектических фаз (рисунок 11 а-е). В зависимости от параметров 2-й ступени гомогенизации величина и объемная доля этих фрагментов существенно меняется (рисунок 11 б, г, е).

Как следует из сравнительного анализа представленных микроструктур 2-я ступень гомогенизации при температуре 480 °С с выдержкой 8-12 ч способствует дополнительному растворению грубых фрагментов эвтектической составляющей (рисунок 11 в, г, д, е) и обеспечивает сбалансированное содержание Zn и Y в LPSO-фазе, соответствующее их содержанию после выбранного режима 1-й ступени гомогенизации, что должно благоприятно сказаться на технологической пластичности сплава.

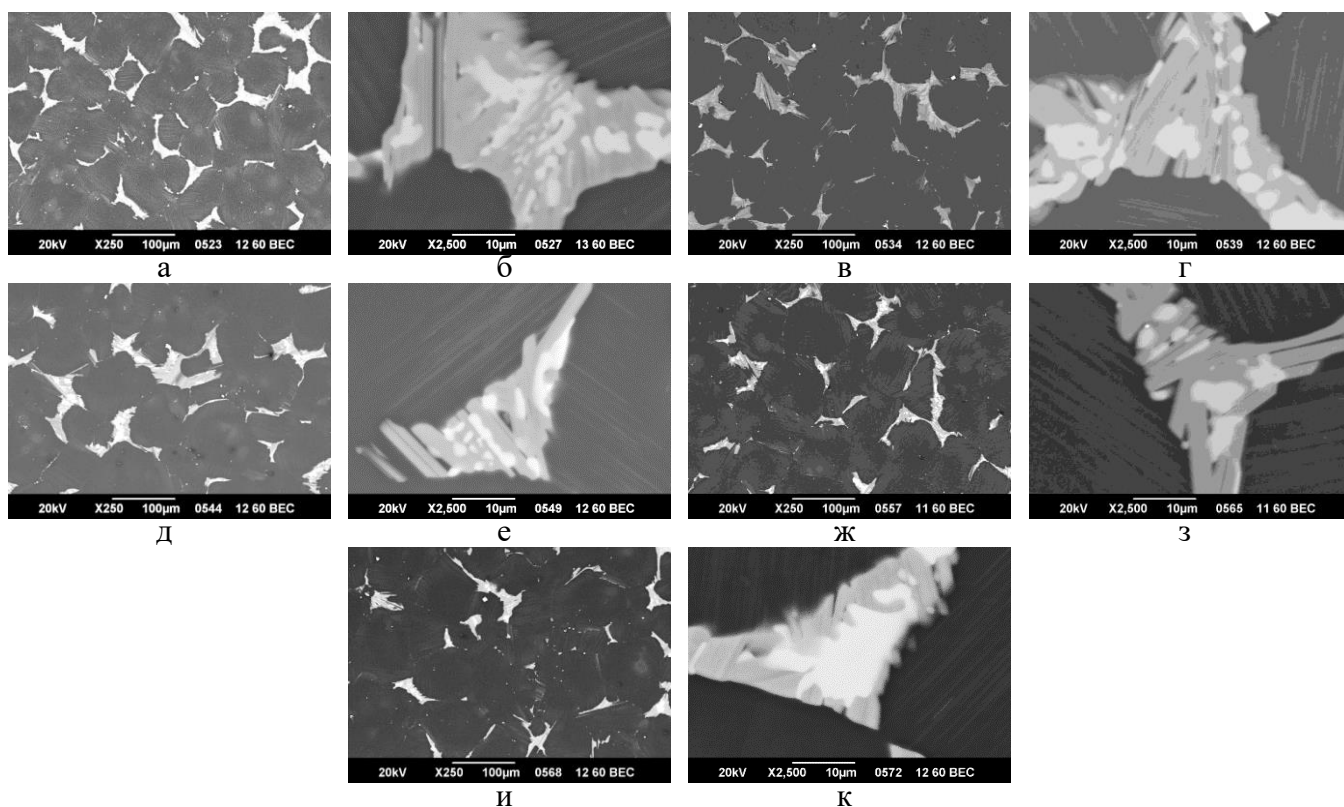


Рисунок 11 – Микроструктура сплава ВМД16 (РЭМ):

а, б – 1-я ступень гомогенизации + 460 °С, 6 ч; в, г – 1-я ступень гомогенизации + 460 °С, 12 ч; д, е – 1-я ступень гомогенизации + 480 °С, 8 ч; ж, з – 1-я ступень гомогенизации + 480 °С, 10 ч; и, к – 1-я ступень гомогенизации + 480 °С, 12 ч; а, в, д, ж, и – общий вид, маркер 100 мкм; б, г, е, з, к – эвтектическая фаза, маркер 10 мкм

На основании результатов проведенных исследований структуры и фазового состава сплава ВМД16 в литом состоянии и после различных режимов 1-й и 2-й ступеней гомогенизации, выбран режим термической обработки сплава, обеспечивающий наиболее

благоприятную морфологию фаз и соотношение в них легирующих элементов: двухступенчатая гомогенизация по режиму 425 °С, 12ч + 480 °С, (8 - 12) ч.

**В пятой главе** представлены результаты исследования влияния технологических параметров изготовления прессованных полуфабрикатов на структуру, фазовый состав и механические свойства магниевого сплава ВМД16.

Для исследования влияния температуры деформации на свойства сплава ВМД16 были проведены испытания образцов на растяжение и сжатие при повышенных температурах 400, 430, 460 °С в термообработанном состоянии (после гомогенизации) и для оценки полученных данных – в литом состоянии (без термообработки). По результатам испытаний была построена диаграмма технологической пластичности сплава (рисунок 12).

