

ДУЮНОВА ВИКТОРИЯ АЛЕКСАНДРОВНА

**НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ
ЖАРОПРОЧНЫХ ЛИТЕЙНЫХ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ НОВОГО
ПОКОЛЕНИЯ С ПОВЫШЕННОЙ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ**

2.6.1. – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

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

**Официальные
оппоненты:**

Гречников Федор Васильевич

академик РАН, профессор, доктор технических наук, научный руководитель федерального государственного бюджетного учреждения науки Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СамНЦ РАН)

Бецофен Сергей Яковлевич

доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник НИО «Технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Баннх Игорь Олегович

Член-корреспондент РАН, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией конструкционных сталей и сплавов имени академика Н.Т. Гудцова федерального государственного бюджетного учреждения науки института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН)

**Ведущая
организация**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет»

Защита состоится «02» ноября 2026 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета 31.1.002.01 при 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 научно-технической библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Автореферат разослан «__» _____ 202_ г.

Ученый секретарь,

кандидат технических наук _____ Михаил Александрович Горбовец

© НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2026.

© Дуюнова В.А., 2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Одним из ключевых направлений реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» является разработка и применение материалов пониженной плотности. К традиционным для авиационной отрасли широко распространенным в настоящее время легким конструкционным металлическим материалам можно отнести алюминиевые и титановые сплавы. Ввиду их высоких удельных характеристик они успешно применяются практически в 90-% воздушного транспортного средства при изготовлении обшивки, внутреннего набора, системе рулевого управления, элементов двигателя.

Однако повсеместное использование указанных материалов ведет к формированию ключевой проблемы современного авиастроения - переутяжелению воздушного судна, поиск решения которой должен быть направлен на использование материалов, обеспечивающих весовую эффективность при сохранении ресурса, надежности и безопасности эксплуатации.

В связи с этим при проектировании новых и модификации серийных изделий в качестве материалов все чаще начали рассматривать магниевые сплавы, повсеместно замененные в 90-ые на алюминиевые ввиду таких недостатков, как невысокая прочность и жаропрочность, коррозионная стойкость, технологические сложности при плавке, воспламеняемость.

Магниевые сплавы, по сравнению с алюминиевыми, имеют меньшую удельную массу и более высокие удельные механические характеристики. Поэтому при замене деталей из алюминиевых сплавов на выполненные из магниевых сплавов, весовая экономия достигает 25...30 %. В связи с этим, более широкое применение магниевых сплавов в качестве конструкционных материалов является крайне перспективным. Однако дальнейшее их распространение сдерживается некоторыми недостатками, а именно высокая способность магния и большинства сплавов на его основе к воспламенению, недостаточно высокие прочностные и жаропрочные характеристики, низкая температура эксплуатации, высокая склонность к коррозионным поражениям. Вследствие этого, в авиационной технике магниевые сплавы находят применение для изготовления конструктивных элементов в необитаемых отсеках и вне зон с повышенной пожарной опасностью, а также в ненагруженных или средненагруженных узлах, работающие в широком диапазоне температур – от криогенных (от минус 196 °C), до высоких (плюс 400 °C) в зависимости от системы легирования.

В течение многих лет существовал запрет на использование магниевых сплавов в пассажирских кабинах. Так например, согласно разработанному Федеральным авиационным управлением США (Federal Aviation Administration – FAA) техническому стандарту TSO C127 «Rotorcraft and Transport Airplane Seating Systems», минимальные требования, предъявляемые к авиационным креслам, должны соответствовать авиационному стандарту Международного общества автомобильных инженеров (Society of Automotive Engineers – SAE) - AS 8049 «Performance Standard for Seats in Civil Rotorcraft,

Transport Aircraft, and General Aviation Aircraft». Параграф 3.3.3 AS 8049 (редакция А) гласил: «Magnesium alloys shall not be used» – Магниевого сплавы не должны использоваться. Под магниевым сплавом подразумевается любой твердый материал в своем составе содержащий не менее 10 % магния. Таким образом, эти документы (TSO C127 и SAE AS 8049) блокировали возможность применения магниевых сплавов в конструкциях авиационных кресел. Теплота сгорания алюминия выше магния и составляет 31,087 кДж/г (для магния – 25 кДж/г). Однако обычно в условиях пожаров компактные изделия из алюминиевых сплавов только плавятся, но не воспламеняются, а большинство магниевых сплавов воспламеняются с образованием высокотемпературного очага горения с температурой более 2 500 °С. Различие в поведении при пожаре алюминия и магния объясняется различием строения кристаллической решетки оксидов этих металлов: оксид алюминия на поверхности образует плотную пленку, препятствующую контакту непрореагировавшего металла с окислителем, а оксид магния представляет собой рыхлую газопроницаемую структуру. Поэтому уменьшить способность магниевых сплавов к воспламенению возможно либо при помощи специальных покрытий, создаваемых на поверхности, либо введением в состав сплава специальных легирующих элементов (например, кальций, редкоземельные элементы).

Получение возможных весовых преимуществ в случае применения магниевых сплавов взамен алюминиевых инициировали проведение работ, как в России, так и за рубежом, в области разработки систем легирования, благоприятно влияющих как на повышение основных служебных характеристик, так и способствующих повышению порога воспламеняемости и рабочей температуры эксплуатации. Таким образом, актуальность настоящей работы определяется необходимостью разработки принципиально новых отечественных литейных магниевых сплавов, технологий их производства и термической обработки, соответствующих современным требованиям безопасности, обладающих требуемым уровнем свойств и превосходящих по минимальным значениям серийные и зарубежные сплавы-аналоги.

Работа выполнена в соответствии со стратегическими направлениями развития материалов и технологий для авиационной промышленности до 2030 года – 8.4 «Высокопрочные коррозионностойкие свариваемые магниевые и литейные алюминиевые сплавы для изделий авиакосмической техники нового поколения» и 10.10 «Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии изготовления деформированных полуфабрикатов и фасонных отливок из магниевых и алюминиевых сплавов».

Объектами исследования

В качестве объектов исследований использовались многокомпонентные литейные магниевые сплавы системы Mg-P3Э-Zr, легированные редкоземельными элементами цериевой и иттриевой подгрупп, а также цинком и цирконием: Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr; Mg-(Nd+Gd+Y+Er+Dy)-Zr; Mg-P3Э-Zr с варьированием суммарного содержания редкоземельных элементов в интервале 4-15 мас. %; экспериментальные композиции с дополнительным легированием кадмием.

Экспериментальные сплавы получали в лабораторных условиях методом индукционной плавки в стальном тигле. Масса одной плавки составляла 5 кг. Для подтверждения воспроизводимости результатов исследования и проведения комплексных испытаний использовались опытно-промышленные партии сплавов, полученные в производственных условиях.

Предметом исследования являются закономерности формирования структуры, фазового состава, механических, жаропрочных и огневых свойств высокопрочных жаропрочных литейных магниевых сплавов систем Mg-PЗЭ-Zr и Mg-(Nd+Gd+Dy+Er)-Zn-Zr-Cd в зависимости от системы легирования, параметров выплавки, режимов термической обработки и условий эксплуатационных нагревов.

Цель и задачи исследований

Целью работы является разработка научно-технологических основ разработки высокопрочных жаропрочных литейных магниевых сплавов нового поколения с повышенной пожарной безопасностью, работоспособных при температурах до 350 °С.

Для достижения указанной цели в работе необходимо было решить следующие задачи:

- определить и научно обосновать концентрационные области легирования редкоземельными элементами Y, Nd, Gd литейных высокопрочных жаропрочных магниевых сплавов с повышенной пожарной безопасностью;
- разработать технологические параметры плавки новых литейных магниевых сплавов и литья из них деталей с равномерным распределением легирующих элементов;
- разработать температурно-временные параметры термической обработки, обеспечивающие формирование в структуре литейных магниевых сплавов нанодисперсных метастабильных упрочняющих фаз;
- определить закономерности изменения свойств литейных магниевых сплавов после воздействия длительных (100, 500 и 1000 ч) эксплуатационных нагревов;
- разработать методики испытаний и определить огневые характеристики литейных магниевых сплавов нового поколения;
- провести общую квалификацию (паспортизацию) литейных магниевых сплавов нового поколения.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Научно обоснована концепция комплексного легирования новых литейных магниевых сплавов системы Mg-PЗЭ-Zr, предусматривающая целенаправленное соотношение концентраций редкоземельных элементов цериевой и иттриевой подгрупп, технологических режимов изготовления, включая термическую обработку, для управляемого формирования структурно-фазового состояния и обеспечения одновременного повышения характеристик кратковременной прочности, длительной прочности и температуры воспламенения.

2. Установлены закономерности формирования пересыщенного твердого раствора и его распада в многокомпонентных магниевых сплавах системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr в зависимости от природы редкоземельных элементов и параметров термической обработки. Показано, что элементы иттриевой подгруппы обеспечивают более выраженное твердорастворное упрочнение и формирование термостабильных интерметаллидных фаз по сравнению с элементами цериевой подгруппы.

3. Установлено, что снижение интенсивности дифракционных линий упрочняющей интерметаллидной фазы β_1 ($\text{Mg}_3(\text{Zn}, \text{PЗЭ})$) в термически обработанных литейных магниевых сплавах обусловлено переходом значительной части выделений этой фазы в наноразмерное (рентгеноаморфное) состояние. Показано, что данный параметр может использоваться как интегральный критерий оценки степени дисперсионного упрочнения магниевых сплавов.

4. Установлена последовательность распада пересыщенного твёрдого раствора в магниевом сплаве системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr с образованием комплекса метастабильных фаз $\beta_{\text{T}} \rightarrow \beta' \rightarrow \beta_1$ и пластинчатых γ' и γ'' фаз, формирующихся в объеме и по границам зерен. Экспериментально установлены ориентационные соотношения β_1 -фазы с матрицей α -Mg ($\text{ORI} \rightarrow \text{ORII}$) и механизм их эволюции при росте и изменении состава выделений этой фазы. Показана роль интерметаллидов циркония (Zr_3Zn_2 , Zr_2Zn , ZrMn_2) как центров гетерогенного зарождения β_1 -фазы, определяющих кинетику распада и формирование зон, свободных от выделений.

5. Установлено, что максимальный упрочняющий эффект литейных магниевых сплавов достигается при старении в интервале температур 220-250 °C в случае легирования с преобладанием тяжелых РЗЭ и в интервале 190-210 °C при легировании с преобладанием элементов цериевой подгруппы. Показано, что распад пересыщенного твёрдого раствора в магниевых сплавах носит диффузионно-контролируемый характер и сопровождается различной скоростью выделения интерметаллидных фаз, сдвигом температур начала выделения фаз и различной их термической стабильностью.

6. Впервые разработаны и экспериментально подтверждены математические модели прогнозирования механических характеристик при комнатной и повышенных температурах (250 и 300 °C) многокомпонентных магниевых сплавов системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr в зависимости от химического состава и соотношения редкоземельных элементов. Показано, что расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 10-15 %, позволяя использовать модели для разработки составов сплавов с заданным уровнем свойств.

7. Раскрыт механизм повышения пожаробезопасности магниевых сплавов системы Mg-РЗЭ-Zr, заключающийся в формировании термостабильных РЗЭ-содержащих фаз и модификации структуры оксидной пленкой, обеспечивающей повышение температуры воспламенения до 800 °C и выше.

8. Экспериментально доказано, что в системе легирования многокомпонентных магниевых сплавов системы Mg-(Nd+Gd+Y+Er+Dy)-Zr происходит перераспределение вкладов твердорастворного и дисперсионного механизмов упрочнения без изменения принципиального характера структурообразования.

Практическая значимость работы

Полученные в работе результаты обеспечивают создание научно-технологической базы для разработки и промышленного применения высокопрочных жаропрочных литейных магниевых сплавов нового поколения с повышенной температурой воспламенения:

1. Разработаны и опробованы в серийном производстве АО «МКБ «Факел», НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ, ПАО «Ил», ООО «ЛМЗ «АвиаЛит», литейные магниевые сплавы нового поколения систем $Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr$ и $Mg-(Nd+Gd+Y+Er+Dy)-Zr$ (ВМЛ27, ВМЛ26, ВМЛ25), обладающие повышенными по сравнению с серийными магниевыми сплавами прочностными характеристиками в 1,3 раза, жаропрочностью на 10-15 % и температурой воспламенения на 150 °С, и порошковые композиции для устранения литейных дефектов на отливках из магниевых сплавов с отношением прочности образцов с напылением к прочности основного материала не менее 0,86.

2. Разработаны технологические параметры плавки, литья и термической обработки многокомпонентных магниевых сплавов, обеспечивающие равномерное распределение редкоземельных элементов, снижение химической неоднородности и формирование мелкодисперсной структуры без образования избыточной эвтектики.

3. Разработаны методики проведения огневых испытаний литейных магниевых сплавов с повышенной температурой воспламенения, позволяющие оценивать устойчивость материала к воздействию пламени с температурой свыше 1000 °С, определять критерии самозатухания, оценивать пожаробезопасность по характеристике потери массы после воздействия пламени.

4. Выпущены патенты на разработанные высокопрочные жаропрочные литейные магниевые сплавы, порошковую композицию для газодинамического напыления на изделия из магниевых сплавов, плавку и литье магниевых-циркониевых сплавов.

5. На новые литейные высокопрочные жаропрочные магниевые сплавы с повышенной температурой воспламенения марок ВМЛ26, ВМЛ25 выпущены паспорта, которые являются квалификационными документами, содержащими полный комплекс сведений о материалах, устанавливающие возможность использования разработанных материалов в конструкциях авиационной техники и их преимущества перед ранее разработанными материалами с указанием условий и областей их применения, а также технические условия (ТУ) на эти сплавы, технологические инструкции (ТИ) и рекомендации (ТР) на плавку сплавов, литье деталей из сплавов, термическую обработку деталей, методические материалы (ММ) на проведение огневых испытаний (паспорт на сплав – 2 шт.; ТУ- 5 шт., ТР – 5 шт., ТИ – 3 шт., ММ – 3 шт.).

На защиту выносятся:

1. Разработка научно-технологических основ комплексного легирования литейных магниевых сплавов системы $Mg-P3Э-Zr$ на основе целенаправленного соотношения редкоземельных элементов (Nd, Ce, Y, Gd, Dy, Er), технологических режимов изготовления, включая термическую обработку, для управляемого формирования

структурно-фазового состояния и обеспечения одновременного повышения прочности, жаропрочности и пожаробезопасности.

2. Разработка и экспериментальная верификация математических моделей прогнозирования механических и жаропрочных характеристик многокомпонентных магниевых сплавов системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr в зависимости от их химического состава и соотношения редкоземельных элементов.

3. Механизмы повышения пожаробезопасности магниевых сплавов, основанные на формировании термостабильных РЗЭ-содержащих фаз и модификации структуры оксидной пленки, обеспечивающей повышение температуры воспламенения.

4. Разработка технологических режимов изготовления и параметров термической обработки многокомпонентных магниевых сплавов, обеспечивающих формирование дисперсной термостабильной структуры и устойчивость прочностных характеристик при эксплуатационных нагревах.

Личный вклад автора состоит в определении направлений исследований, подготовке плана проведения работ, обобщении, систематизации и анализе результатов экспериментальных исследований и испытаний, решении задач по разработке нового поколения литейных магниевых сплавов с повышенными прочностными и жаропрочными характеристиками, работоспособных при температурах до 350 °С и обладающих повышенной температурой воспламенения, равной не менее 800 °С. Автором разработаны составы исследуемых многокомпонентных сплавов, обоснованы параметры плавки, литья и режимы термической обработки.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современного аттестованного оборудования и комплекса апробированных методов исследования, а также метрологическим обеспечением применяемых экспериментальных установок. Надежность результатов подтверждается большим объемом экспериментальных данных, их воспроизводимостью и проведением статистической обработки полученных результатов. Полученные зависимости и установленные закономерности согласуются с современными представлениями о структуре, фазообразовании и механизмах упрочнения высокопрочных жаропрочных литейных магниевых сплавов, легированных редкоземельными элементами, а также не противоречат результатам отечественных и зарубежных исследований, опубликованных в научно-технической литературе.

Апробация работы

Результаты и основные положения диссертационной работы представлены на III Международном Форуме новых материалов, химии и технологий АМТЕХРО 2026 (г. Москва), Международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России» (г. Москва, 2022), III Всероссийской научно-технической конференции «Современные достижения в области создания перспективных легких сплавов и

покрытий для авиационной и космической техники» (г. Москва, 2022); V Всероссийской научно-технической конференции «Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники» (г. Москва, 2021); VII Всероссийской научно-технической конференции «Роль фундаментальных исследований при реализации стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» (г. Москва, 2021); Всероссийской научно-технической конференции «Современные достижения в области создания перспективных легких сплавов и покрытий для авиационной и космической техники» (г. Москва, 2021); V Всероссийской научно-технической конференции «Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники» (г. Москва, 2021) ; VI Всероссийской научно-технической конференции «Роль фундаментальных исследований при реализации стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» (г. Москва, 2021); Всероссийской научно-технической конференции «Металловедение и современные разработки в области технологий литья, деформации и антикоррозионной защиты легких сплавов» (г. Москва, 2019).

Публикации

Результаты работы отражены в 24 публикациях, из них 16 – в журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, и получено 6 патентов РФ, отражающих основное содержание работы.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, выводов, списка использованных источников, изложена на 319 страницах машинописного текста, включая 107 рисунков и 79 таблиц. Библиографический список включает 242 наименований.

Основное содержание работы

Во введении приводится обоснование актуальности работ, сформулированная цель и задачи работы, научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту, и апробация работы.

В первой главе представлен аналитический обзор современного состояния исследований в области литейных магниевых сплавов. Рассмотрены традиционные системы легирования магниевых сплавов, особенности их применения, а также основные проблемы, ограничивающие их широкое использование, включая недостаточную жаропрочность, склонность к воспламенению и ограниченную термическую стабильность. Значительное внимание уделено анализу жаропрочных и пожаробезопасных магниевых сплавов системы Mg-P3Э-Zr, рассмотрены механизмы влияния редкоземельных элементов на процессы фазообразования, формирование интерметаллидных фаз, упрочнение и повышение температуры воспламенения. Представлены сведения о влиянии структуры, размера зерна, дефектов кристаллической решетки и распада пересыщенных твердых растворов на комплекс механических,

жаропрочных и эксплуатационных свойств магниевых сплавов. Рассмотрены металлохимические характеристики редкоземельных элементов, закономерности формирования твердых растворов и интерметаллических соединений, а также особенности формирования термостабильных фаз, обеспечивающих повышение жаропрочности и пожаробезопасности магниевых сплавов нового поколения. Представлена структурная схема научно-технологических основ разработки высокопрочных жаропрочных литейных магниевых сплавов нового поколения с повышенной пожарной безопасностью (рисунок 1).