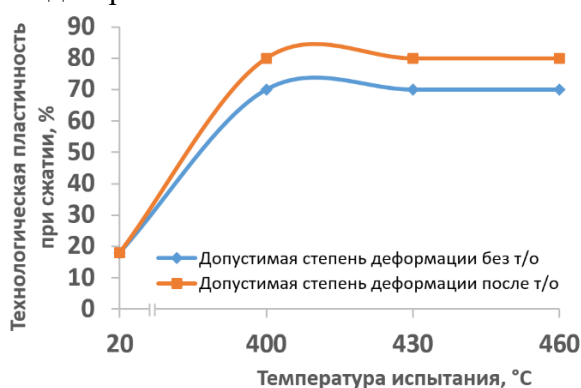


Рисунок 12 – Диаграмма технологической пластичности при сжатии сплава ВМД16 в литом и гомогенизированном состояниях

Допустимая степень деформации сплава при сжатии была установлена с учетом критической степени деформации, соответствующей появлению первой трещины на испытываемых образцах.

Как следует из анализа характера построенных графических зависимостей, сплав ВМД16 в термообработанном состоянии обладает хорошей технологической пластичностью во всем исследованном интервале повышенных температур (400 - 460 °С), допустимая степень деформации при сжатии составляет 75 - 80 %.

На основании результатов исследования технологической пластичности сплава ВМД16 были предложены температурные интервалы прессования прутков Ø 45 мм из сплава ВМД16 (таблица 4).

Таблица 4 – Температурные интервалы прессования прутков Ø 45 мм из сплава ВМД16

Температура гомогенизированной литой заготовки, °С	Температура контейнера, °С
400 - 450	370 - 420

Прессование литых заготовок проведено по пяти различным режимам (таблица 5).

Таблица 5 – Режимы прессования прутков Ø 45 мм из сплава ВМД16

№ слитка (прутка)	Температура заготовки, °С	Температура контейнера, °С	Примечание
1	400	370	Не отпрессовался
	400	380	
	405	380	Дефекты на поверхности прутка
2	410	390	Дефекты на поверхности прутка
3	415	390	Дефектов на поверхности прутков не наблюдается
4	430	410	- // -
5	450	420	- // -

Было обнаружено, что при температуре контейнера ниже 380 °С прессование с допустимой степенью деформации (75 - 80 %) невозможно.



Интервал температур предварительного нагрева 400 - 410 °С оказался недостаточным для проведения прессования литых заготовок: при температуре нагрева литой заготовки 400 °С прессование осуществить не удалось; при температурах 405 - 410 °С на поверхности отпрессованных прутков выявлены поперечные трещины (рисунок 13 а).

Гладкая поверхность без дефектов получена на прутках №№ 3, 4, 5, отпрессованных в интервале температур 415 - 450 °С (рисунок 13 б).



Рисунок 13 – Внешний вид прутков (срединная часть) из сплава ВМД16: а – пруток, отпрессованный в интервале температур 405 - 410 °С; б – пруток, отпрессованный в интервале температур 415 - 450 °С

Было установлено, что микроструктура исследованных образцов из прутков сплава ВМД16 представляет собой несколько вытянутые в продольном направлении зерна твердого раствора на основе магния и фрагменты эвтектической фазы (рисунок 14).

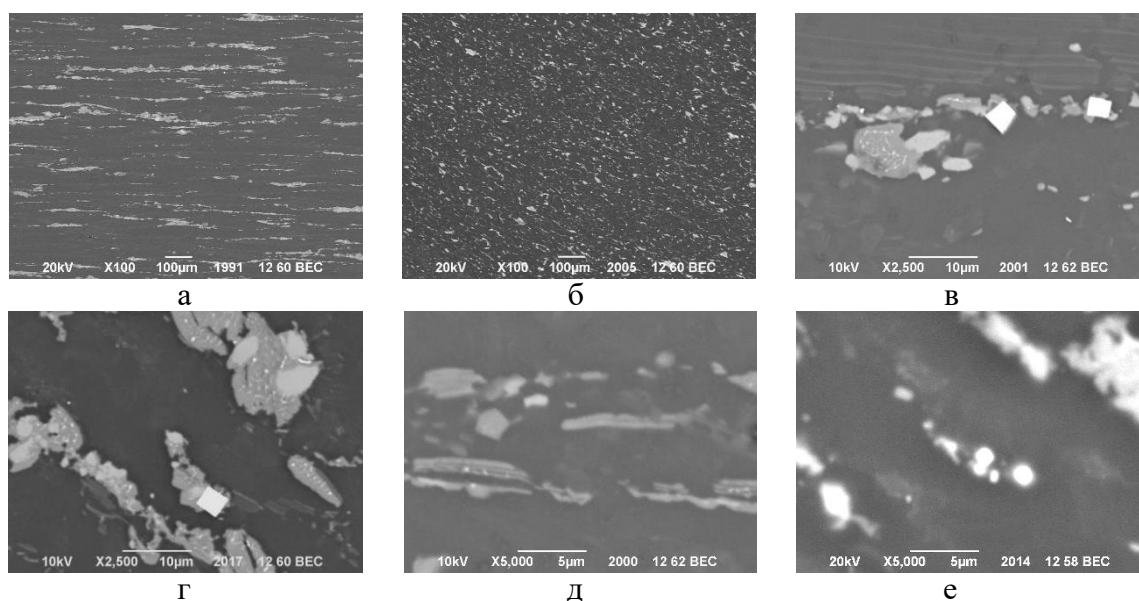


Рисунок 14 – Микроструктура прутка № 4 из сплава ВМД16 (РЭМ): а – общий вид (продольное направление); б – общий вид (поперечное направление); в – эвтектическая фаза (продольное направление); г – эвтектическая фаза (поперечное направление); д – границы зерен (продольное направление); е – границы зерен (поперечное направление); а, б – маркер 100 мкм; в, г – маркер 10 мкм; д, е – маркер 5 мкм

Существенных различий в микроструктуре образцов сплава ВМД16, полученных при различных режимах прессования, не выявлено.

Анализ дифракционных спектров в процессе исследования образцов методом рентгеновского фазового анализа (РФА) подтвердил, что для всех образцов основной фазой является твердый раствор  $\alpha$ -Mg с ГПУ решеткой, а дополнительными фазами являются  $Mg_{12}Nd$  с тетрагональной объемноцентрированной (ОЦК) решеткой и  $Mg_{12}ZnY$  (LPSO-фаза) (рисунок 15).