Рисунок 1. Структурная схема научно-технологических основ разработки высокопрочных жаропрочных литейных магниевых сплавов нового поколения с повышенной пожарной безопасностью

Во второй главе приведено описание объектов и методов исследования. В качестве объектов исследований выступали многокомпонентные литейные магниевые сплавы системы Mg-PЗЭ-Zr, легированные редкоземельными элементами цериевой и иттриевой подгрупп, а также цинком и цирконием. В работе использовались методы моделирования фазовых превращений с использованием специализированного программного комплекса, металлографических исследований (оптической, растровой, просвечивающей микроскопий, рентгеноструктурного анализа), исследований термических (дифференциальной сканирующей калориметрии), физических (твердости по ГОСТ 9013-59, температуры воспламенения), прочностных (временного сопротивления, предела текучести, относительного удлинения по ГОСТ 1497-84; кратковременной прочности при повышенных температурах по ГОСТ 9651-84),

жаропрочных (предела длительной прочности по ГОСТ 10145-81) и коррозионных характеристик (скорости коррозии по ГОСТ 9.913-90) литейных магниевых сплавов с повышенной температурой воспламенения.

В третьей главе представлены результаты исследования влияния системы легирования и режимов термической обработки на структуру, механические свойства, жаропрочность и огнестойкость высокопрочных жаропрочных литейных магниевых сплавов системы Mg-P3Э-Zr. В качестве базового сплава для разработки выбран промышленный магниевый сплав МЛ19, обладающий высоким уровнем прочностных и жаропрочных характеристик. Для повышения температуры воспламенения, прочности и термической стабильности структуры исследовано влияние легирования гадолинием, неодимом, иттрием, церием, цинком, скандием и цирконием.

На первом этапе исследований были исследованы пять экспериментальных композиций (таблица 1) сплавов системы Mg-P3Э-Zr с различными сочетаниями редкоземельных элементов и дополнительных легирующих компонентов. Проведенные исследования механических свойств показали, что наиболее высокий уровень прочностных характеристик демонстрирует состав № 1, для которого временное сопротивление разрыву составило 285-295 МПа, а предел текучести достигал 195 МПа. Установлено, что увеличение содержания редкоземельных элементов в составах № 2-4 сопровождается некоторым снижением прочности, однако приводит к увеличению пластичности до 4-5 %. Выявлено, что снижение прочностных характеристик связано с увеличением объемной доли интерметаллидных фаз системы Mg-P3Э, локализованных преимущественно по границам зерен.

Таблица 1. Шихтовой состав экспериментальных композиций пожаробезопасного литейного магниевых сплава.

Маркировка образцов	Массовая доля элементов, %							
	Mg	Сумма P3Э (Gd, Nd, Y, Ce)	Zr	Zn	Sc	Al	Mn	Cd
Состав 1	основа	не более 12	1,5	8,0	-	-	-	2,5
Состав 2	основа	не более 14	2,0	-	1,0	-	-	-
Состав 3	основа	не более 17	2,0	1,0	-	-	-	-
Состав 4	основа	не более 13	2,0	8,0	-	-	-	-
Состав 5	основа	не более 10	-	2,0	1,5	8,0	0,4	-

Установлено, что исследуемые сплавы обладают повышенной температурой воспламенения по сравнению с традиционными литейными магниевыми сплавами (таблица 2). Наиболее высокие значения температуры воспламенения получены для состава №1 и составили 747-769 °С. Показано, что повышение температуры воспламенения связано с образованием термически устойчивых интерметаллидных фаз редкоземельных элементов. Определено, что иттрий оказывает существенное влияние на стабилизацию оксидной пленки и повышение огнестойкости сплава.

Таблица 2. Горючесть экспериментальных композиций сплава

№ состава	Температура на образце при воспламенении в точке воздействия пламени, °С	Время остаточного горения, с	Потеря массы образца, %
1	747-769	≥ 900	100
2	687-784	270	25
3	703-780	360	35
4	706-745	≥ 900	100
5	629-773	≥ 900	100

Металлографические исследования показали, что структура исследуемых сплавов представлена α -твердым раствором магния и интерметаллидными фазами на основе Gd, Nd, Y, Zn и Ce, располагающимися преимущественно по границам зерен. После термической обработки наблюдается снижение объемной доли эвтектики, повышение степени растворения редкоземельных элементов в матрице и формирование мелкодисперсных интерметаллидных выделений. Установлено, что для составов №2-4 стандартный режим термической обработки Т6 не является оптимальным вследствие процессов рекристаллизации и изменения распределения фаз.

На основании полученных результатов исследованы уточненные составы (таблица 3) экспериментальных сплавов на основе наиболее перспективного состава №1. Проведенный атомно-эмиссионный анализ подтвердил высокую степень усвоения легирующих элементов и низкое содержание вредных примесей Ni, Cu и Fe, что является важным условием обеспечения пожаробезопасности магниевых сплавов.

Таблица 3. Расчетный состав экспериментальных композиций магниевого сплава (масс. %).

№ состава	Mg	Сумма РЗЭ (Gd, Nd, Y, Ce)	Zr	Zn	Sc
Состав 1	основа	Не менее 7	1,1	1,0	-
Состав 2	основа	Не менее 6	1,0	-	0,6
Состав 3	основа	Не менее 15	0,6	0,1	-
Состав 4	основа	Не менее 11	0,8	0,1	0,3
Состав 5	основа	Не менее 5	1,0	2,0	2,0

Для выбора режимов термической обработки проведены исследования методом дифференциально-термического анализа. Установлено, что для всех исследуемых сплавов отсутствуют низкотемпературные фазовые превращения до температуры около 500 °С. По результатам анализа термограмм определены предварительные температурные интервалы растворения упрочняющих фаз и выбраны два режима термической обработки: режим № 1 (закалка 520 °С – 10 часов, охлаждение в воде 80-90 °С, искусственное старение при 220 °С) и режим № 2 (Закалка 540 °С – 10 часов, охлаждение в потоке воздуха, искусственное старение при 200 °С).

Результаты механических испытаний после термической обработки показали, что наиболее высокий комплекс свойств обеспечивается для составов № 1 и № 2 после

обработки по режиму № 1. Для состава № 1 достигнуты значения временного сопротивления разрыву до 301 МПа и предела текучести до 209 МПа. Установлено, что режим ТО № 1 обеспечивает более высокий уровень прочности вследствие интенсивного охлаждения после закалки и формирования пересыщенного твердого раствора, тогда как режим ТО № 2 способствует некоторому повышению пластичности.

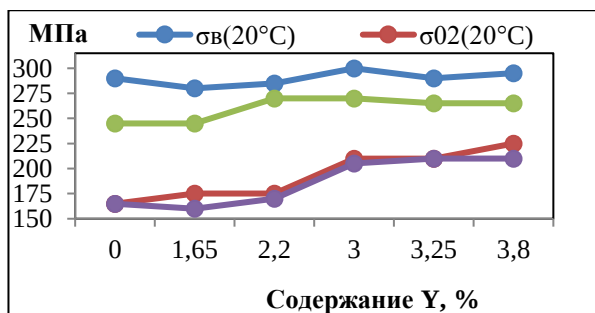
Металлографические исследования после термической обработки по режиму № 1 показали существенное измельчение зеренной структуры и более равномерное распределение дисперсных фаз. Средний размер зерна для отдельных составов снизился с 100-115 мкм в литом состоянии до 31-46 мкм после термической обработки. Установлено, что повышение прочностных характеристик связано не только с измельчением зерна, но и с особенностями фазового состава и распределением интерметаллидных фаз.

Исследования огнестойкости композиций показали, что для состава № 1 температура воспламенения существенно выше значений, характерных для традиционных литейных магниевых сплавов (для состава № 1 – 761-778 °С, для сплава МЛ19 ~ 712 °С). При этом максимальные значения температуры воспламенения достигают 748-778 °С в зависимости от состава. Установлено, что наиболее стабильные и высокие значения температуры воспламенения характерны для составов №№ 1-3.

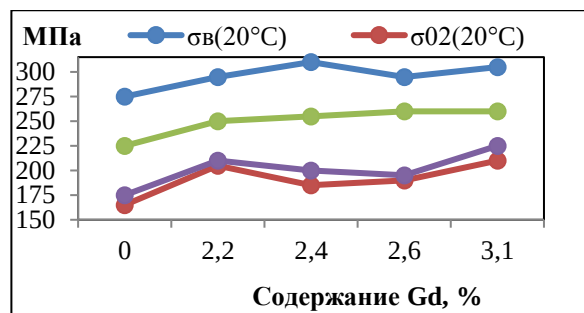
Исследования жаропрочных характеристик при температуре 250 °С показали, что состав №1 обладает наивысшей длительной прочностью среди исследованных сплавов. При напряжении 115 МПа время до разрушения превышало 140-150 часов, а при напряжении 120 МПа сохранялось на уровне 105-124 часов. Установлено, что высокая длительная прочность обусловлена формированием термостабильной структуры и равномерным распределением упрочняющих фаз, препятствующих развитию процессов ползучести при повышенных температурах.

Рассмотрены особенности влияния иттрия, неодима, гадолиния, цинка и циркония на процессы структурообразования и формирование фазового состава. Установлено, что введение иттрия способствует повышению жаропрочности и температуры воспламенения за счет формирования термостабильных интерметаллидных фаз и повышения устойчивости поверхностной оксидной пленки. Показано, что неодим оказывает влияние на процессы распада пересыщенного твердого раствора и способствует формированию дисперсных фаз, обеспечивающих повышение прочностных характеристик. Показано, что легирование гадолинием способствует повышению прочностных характеристик при комнатной и повышенных температурах, а также обеспечивает повышение термической стабильности структуры. Показано влияние содержания гадолиния на формирование интерметаллидных фаз и изменение жаропрочных характеристик.

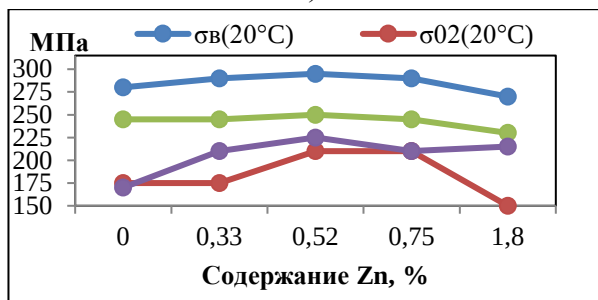
Установленные зависимости влияния указанных элементов на изменение свойств приведены на рисунке 2.



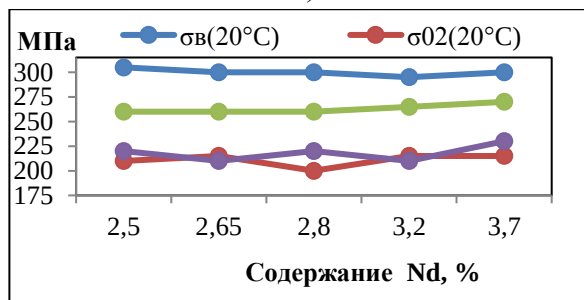
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2. Установленные зависимости влияния элементов на механические свойства экспериментальной композиции магниевого сплава: а) при легировании иттрием; б) при легировании гадолинием; в) при легировании цинком; г) при легировании неодимом

На основании результатов экспериментальных исследований разработаны линейные математические модели прогнозирования свойств исследуемых магниевых сплавов. Показано, что использование линейных зависимостей позволяет описать влияние основных легирующих элементов на изменение комплекса свойств многокомпонентных магниевых систем, однако отличаются невысокой точностью. Для повышения точности прогнозирования разработаны математические модели второго порядка, учитывающие взаимное влияние легирующих элементов на процессы структурообразования и формирование комплекса механических характеристик. После реализации симметричного ортогонального композиционного план второго порядка получены следующие уравнения регрессии для следующих зависимых переменных:

$$\text{для } \sigma_B = 296,35 + 3,79x_3 + 5,298x_4 - 3,125x_1x_4 - 2,5x_3x_4 - 2,856x_1^2;$$

$$\text{для } \sigma_{0,2} = 201,96 + 9,035x_1 + 7,04x_3 + 4,21x_4 - 3,44x_2x_4 - 4,06x_3x_4 - 3,87x_1^2 - 11,61x_4^2$$

$$\text{для } \sigma_B, \text{ при } 250^\circ\text{C} = 258,57 + 3,03x_1 + 1,982x_2 + 6,24x_3 + 2,5x_1x_2x_4 - 2,5x_2x_3x_4 + 3,234x_2^2 + 2,27x_3^2$$

$$\text{для } \sigma_B, \text{ при } 300^\circ\text{C} = 212,32 + 5,678x_1 + 6,81x_3 + 3,12x_4 + 3,75x_1x_2 - 9,375x_1x_3 - 3,75x_3x_4 - 3,925x_1^2 + 4,786x_2^2 + 5,753x_3^2,$$

где x_1 – массовая доля иттрия; x_2 – массовая доля неодима; x_3 – массовая доля гадолиния; x_4 – массовая доля цинка.

Проведен анализ моделей второго порядка. Подтверждением адекватности математических моделей служил полученные коэффициенты детерминации (R^2) и критерий Фишера.

Построенный оптимальный профиль желательности (рисунок 3) позволил выделить области в исследуемых интервалах независимых факторов с высокими значениями желательности, на основании которых выбран оптимальный состав $Y = 2,0 - 2,4\%$, $Nd = 2,2 - 2,4\%$, $Gd = 2,8 - 3,0\%$ и $Zn = 0,4 - 0,55\%$. Проведена оценка сходимости свойств, полученных по результатам моделирования, которая показала высокую сходимость результатов. Средняя относительная ошибка прогнозирования не превышает 2 %, максимальная - 4,7 %, что свидетельствует о высокой прогностической способности разработанных моделей.

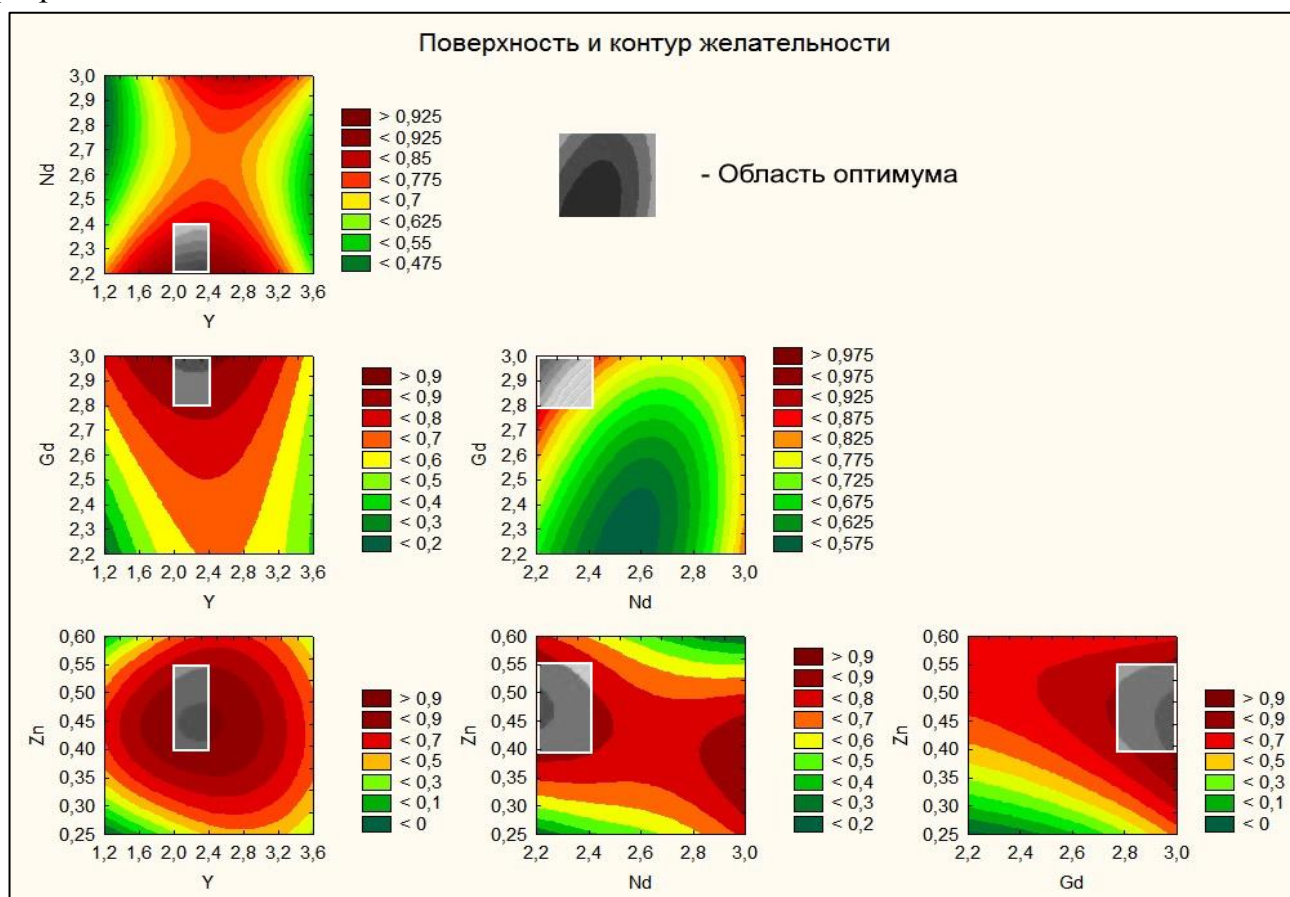


Рисунок 3. Двухмерная поверхность и контур желательности

В четвертой главе представлены результаты разработки нового высокопрочного жаропрочного литейного магниевого сплава, а также исследования влияния химического состава, параметров выплавки и режимов термической обработки на его структурно-фазовое состояние, механические и жаропрочные характеристики.

На первом этапе выполнено компьютерное моделирование термодинамических процессов фазообразования с использованием специализированного программного комплекса. В качестве исследуемого выбран оптимизированный состав системы $Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr$, получивший обозначение ВМЛ_оп. Установлено, что кристаллизация сплава протекает в температурном интервале 650-580 °С, что указывает

на широкий интервал затвердевания и потенциальную склонность к химической неоднородности в литом состоянии. Результаты моделирования позволили определить температурный интервал максимальной растворимости редкоземельных элементов и цинка (510-550 °С), что послужило основанием для предварительного выбора температур закалки в диапазоне 520-540 °С. Полученные расчетные данные хорошо согласуются с результатами дифференциально-сканирующей калориметрии и экспериментальных исследований, выполненных в главе 3.

Для получения опытных плавок разработана технология выплавки с введением легирующих элементов в зависимости от их температуры плавления. Установлено, что введение Zn и Cd должно осуществляться при пониженных температурах для предотвращения выгорания, тогда как редкоземельные элементы и цирконий вводятся при более высоких температурах для обеспечения полного растворения в расплаве. Анализ химического состава десяти опытных плавок показал высокую воспроизводимость технологии: отклонение содержания легирующих элементов не превышало $\pm 5\%$ от расчетных значений.