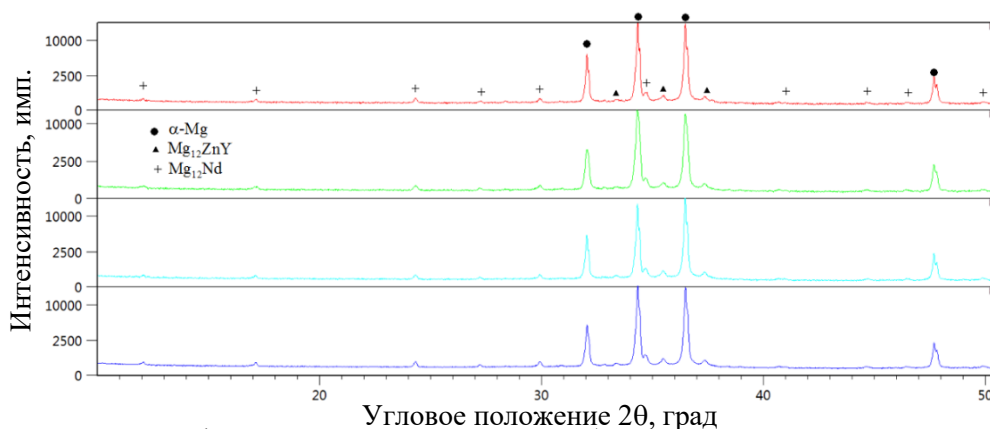


Рисунок 15 – Дифракционные спектры для образцов с продольного направления

При исследовании структуры методом ПЭМ было обнаружено, что в объёме зёрен твёрдого раствора магния всех исследованных образцов располагаются пластины LPSO-фаз. Во всех исследованных образцах LPSO-фазы состоят из одного или нескольких периодических слоёв. Суммарная толщина отдельных пластин меняется от 2 до 4 нм в зависимости от количества слоёв. В образце от прутка № 4 наблюдаются пластины LPSO-фаз с большей толщиной (до 8 нм), содержащие по четыре периодических слоя, в отличие от образцов из других прутков с меньшим содержанием слоев (рисунок 16 а, б). Такое отличие в формировании LPSO-фаз для образца из прутка № 4 должно оказать положительное влияние на уровень его механических свойств ввиду того, что каждый слой LPSO-фаз действует как барьер для движения дислокаций.

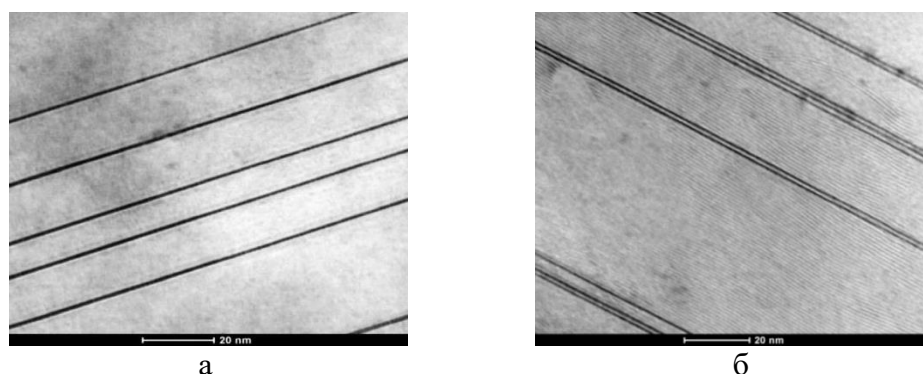


Рисунок 16 – Пластины LPSO-фазы в прутках из сплава ВМД16 (ПЭМ), маркер 20 нм: а – образец из прутка № 3; б – образец из прутка № 4

Определены основные механические свойства прутков Ø 45 мм из сплава ВМД16 (таблица 6) при нормальной температуре.

Таблица 6 – Механические свойства прессованных прутков Ø 45 мм из сплава ВМД16 после различных режимов деформации

Режим деформации (номер прутка)	Временное сопротивление, $\sigma_B$ , МПа	Условный предел текучести, $\sigma_{0,2}$ , МПа	Относительное удлинение, $\delta_5$ , %
1	$\frac{270 - 305}{285}$	$\frac{195 - 210}{200}$	$\frac{5,9 - 6,1}{6,0}$
2	$\frac{275 - 320}{295}$	$\frac{205 - 260}{225}$	$\frac{6,1 - 7,7}{6,9}$
3	$\frac{305 - 315}{310}$	$\frac{215 - 260}{230}$	$\frac{4,1 - 7,3}{5,3}$
4	$\frac{330 - 335}{330}$	$\frac{250 - 265}{250}$	$\frac{12,5 - 14,5}{13,0}$
5	$\frac{320 - 325}{320}$	$\frac{250 - 255}{250}$	$\frac{12,0 - 12,5}{12,5}$

Примечание: В числителе указаны минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние значения по результатам испытания пяти образцов.

Анализ результатов испытания механических свойств прессованных прутков Ø 45 мм, изготовленных по различным режимам деформации, свидетельствует о том, что наиболее высокий и стабильный уровень свойств получен на прутке № 4.

По результатам исследований выбраны температурные интервалы деформации (температура литой заготовки 415 - 450 °С, температура контейнера 390 - 420 °С), обеспечивающие получение прессованных прутков Ø 45 мм из сплава ВМД16 с гладкой качественной поверхностью и стабильным уровнем механических свойств при оптимальном соотношении прочностных характеристик и показателя пластичности:  $\sigma_B = 320 - 335$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 250 - 265$  МПа,  $\delta_5 = 12,0 - 14,5$  %.

Был проведен рекристаллизационный отжиг прутков Ø 45 мм из сплава ВМД16 по режимам: 300 °С – 1 час; 350 °С – 1 час; 400 °С – 1 час. Влияние термической обработки оценивалось путем проведения сравнительного анализа микроструктуры, а также по результатам испытаний механических свойств при растяжении при нормальной температуре.

Повышение температуры отжига прессованных прутков с 300 до 400 °С сопровождается энергичными диффузионными процессами. При этом отмечается рост среднего диаметра зерна с 7,9 мкм (отжиг 300 °С – 1 час) (рисунок 17 а, б) до 12,4 мкм (отжиг 400 °С – 1 час) (рисунок 17 д, е).