Металлографические исследования литого состояния показали, что структура сплава ВМЛ_оп представлена α -твердым раствором магния и эвтектикой, располагающейся преимущественно по границам зерен. Электронно-зондовый микроанализ установил наличие в эвтектических областях повышенной концентрации Gd, Nd и Zn, соответствующей интерметаллидным фазам системы Mg-PЗЭ-Zn. В объеме зерен обнаружены частицы цирконийсодержащих фаз, выполняющих роль центров кристаллизации.

Для научного обоснования режимов термической обработки проведены исследования методом дифференциально-сканирующей калориметрии. Установлено, что растворение интерметаллидных и эвтектических фаз происходит в интервале 250-560 °С и носит диффузионно-контролируемый характер. На основании анализа ДСК-кривых определены температурные интервалы закалки и старения, обеспечивающие формирование пересыщенного твердого раствора и выделение метастабильных упрочняющих фаз (таблица 4). В результате выбраны четыре режима термической обработки, включающие закалку при 520-560 °С и последующее искусственное старение при 180-220 °С.

Таблица 4. Режимы термической обработки литейного магниевого сплава ВМЛ_оп.

№ режима	Параметры термической обработки
1	Закалка 520 °С - 10 часов, охлаждение в воде 80-90 °С, искусственное старение при 220 °С - 10 часов.
2	Закалка 530 °С - 10 часов, охлаждение в потоке воздуха, искусственное старение при 200 °С - 10 часов.
3	Закалка 540 °С - 10 часов, охлаждение в воде 80-90 °С, искусственное старение при 180 °С - 10 часов.
4	Закалка 560 °С - 10 часов, охлаждение в воде 80-90 °С, искусственное старение при 220 °С - 10 часов.

Исследование влияния режимов термической обработки на структуру показало, что после закалки и старения происходит значительное измельчение зерна: средний размер зерна снижается со 108 мкм в литом состоянии до 46-67 мкм после термообработки. Одновременно существенно уменьшается объемная доля эвтектики – с ~5,1 % в литом состоянии до 1,0-1,9 % после обработки. Наиболее эффективное растворение эвтектики достигается при режимах №1 и № 4. Результаты электронно-зондового микроанализа показали, что режим № 1 обеспечивает наиболее равномерное перераспределение редкоземельных элементов между матрицей и вторичными фазами. В матрице α_{Mg} после термической обработки наблюдается повышенное содержание Gd, Nd и Y, свидетельствующее о формировании пересыщенного твердого раствора. Эвтектические участки характеризуются высоким содержанием Zn, Nd и Gd и соответствуют интерметаллидным фазам системы Mg-P3Э-Zn. Установлено, что при режимах с менее интенсивным охлаждением возрастает степень коагуляции интерметаллидов и снижается дисперсность выделений, что отрицательно влияет на уровень упрочнения.

Механические испытания показали, что максимальный уровень прочностных характеристик достигается после термообработки по режимам № 1, 3 и № 4. Для данных режимов минимальное значение временного сопротивления составило 298-300 МПа (max = 303-307 МПа), предела текучести – 164-190 МПа (max = 178-208 МПа) при относительном удлинении около 2 %. Установлено, что повышение прочности обусловлено оптимальным сочетанием степени растворения эвтектики, высокой дисперсности метастабильных выделений и их равномерного распределения в объеме зерна.

Исследования длительной прочности при температуре 250 °С показали, что наибольшую устойчивость демонстрируют образцы, обработанные по режимам № 1, № 2 и № 4. Для режима №1 время до разрушения при напряжении 120 МПа составило 124-154 часа. Высокий уровень жаропрочности обусловлен формированием термостабильной дисперсной структуры и наличием упрочняющих фаз β -типа и LPSO-фаз.

Рентгеноструктурные исследования показали, что после термической обработки увеличиваются параметры решетки α -твердого раствора магния, что говорит о растворении редкоземельных элементов в матрице и реализации механизма твердорастворного упрочнения. Одновременно наблюдается снижение интенсивности дифракционных линий интерметаллидной фазы Mg_3X , связанное с переходом части интерметаллидных выделений в наноразмерное состояние и формированием эффективной дисперсионно-упрочняющей структуры. Таким образом, эффективность термической обработки предложено количественно оценивать по двум взаимодополняющим критериям:

- по величине увеличения периодов решетки α -твердого раствора, отражающей степень твердорастворного упрочнения за счет растворения атомов гадолиния и иттрия;
- по снижению интенсивности дифракционных линий интерметаллидной фазы Mg_3X , отражающему рост доли наноразмерных (рентгеноаморфных) выделений и эффективность дисперсионного упрочнения.

Методами просвечивающей электронной микроскопии установлено, что в структуре сплава после термической обработки формируются метастабильные фазы β типа: β_T , β' , β_1 и β'' , а также LPSO-фазы (γ' и γ''). Методом HAADF-STEM установлено, что структура сплава содержит комплекс метастабильных фаз β -типа: β_T , β' , β_1 и β'' (рисунок 4). Основной вклад в формирование упрочняющей структуры вносят β_T и β' фазы.

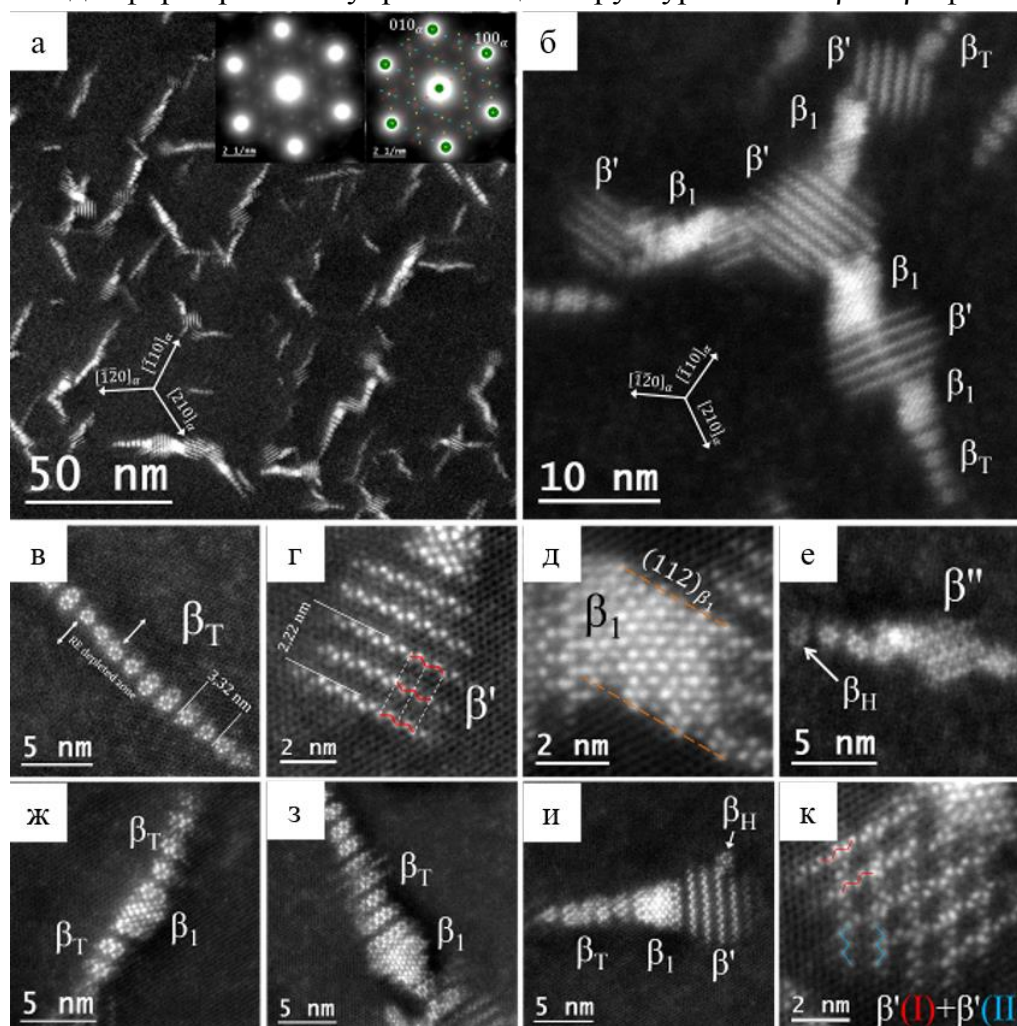


Рисунок 4. HAADF-STEM изображения метастабильных фаз β -типа в сплаве ВМЛ_оп, состаренном при температуре 220 °С в течение 10 ч. Электронный пучок параллелен $[001]\alpha$:

(а) общий вид; вставки – экспериментальные и расчетные вставки SAED для ориентации $[001]\alpha + 3 [001] (\beta')$; (б) и (ж)-(к) наиболее распространенные фазы; (в)-(е) кристаллическая структура фаз β_T , β' , β_1 и β'' ; (и) перекрытие двух фаз β'

Фаза β_T имеет стержневидную морфологию и располагается вдоль направлений типа $\langle 100 \rangle_\alpha$. Длина отдельных выделений достигает 22-25 нм. Структура β_T фазы представляет собой периодически повторяющиеся гексагональные образования, сформированные атомами Gd, Nd и Y, разделенными участками α_{Mg} . Установлено, что вокруг выделений β_T наблюдаются области обеднения твердого раствора редкоземельными элементами шириной 2-3 нм.

Фазы β' и β_1 преимущественно входят в состав сложных многокомпонентных выделений совместно с β_T фазой. Выявлены структуры типа β_T - β_1 - β_T и β_T - β_1 - β' ,

формирующие сложные агломераты размером до 25 нм. Подобная морфология обеспечивает эффективное торможение движения дислокаций и является важным механизмом дисперсионного упрочнения сплава.

Особое внимание уделено исследованию ориентационных соотношений между β_1 фазой и матрицей α -Mg. Анализ FFT-изображений и электронограмм (рисунок 5) показал наличие ориентационного соотношения, отличающегося от ранее описанных в литературе. Установлено, что кристаллы β_1 фазы имеют разворот около $\pm 5^\circ$ относительно известных ориентаций, что свидетельствует о специфике фазообразования в разработанном сплаве ВМЛ_оп.

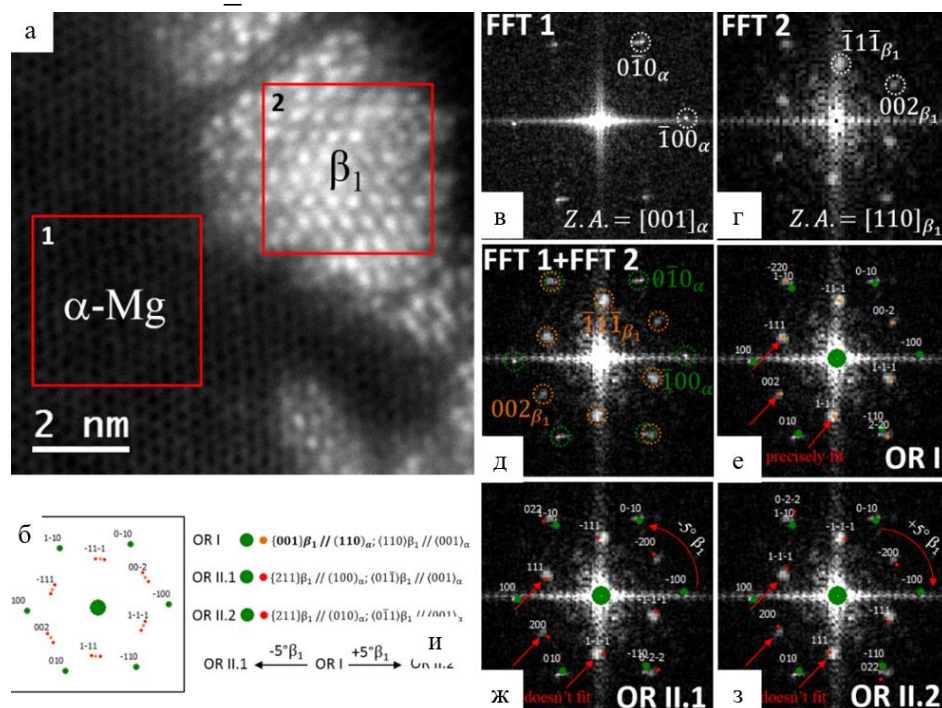


Рисунок 5. Анализ ориентационного соотношения между метастабильными β_1 и α -Mg: (а) исследуемая область; (б) рассчитанная дифракционная картина для ORI и ORII; (в) FFT для α -Mg; (г) FFT для фазы β_1 ; (д) суммарная FFT1 и FFT2; (е)-(з) наложение рассчитанных дифракционных картин на экспериментальные изображения FFT для ORI и ORII. Четко видно несоответствие отражения β_1 на (ж) и (з)

Исследования в ориентации $[100]_\alpha$ показали наличие фаз β' , γ' и γ'' типа (рисунок 6). Установлено, что γ' фаза представляет собой LPSO building blocks с повышенным содержанием Y и Zn и располагается в базисных плоскостях матрицы. Пластины γ'' фазы имеют длину 15-20 нм и толщину порядка одной элементарной ячейки. Выявлено, что пересечения пластин γ' и β' фаз отсутствуют, что подтверждает независимый характер их формирования. Дополнительно установлено, что в процессе старения происходит образование крупных пластин β_1 фазы и зернограницных выделений. (рисунок 7) Показано, что зарождение β_1 фазы носит гетерогенный характер и происходит преимущественно на частицах $ZrMn_2$. Размер отдельных пластин достигает 500 нм, а крупных зернограницных частиц — до 10 мкм. Образование подобных выделений сопровождается формированием зон, свободных от выделений, шириной 100-400 нм вследствие локального обеднения матрицы редкоземельными элементами.

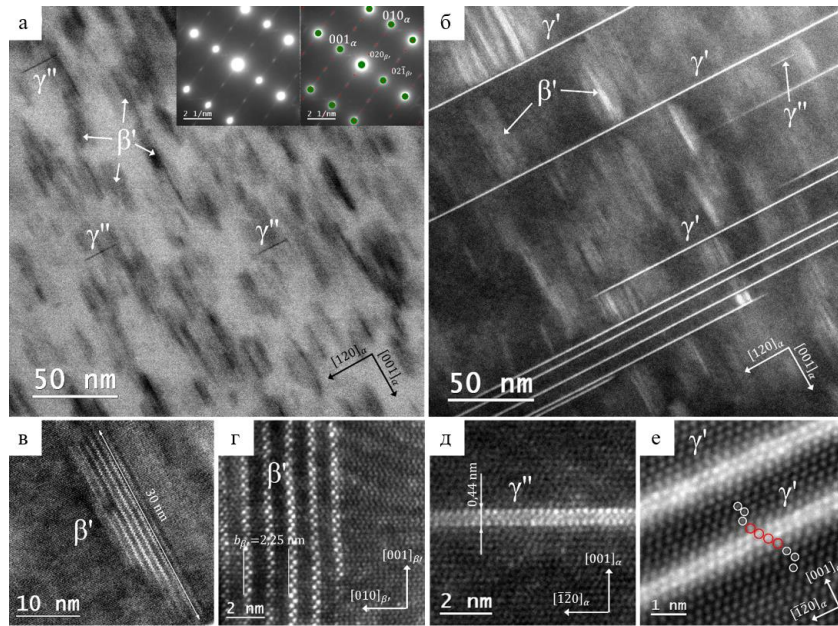


Рисунок 6. Фазы β' , γ' и γ'' в ВМЛ_оп после старения при температуре 220 °С в течение 10 ч: Общий вид; вставки-экспериментальные и расчетные SAED для $[100]\alpha+3$ ориентации β' ; (б) область с высоким содержанием пластин γ' ; (в)-(е) кристаллическая структура фаз β' , γ'' и γ' .

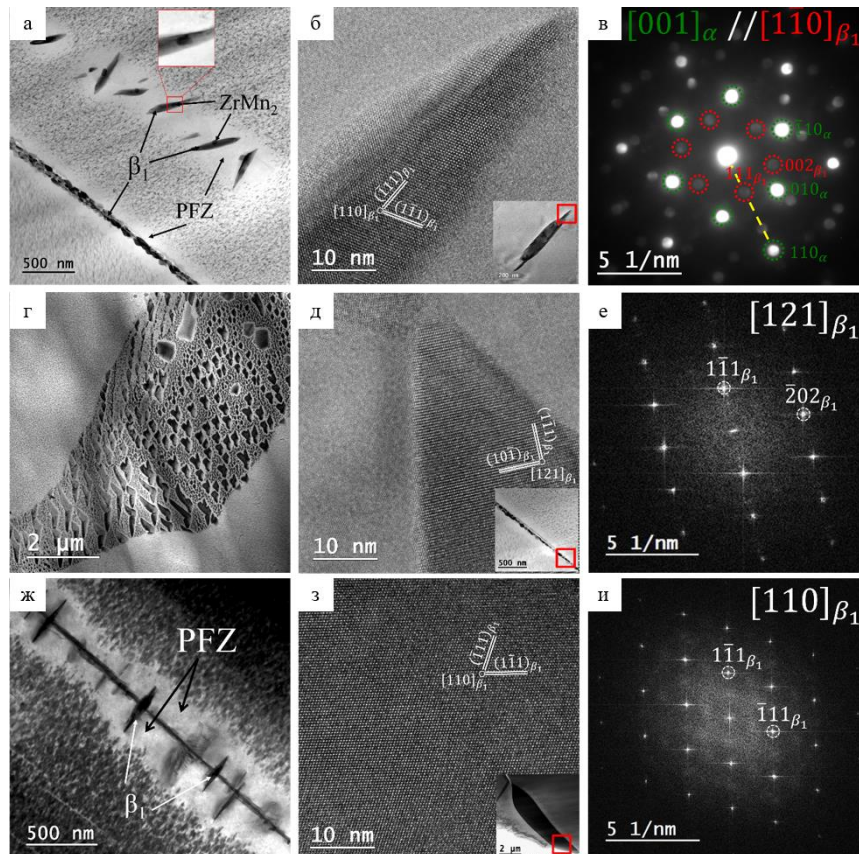


Рисунок 7. Фаза β_1 в сплаве ВМЛ_оп после старения при температуре 220 °С в течение 10 ч: (а) агломерация пластин β_1 , растущих на включениях $ZrMn_2$; (б) HRTEM пластин β_1 ; (в) сложная дифракционная картинка SAED вдоль $[001]\alpha+[110]\beta_1$; (г) Сетка частиц фазы β_1 на границе зерен; (д), (е) HRTEM мелких частиц β_1 на границе зерен и соответствующая FFT; (ж) зона, свободная от выделений (PFZ), вблизи частиц на границе зерен; (з), (и) крупная частица β_1 на границе зерен и соответствующая FFT.