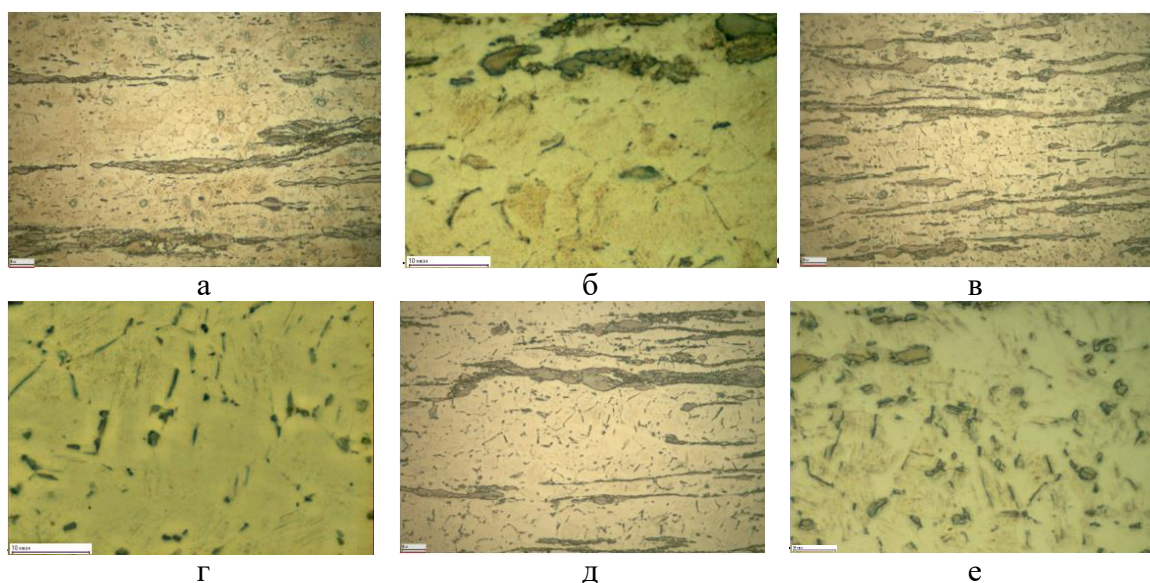


Рисунок 17 – Микроструктура прессованного прутка Ø 45 мм из сплава ВМД16 после рекристаллизационного отжига, продольное направление: а, б – 300 °С, 1 час; в, г – 350 °С, 1 час; д, е – 400 °С, 1 час. Маркер 10 мкм. Оптическая микроскопия

Высокотемпературный отжиг 400 °С – 1 час приводит к заметной коагуляции фазовых выделений и некоторому огрублению всей структуры. Наряду с укрупнением частиц упрочняющих фаз это может способствовать снижению уровня и стабильности прочностных свойств.

Данные микроисследований согласуются с результатами испытания механических свойств. По результатам испытаний механических свойств прессованных прутков построены графики (рисунок 18). Как и следовало ожидать, температура отжига 300 °С, не снижает прочностных свойств сплава. Однако с целью повышения значений характеристик пластичности сплава, желательно применение более высокотемпературного отжига.

Заметное разупрочнение имеет место при температуре отжига свыше 400 °С (рисунок 18). Повышение температуры отжига свыше 400 °С приводит к интенсификации процессов рекристаллизации, в силу чего весьма активно начинает протекать собирательная рекристаллизация. Это влечет за собой появление разнотерности в структуре сплава и существенное снижение временного сопротивления и предела текучести (рисунок 18).

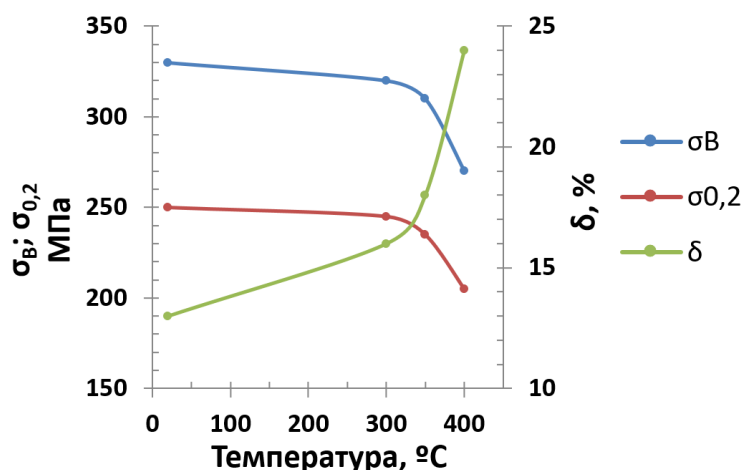


Рисунок 18 – Механические свойства прессованного прутка Ø 45 мм после рекристаллизационного отжига по режимам: 300 °С – 1 час; 350 °С – 1 час; 400 °С – 1 час

Отжиг заметно снижает прочностные свойства сплава при одновременном увеличении относительного удлинения (рисунок 5.16). Так, если в исходном горячепрессованном состоянии прессованный прутки имеет временное сопротивление 330 МПа, предел текучести 250 МПа и относительное удлинение 13,0 %, то в отожженном состоянии временное сопротивление снижается до 320 - 270 МПа, предел текучести до 245 - 205 МПа, а относительное удлинение увеличивается до 16 - 24 % (в зависимости от режима отжига).

По результатам исследований влияния рекристаллизационного отжига на структуру и свойства прессованного прутка Ø 45 мм из сплава ВМД16 при нормальной температуре установлено, что применительно к прессованным полуфабрикатам из данного сплава проведение такого вида термической обработки нецелесообразно.

При отработке технологии изготовления прессованных полуфабрикатов (прутки Ø 60 мм, полоса сечением 16×65 мм) в промышленных условиях за основу взят технологический режим прессования прутка Ø 45 мм из сплава ВМД16.

С учетом технических возможностей промышленного оборудования и габаритов литых заготовок отработан режим прессования (таблица 7).

Таблица 7 – Режим прессования полуфабрикатов (прутки Ø 60 мм, полоса сечением 16×65 мм) из сплава ВМД16

Температура литой заготовки, °С	Температура контейнера, °С
415-450	390-420

Результаты анализа микроструктуры прессованных полуфабрикатов (прутки Ø 60 мм, полоса сечением 16×65 мм) свидетельствуют о том, что микроструктура полуфабрикатов в горячепрессованном состоянии уже является частично рекристаллизованной (рисунок 19 а, б) с высокодисперсными включениями размером (70 - 100 нм), содержащими наряду с иттрием магний, цинк и неодим (рисунок 19 в). Также в сплаве сохраняются частицы на основе циркония (циркониды цинка) (рисунок 19 г). Структуры прутка и полосы практически идентичны.

В объеме зерен обнаружено присутствие самоорганизующихся наноразмерных LPSO-фаз (рисунок 19 д).

Определены механические свойства в продольном направлении прессованных прутка Ø 60 мм и полосы сечением 16×65 мм (таблица 8). Прессованные полуфабрикаты отличаются стабильным и высоким уровнем свойств при испытаниях на растяжение при нормальной температуре.



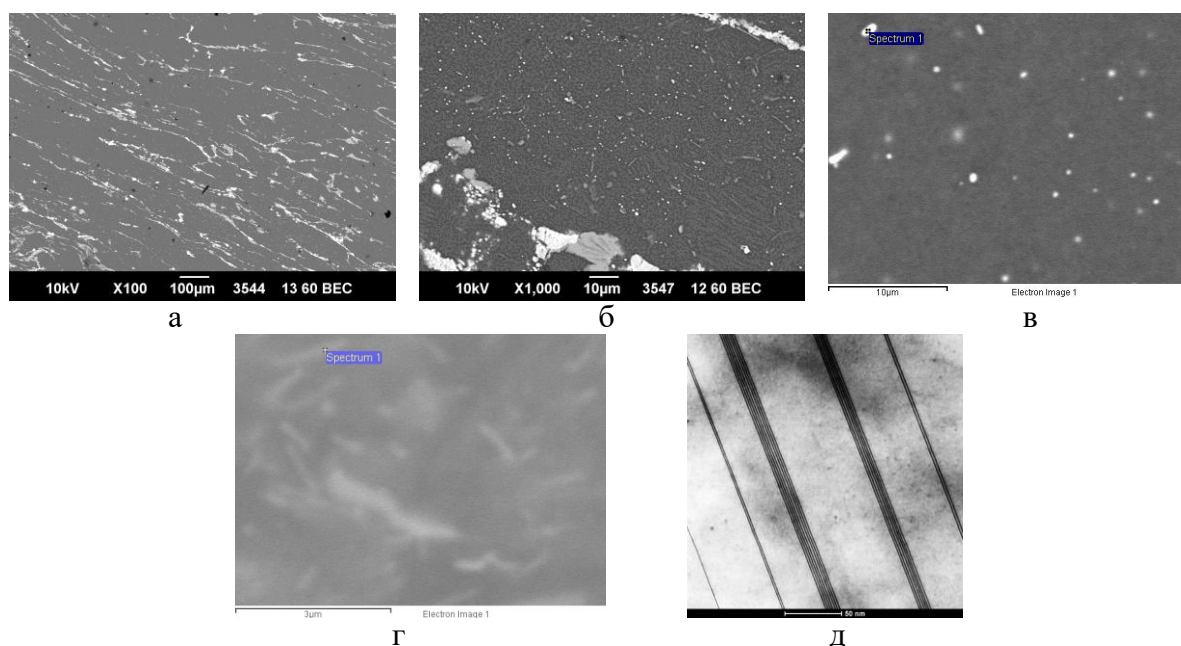


Рисунок 19 – Микроструктура прессованного прутка Ø 60 мм из сплава ВМД16 в горячедеформированном состоянии, продольное направление: а, б – общий вид, маркер 100 мкм и 10 мкм, соответственно; в – высокодисперсные включения интерметаллидов, маркер 10 мкм; г – участок с частицами цирконидов цинка, маркер 3 мкм. РЭМ. д – пластины LPSO-фаз в объеме зерна, маркер 50 нм, ПЭМ

Таблица 8 – Механические свойства в продольном направлении прессованных полуфабрикатов из сплава ВМД16 (полоса сечением 16×65 мм, пруток Ø 60 мм)

Вид п/ф	Временное сопротивление $\sigma_B$ , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Относительное удлинение $\delta_5$ , %
Полоса	$\frac{340 - 360}{350}$	$\frac{240 - 260}{255}$	$\frac{12,0 - 14,5}{14,0}$
Пруток	$\frac{355 - 360}{355}$	$\frac{280 - 290}{285}$	$\frac{13,5 - 15,5}{14,5}$

Примечание: В числителе указаны минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние значения по результатам испытания пяти образцов.

По результатам проведенных исследований разработана технология изготовления и выпущены технические условия на прессованные полуфабрикаты (полоса, пруток) из магниевого сплава ВМД16.

В связи с производственной необходимостью расширения номенклатуры прессованных полуфабрикатов из магниевого сплава ВМД16 для последующего их использования с целью изготовления из них конкретных поковок и штамповок была отработана технология изготовления прессованных прутка Ø 161 мм (рисунок 20 а) и полосы сечением 40×310 мм (рисунок 20 б) в промышленных условиях.

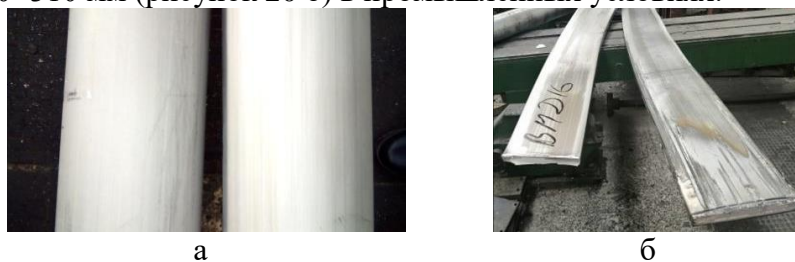


Рисунок 20 – Внешний вид прессованных полуфабрикатов из сплава ВМД16: а – прутки Ø 161 мм; б – полосы сечением 40×310 мм

Проведены исследования микроструктуры полученных прессованных полуфабрикатов (пруток Ø 161 мм, полоса сечением 40×310 мм) методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии.