Таблица 5. Фазовый состав сплава ВМЛ_оп после старения при температуре 220 °С в течение 10 часов.

Фаза	Кристаллическая решетка	Параметры решетки	Примечание
α -Mg	Гексагональная	$a = 0.321 - 0.327$ нм, $c = 0.51$ нм	Твердый раствор
β_H	Гексагональная	$a = 0.323$ нм, $c = 0.51$ нм	Гексагоны (агломераты атомов РЗЭ)
β''	Гексагональная	$a = 0.32$ нм, $c = 0.51$ нм	Следы
β_T	cbco	$a = 0.65$ нм, $b = 3.32$ нм, $c = 0.51$ нм	Преобладающая
β'	cbco	$a = 0.66$ нм, $b = 2.22$ нм, $c = 0.51$ нм	Преобладающая
β_1	f.c.c.	$a = 0.69 - 0.70$ нм / $0.72 - 0.74$ нм	Метастабильная (наноразмерные/ крупные выделения)
γ''	Гексагональная	$a - n/d$, $c = 0.44$ нм	Короткие пластины
γ'	Гексагональная	Дефекты упаковки типа ABCA	Длинные пластины (единичный блок LPSO)
LPSO	-	-	Наноразмерные пластины, содержащие различное количество слоев, обогащенных иттрием и цинком
Zr ₃ Zn ₂	Тетрагональная	$a = 0.79$ нм, $c = 0.72$ нм	Центры гетерогенного зарождения β_1 фазы
Zr ₂ Zn	Тетрагональная	$a = 0.70$ нм, $c = 0.55$ нм	
ZrMn ₂	Гексагональная	$a = 0.51$ нм, $c = 0.83$ нм	

Установлено, что повышение оптимального температурного интервала закалки (пережог при 540-560 °С с длительной выдержкой) приводит к принципиальному изменению структурно-фазового состояния сплава. Пережог сопровождается интенсивной диффузией легирующих элементов и формированием грубых интерметаллидных фаз Mg₃(Zn, РЗЭ), локализованных преимущественно по границам зерен в виде непрерывного каркаса, приводя к утолщению границ и деградации дисперсной упрочняющей структуры. Установлено, что последующее искусственное старение при температурах 200 и 250 °С не обеспечивает восстановления исходного структурного состояния и сопровождается выраженным снижением прочностных и пластических характеристик. Лишь при старении при 300 °С наблюдается частичное перераспределение легирующих элементов и формирование более стабильной пластинчатой фазы Mg₅(Zn, РЗЭ), однако даже в этом случае комплекс механических

свойств остается существенно ниже уровня, достигаемого при оптимальных режимах термической обработки.

Проведены огневые испытания разработанного высокопрочного жаропрочного литейного магниевого сплава ВМЛ_оп. Установлено, что сплав характеризуется повышенной температурой воспламенения и высокой устойчивостью к воздействию открытого пламени по сравнению с традиционными литейными магниевыми сплавами. Показано, что введение редкоземельных элементов (Gd, Nd, Y) способствует формированию термостабильных оксидных пленок и снижению интенсивности окислительных процессов при нагреве. Установлено, что после оптимальной термической обработки сплав сохраняет структурную стабильность и не проявляет склонности к интенсивному распространению горения, что подтверждает его соответствие требованиям, предъявляемым к пожаробезопасным конструкционным материалам.

Для проведения сравнительных испытаний разработана экспериментальная методика оценки воспламеняемости малоразмерных образцов магниевых сплавов при воздействии пламени газовой горелки с температурой около 1100 °С. В отличие от существующих методик, предложенная схема обеспечивала непосредственный контакт пламени с поверхностью образца, что позволяло моделировать более жесткие условия теплового воздействия. Разработана специальная оснастка (рисунок 8) для испытаний образцов различной геометрии и условий закрепления. Исследованы пять вариантов испытаний, различавшихся способом фиксации образцов, наличием теплоизолирующей подложки и продолжительностью воздействия пламени.

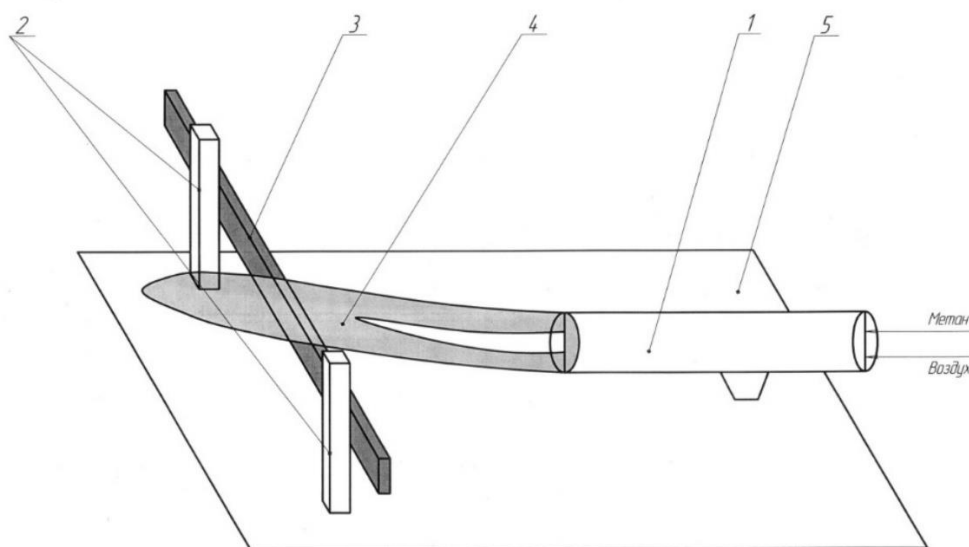


Рисунок 8. Схема оснастки для проведения сравнительных испытаний образцов магниевых сплавов на воспламеняемость при воздействии пламени с температурой 1100 °С: 1 – газовая горелка, 2 – стойки для крепления испытываемых образцов, 3 – образец, 4 – пламя газовой горелки, 5 – металлическое основание

Проведены сравнительные огневые испытания промышленного магниевого сплава МЛ10 и разработанного пожаробезопасного сплава ВМЛ_оп. Установлено, что стандартный сплав МЛ10 в большинстве случаев воспламеняется уже через 47-115 с после начала нагрева, а продолжительность его горения после удаления пламени достигала 12 мин 25 с. Потеря массы образцов вследствие выгорания составляла от 10 до 100 %. Показано, что разработанный сплав ВМЛ_оп либо вообще не воспламеняется, либо самозатухает в течение нескольких секунд после удаления источника пламени. Потеря массы образцов не превышает 0,1-0,4 %, что свидетельствует о существенно более высокой пожаробезопасности разработанного материала по сравнению с промышленным сплавом МЛ10. Установлено, что даже при локальном расплавлении образца развитие устойчивого горения не происходит вследствие формирования защитного оксидного слоя, препятствующего интенсивному взаимодействию магния с кислородом воздуха.

Дополнительно установлено, что минимальная температура начала устойчивого горения сплава ВМЛ_оп составляет не менее 805 °С, а в большинстве экспериментов образцы нагревались до температур 844-960 °С без перехода к интенсивному устойчивому горению. Полученные значения существенно превышают температуры растворения эвтектической составляющей и близки к температуре солидуса, определенной методами ДСК. Это свидетельствует о высокой термической стабильности структуры и значительном температурном интервале между активацией диффузионных процессов и развитием интенсивного горения.

После огневых испытаний проведено исследование структуры поверхностной зоны сплава методами оптической и растровой электронной микроскопии с локальным энергодисперсионным анализом. Установлено, что в процессе воздействия пламени в поверхностной зоне формируется деградированный слой толщиной 0,5-1,5 мм после 5 минут нагрева и до 2 мм после 15 минут воздействия. В поверхностном слое наблюдаются разрушение межзеренной эвтектики, формирование межзеренной пористости и локальных пустот, связанных с развитием процессов высокотемпературного окисления и термической деградации структуры (рисунок 9).

Результаты локального энергодисперсионного анализа показали, что сформированный поверхностный слой обогащен кислородом, иттрием, гадолинием и другими редкоземельными элементами. В отдельных участках содержание иттрия достигает 55-58 масс. %, что говорит о перераспределении редкоземельных элементов в направлении поверхности материала и их участии в формировании термостабильного защитного оксидного слоя. Установлено, что именно присутствие иттрия и редкоземельных элементов обеспечивает повышенную устойчивость сплава к воспламенению и способствует самозатуханию после удаления источника пламени. По результатам комплекса исследований разработанному сплаву присвоена марка ВМЛ26.