Твердый раствор легирован иттрием, строчки частиц эвтектической составляющей содержат лантан и неодим (светлые частицы на фотографиях) (рисунок 21 а, б). В объеме зерен присутствуют мелкодисперсные частицы с повышенным содержанием циркония – циркониды цинка ( $Zn_2Zr_3$ ,  $Zn_2Zr$ ) (рисунок 21 в).

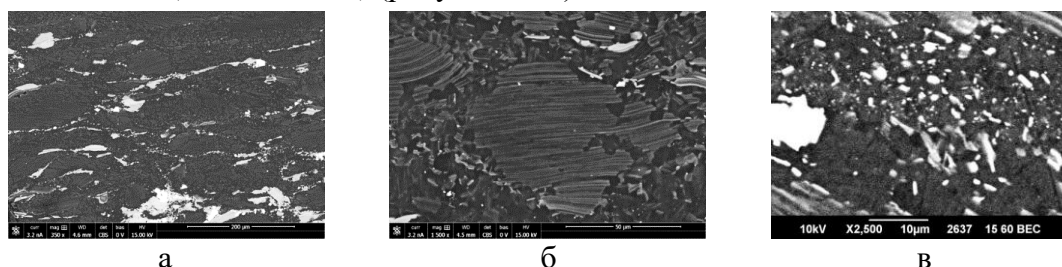


Рисунок 21 – Микроструктура прессованного прутка Ø 161 мм из сплава ВМД16 в продольном направлении (РЭМ): а – общий вид, маркер 200 мкм; б – зерна твердого раствора и эвтектика по границам зерен, маркер 50 мкм; в – частицы цирконидов цинка, маркер 10 мкм

Результаты исследования микроструктуры прессованного прутка Ø 161 мм из сплава ВМД16 на просвечивающем электронном микроскопе подтвердили наличие LPSO-фаз в структуре (рисунок 22).

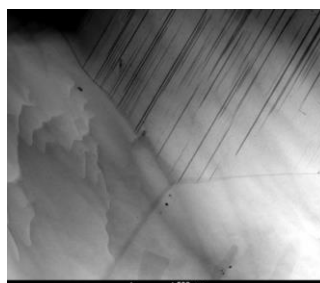


Рисунок 22 – Микроструктура прессованного прутка Ø 161 мм из сплава ВМД16 (ПЭМ): различно ориентированные зёрна с LPSO-фазами, маркер 500 нм

Определены механические свойства прессованного прутка из сплава ВМД16 (таблица 9) при нормальной температуре. Ввиду достаточно большого диаметра прессованных прутков образцы для определения механических свойств были вырезаны из центральной части и периферии двух темплетов от прутка.

Таблица 9 – Результаты испытаний механических свойств прессованного прутка Ø 161 мм из сплава ВМД16

№ темплета	Место отбора	Направление вырезки образца	Временное сопротивление $\sigma_B$ , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %
1	Периферия	Продольное	<u>320 - 325</u> 320	<u>240 - 260</u> 245	<u>13,0 - 16,0</u> 14,5
		Поперечное	<u>240 - 245</u> 240	<u>205 - 210</u> 205	<u>7,0 - 8,1</u> 7,5
	Центр	Продольное	<u>320</u> 320	<u>230 - 250</u> 240	<u>12,0 - 15,5</u> 13,5
		Поперечное	<u>230 - 245</u> 230	<u>200 - 205</u> 200	<u>5,0 - 6,1</u> 5,5
2	Периферия	Продольное	<u>320 - 325</u> 325	<u>250 - 260</u> 250	<u>14,5 - 16,0</u> 15,0
		Поперечное	<u>245</u> 245	<u>205 - 210</u> 210	<u>6,8 - 8,5</u> 7,7
	Центр	Продольное	<u>320 - 325</u> 320	<u>235 - 250</u> 245	<u>13,0 - 15,0</u> 14,0
		Поперечное	<u>235 - 245</u> 235	<u>200 - 205</u> 205	<u>6,5 - 7,9</u> 7,2

Примечание: В числителе указаны минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние значения по результатам испытания пяти образцов.

Полученные результаты (таблица 9) свидетельствуют о том, что свойства прессованных прутков Ø 161 мм из сплава ВМД16 достаточно стабильны, различия в значениях характеристик на периферии и в центре темплетов, вырезанных из прессованного прутка, мало различаются.

Микроструктура образцов из прессованной полосы сечением 40×310 мм практически идентична микроструктуре прессованного прутка Ø 161 мм из сплава ВМД16, существенных различий не выявлено.

Определены механические свойства прессованной полосы сечением 40×310 мм из сплава ВМД16 в продольном и поперечном направлениях при нормальной температуре на образцах, вырезанных из двух темплетов от полосы (таблица 10).

Таблица 10 – Результаты испытаний механических свойств прессованной полосы сечением 40×310 мм из сплава ВМД16

№ темплета	Направление вырезки образца	Временное сопротивление, $\sigma_B$ , МПа	Условный предел текучести, $\sigma_{0,2}$ , МПа	Относительное удлинение, $\delta_5$ , %
1	Продольное	$\frac{325 - 330}{325}$	$\frac{250 - 260}{255}$	$\frac{12,0 - 15,5}{13,5}$
	Поперечное	$\frac{245 - 250}{245}$	$\frac{205 - 210}{210}$	$\frac{7,3 - 8,1}{7,6}$
2	Продольное	$\frac{320 - 325}{325}$	$\frac{250 - 255}{255}$	$\frac{13,5 - 15,0}{14,0}$
	Поперечное	$\frac{240 - 245}{240}$	$\frac{205 - 210}{205}$	$\frac{6,8 - 8,5}{7,7}$

Примечание: В числителе указаны минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние значения по результатам испытания пяти образцов.

Из таблицы 10 видно, что прессованная полоса сечением 40×310 мм из сплава ВМД16 обладает стабильным и достаточно высоким уровнем механических свойств, сопоставимым с уровнем свойств прессованных прутков Ø 161 мм из сплава ВМД16.

В шестой главе представлены результаты определения свойств деформируемого высокопрочного жаропрочного магниевого сплава ВМД16 при повышенных температурах.

Значения основных характеристики прочности и жаропрочности сплава ВМД16 были проанализированы в сравнении с аналогичными значениями соответствующих характеристик прессованных полуфабрикатов из серийного деформируемого жаропрочного магниевого сплава МА12.

Преимущества разработанного сплава ВМД16 по сравнению со сплавом МА12 при кратковременных испытаниях в интервале температур от -70 до 300 °С наглядно подтверждаются представленными на рисунке 23 кривыми разупрочнения.

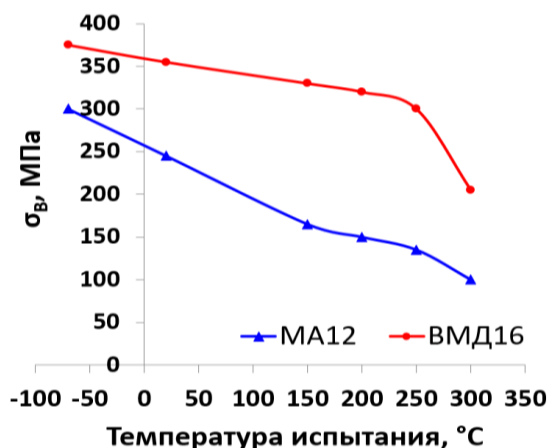


Рисунок 23 – Изменение кратковременной прочности прутков Ø 60 мм из сплавов МА12 и ВМД16 в зависимости от температуры испытания

Прочностные характеристики прутков из сплава ВМД16 во всем исследованном интервале температур в 1,25 – 2,2 раза превышают соответствующие величины для сплава МА12 (рисунок 24).

В таблицах 11 и 12 приведены результаты сравнительных испытаний на жаропрочность (определение длительной прочности и ползучести, соответственно) прессованных прутков Ø 60 мм из высокопрочного жаропрочного магниевого сплава ВМД16 и из серийного жаропрочного магниевого сплава МА12.

Таблица 11 – Результаты испытаний на длительную прочность прессованного прутка Ø 60 мм из сплава ВМД16 (минимальные значения, продольное направление)

Сплав	Состояние	Температура испытания, °С	Нагрузка, МПа	Время до разрушения, ч
ВМД16	Без т/о	150	210	100
		200	167	100
МА12	Т6 (закалка + искусственное старение)	150	167	100
		200	108	100

Таблица 12 – Результаты испытаний на ползучесть образцов из прессованного прутка Ø 60 мм из сплава ВМД16 (минимальные значения, продольное направление)

Сплав	Состояние	Температура испытания, °С	Нагрузка, МПа	Время до достижения 0,2 % остаточной деформации, ч
ВМД16	Без т/о	150	176	100
		200	98	100
МА12	Т6	150	125	100
		200	70	100

Результаты исследования влияния нагревов (10 ч) при температурах 150 и 200 °С на уровень свойств прессованных прутков Ø 60 из сплава ВМД16 подтверждают, что значения основных характеристик отличаются стабильностью (таблица 13).

Таблица 13 – Механические свойства прутка Ø 60 мм из сплава ВМД16 при нормальной температуре после воздействия нагревов при растяжении

Наименование свойства	Исходный показатель свойства	После выдержки (10 ч) при температурах нагрева, °С	
		150	200
Временное сопротивление $\sigma_b$ , МПа	<u>340 - 355</u> 350	<u>335 - 345</u> 340	<u>330 - 345</u> 335
Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	<u>245 - 290</u> 270	<u>250 - 265</u> 255	<u>240 - 265</u> 250
Относительное удлинение $\delta_5$ , %	<u>17,5 - 22,0</u> 19,5	<u>11,0 - 17,0</u> 14,0	<u>9,5-17,5</u> 13,5
Относительное сужение $\Psi$ , %	<u>24,0 - 28,0</u> 26,0	<u>10,0 - 20,0</u> 15,0	<u>15,0 - 27,5</u> 21,5

Примечание: В числителе указаны минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние значения.

Таким образом, полученные результаты испытаний свойств при повышенных температурах дают основание рекомендовать применение изделий из сплава ВМД16 длительно при температурах до 200 °С, кратковременно – до 300 °С, что на 75 °С расширяет температурный интервал эксплуатации, установленный для изделий из серийных высокопрочных деформируемых магневых сплавов.

Разработанный сплав обладает комплексом высоких прочностных свойств не только при нормальной, но и при повышенных температурах.

**В седьмой главе** представлены результаты проведения общей квалификации (паспортизации) прессованных полуфабрикатов из сплава ВМД16.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании анализа современных тенденций в области легирования деформируемых магниевых сплавов в качестве основы композиции нового деформируемого высокопрочного жаропрочного магниевого сплава выбрана система Mg-Zn-Zr при дополнительном легировании Y, Nd, La.

2. Исследовано влияние легирования элементами (Zn, Zr, Y, Nd, La) на основные механические свойства сплавов магния в горячепрессованном состоянии. Установлено, что совместное легирование одновременно РЗЭ иттриевой и цериевой подгрупп в заявленных пределах позволяет усилить эффект их взаимного воздействия (синергетический эффект) на механические свойства сплава.

3. Обоснованно выбраны диапазоны легирования и защищен патентом RU 2554269 химический состав деформируемого высокопрочного жаропрочного магниевого сплава, легированного РЗЭ (Y, Nd, La), сплаву присвоена марка ВМД16.

4. При изучении микроструктуры и фазового состава сплава ВМД16 установлено наличие фаз четырёх типов: эвтектической фазы  $(Mg,Zn)_5Y$ , интерметаллидной фазы  $Mg_{12}Nd$ , цирконидов цинка  $Zn_2Zr_3$ ,  $Zn_2Zr$ , LPSO-фаз, обеспечивающих наличие высоких прочностных свойств сплава в широком интервале температур.

Фазовый состав сплава ВМД16 стабилен при изменении содержания легирующих элементов в установленных пределах, а также при нагревах сплава под деформацию до 450 °С.

5. Обоснован выбор режима термической обработки (двухступенчатого гомогенизационного отжига) слитков сплава ВМД16: 425 °С, 12 ч + 480 °С, (8 - 12) ч; разработаны и освоены технология бесфлюсовой плавки и литья слитков сплава ВМД16 и технология изготовления прессованных полуфабрикатов (прутки Ø 60 мм, Ø 161 мм; полосы сечением 16×65 мм, 40×310 мм) в промышленных условиях, обеспечивающие получение уровня основных механических свойств:  $\sigma_B \geq 320$  МПа,  $\sigma_{0,2} \geq 235$  МПа,  $\delta_5 \geq 12,0$  %.

6. Основными преимуществами разработанного сплава ВМД16 по сравнению с применяемыми серийными деформируемыми магниевыми сплавами являются высокие значения временного сопротивления и предела текучести как при нормальной, так и при повышенных температурах (до 300 °С).

7. Исследование влияния термической обработки (отжига) на структуру и свойства прессованных полуфабрикатов из сплава ВМД16 позволило установить, что она инициирует активное развитие процессов рекристаллизации.

Повышение температуры отжига с 300 до 400 °С сопровождается энергичными диффузионными процессами. При этом отмечается рост среднего диаметра зерна с 7,9 мкм (отжиг 300 °С – 1 час) до 12,4 мкм (отжиг 400 °С – 1 час). Высокотемпературный отжиг 400 °С – 1 час приводит к заметной коагуляции фазовых выделений и некоторому огрублению всей структуры.

8. Рекристаллизационный отжиг заметно снижает прочностные свойства сплава при растяжении при одновременном увеличении относительного удлинения: временное сопротивление снижается на 3 - 18 %, предел текучести на 2 - 18 %, относительное удлинение увеличивается в 1,2 - 1,8 раза (в зависимости от режима отжига).

9. Исследование влияния термической обработки (рекристаллизационный отжиг) на структуру и свойства прессованных полуфабрикатов из сплава ВМД16 позволило установить, что применительно к прессованным полуфабрикатам из данного сплава проведение такого вида термической обработки нецелесообразно.

10. Сплав ВМД16 обладает жаропрочными свойствами: по пределу ползучести при 150 и 200 °С ( $\sigma_{0,2/100}^{150} = 176$  МПа,  $\sigma_{0,2/100}^{200} = 98$  МПа) превосходит серийный деформируемый жаропрочный магниевый сплав МА12. Изделия из сплава ВМД16 могут быть рекомендованы к длительной эксплуатации при температурах до 200 °С и кратковременной – до 300 °С.

11. Проведены всесторонние исследования механических, физических, коррозионных и технологических свойств опытно-промышленных партий прессованных полуфабрикатов из сплава ВМД16 и на основании результатов испытаний разработан и выпущен паспорт на высокопрочный жаропрочный магниевый сплав марки ВМД16.

**Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях, в изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Акинина М.В., Мостяев И.В., Волкова Е.Ф., Алиханян А.А. Сравнительные исследования структуры, особенностей фазового состава и механических свойств деформированных полуфабрикатов из магниевого сплава ВМД16 // Авиационные материалы и технологии, электрон. науч.-технич. журн. 2022. № 4 (69). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-36-50.

2. Карачевцев Ф.Н., Ерошкин С.Г., Мостяев И.В., Акинина М.В., Славин А.В. Разработка стандартных образцов состава магниевых сплавов марок ВМЛ20 и ВМД16 // Труды ВИАМ, электрон. науч.-технич. журн. 2021. № 5 (99). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI:10.18577/2307-6046-2021-0-5-39-47.

3. Волкова Е.Ф., Дуюнова В.А., Мостяев И.В., Акинина М.В. Закономерности формирования и особенности влияния тонкой структуры на свойства магниевого сплава нового поколения // Вестник концерна ВКО «АЛМАЗ – АНТЕЙ». 2020. № 1 (32). С. 55-63.

**Патент:**

1. Патент 2554269 Российская Федерация, МПК:C22C 23/04 Сплав на основе магния и изделие, выполненное из него / Каблов Е.Н., Антипов В.В., Волкова Е.Ф., Чекалин О.М., Акинина М.В.; заявитель и правообладатель ФГУП «ВИАМ» 2014107964/02 заявл. 03.03.2014; опубл. 27.06.15, бюл. № 18.

**Публикации, индексируемые базами Web of Science и Scopus:**

1. Volkova E.F., Mostyaev I.V., Akinina M.V., Alikhanyan A.A. Special features of the effect of flux-free melting on the structure and properties of magnesium alloy VMD16 in cast condition // Metal science and heat treatment. 2021. Vol. 63. № 7-8. P. 419-425.

**Другие публикации:**

1. Волкова Е.Ф., Акинина М.В., Мостяев И.В. Легкие и прочные деформируемые сплавы на магниевой основе для изделий ракетно-космической отрасли // Сборник тезисов докладов XXII Научно-технической конференции учёных и специалистов. Московская область, г. Королёв. 2021. С. 39-42.

2. Волкова Е.Ф., Акинина М.В., Мостяев И.В., Алиханян А.А., Леонов А.А. Перспективы применения магниевого деформируемого LPSO-фазосодержащего сплава нового поколения в изделиях современной авиационной техники // Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники. Материалы V Всероссийской научно-технической конференции. Москва, 2021. С. 107-124.

3. Волкова Е.Ф., Акинина М.В., Мостяев И.В. Пути повышения основных механических характеристик магниевых деформируемых сплавов // Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники. Сборник трудов III Всероссийской научно-технической конференции. 2017. С. 1.

Автореферат М.В Акининой

**«Разработка и исследование деформируемого магниевого сплава системы Mg-Zn-Zr-PЗЭ (Y, Nd, La) с повышенным уровнем прочностных и жаропрочных характеристик»**

Подписано в печать ..... 2025 г. Заказ ...

Формат бумаги 60 × 90/16. Печ. л 1.

Отпечатано в типографии НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ.  
105005, г. Москва, ул. Радио, 17.