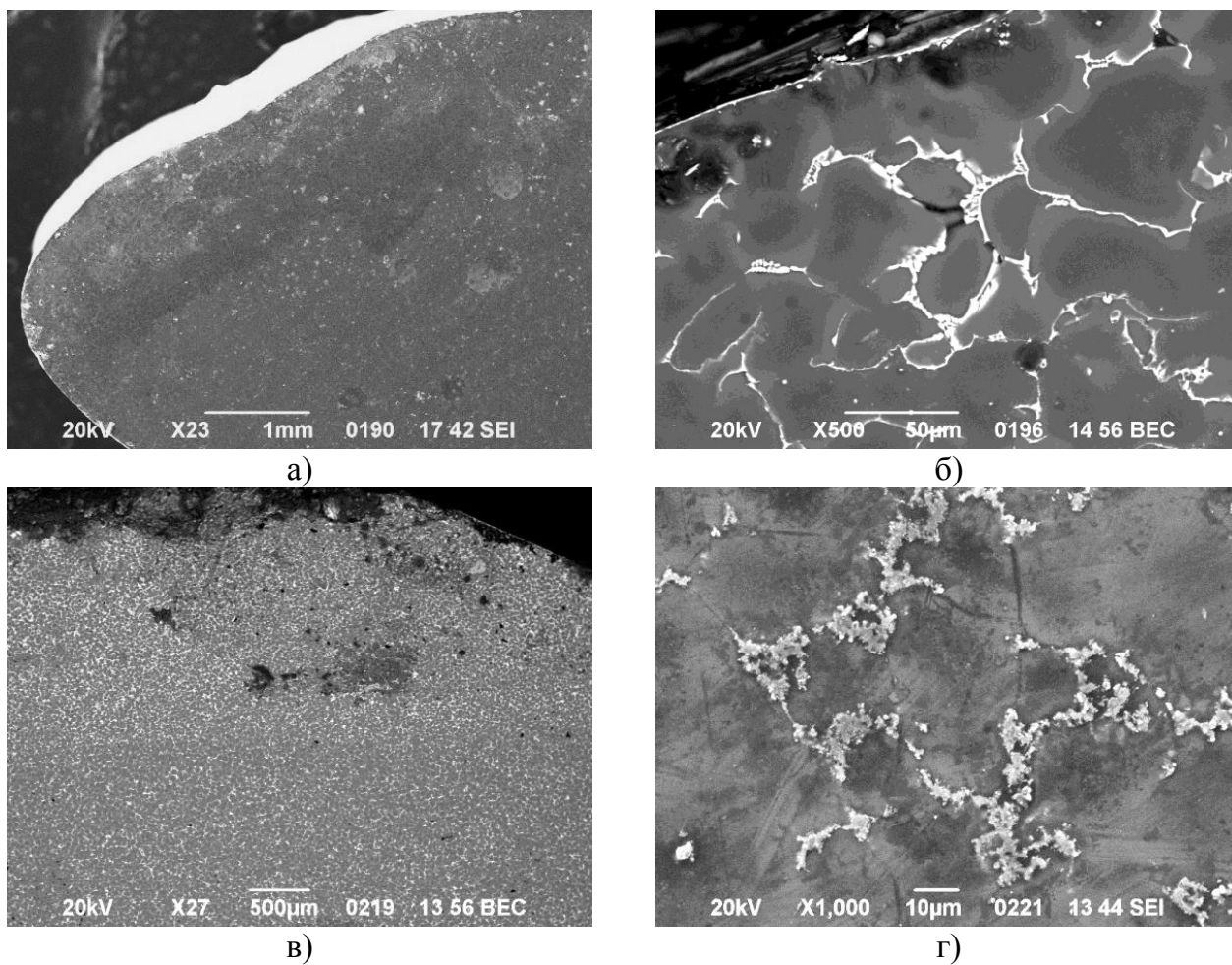


Рисунок 9. Структура поверхностной зоны сплава ВМЛ26 после огневого воздействия:

а) общий вид деградированного слоя после испытаний в течение 5 мин; б) изменение межзеренной структуры в поверхностном слое после испытаний в течение 5 мин; в) общий вид деградированного слоя после испытаний в течение 15 мин; г) межзеренная деградация и образование пустот в поверхностном после испытаний в течение 15 мин

Проведены исследования влияния длительных эксплуатационных нагревов на структуру и механические свойства разработанного пожаробезопасного высокопрочного жаропрочного литейного магниевого сплава ВМЛ26. Исследования выполнялись на образцах после термической обработки Т61, подвергнутых выдержке при температурах 150, 250 и 350 °С в течение 100, 500 и 1000 часов как без приложения нагрузки, так и под воздействием постоянного напряжения 50 МПа. Показано, что при эксплуатационных нагревах до 150 °С структура сплава сохраняет исходное состояние. Существенных изменений морфологии (рисунок 10) и распределения вторичных фаз не наблюдается. Прочностные характеристики практически не изменяются даже после выдержек длительностью до 1000 часов: временное сопротивление сохраняется на уровне 317-319 МПа, предел текучести составляет 195-199 МПа, а относительное удлинение остается близким к исходному состоянию (6,6-7,0 %). Полученные результаты свидетельствуют о высокой структурной стабильности сплава ВМЛ26 при длительной эксплуатации в условиях умеренных температур.

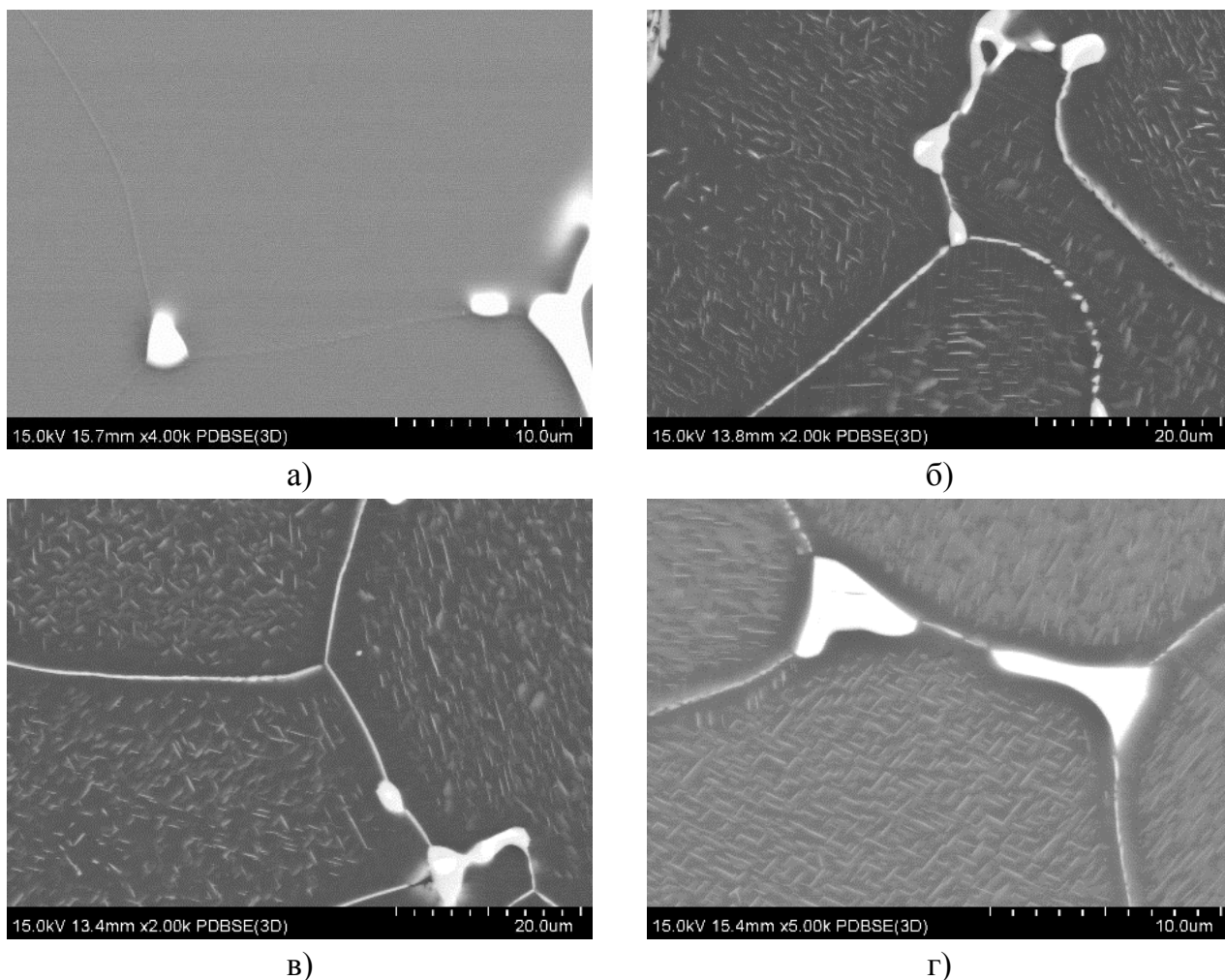


Рисунок 10. Микроструктура сплава ВМ126 после эксплуатационных нагревов: а) базовый сплав без эксплуатационных нагревов; б) сплав, подвергнутый выдержке при 150 °С в течение 1000 ч; в) сплав, подвергнутый выдержке при 250 °С в течение 1000 ч; г) сплав, подвергнутый выдержке при 350 °С в течение 1000 ч.

Установлено, что при температуре 250 °С в структуре развивается дисперсная система вторичных выделений, преимущественно игольчатой и пластинчатой морфологии, равномерно распределенных в объеме зерен. С учетом результатов ПЭМ установлено, что в данном температурном интервале реализуются процессы активного формирования метастабильных β фаз, обеспечивающих дополнительное дисперсионное упрочнение сплава. На начальных стадиях выдержки наблюдается повышение предела текучести до 211 МПа при сохранении временного сопротивления на уровне 320 МПа. При увеличении времени выдержки до 500-1000 часов происходит постепенное снижение прочности вследствие начала процессов коагуляции и укрупнения вторичных фаз. Несмотря на это, даже после 1000 часов выдержки при 250 °С временное сопротивление сохраняется на уровне около 293 МПа. Показано, что при температуре 350 °С в сплаве развиваются процессы перестаривания и структурной деградации. Методами растровой электронной микроскопии установлено укрупнение вторичных фаз в объеме зерна и снижение их дисперсности. Результаты локального энергодисперсионного анализа показали, что игольчатые выделения обогащены неодимом и гадолинием и соответствуют

β_1 -фазе состава типа $(Mg,Zn)_3RE$. При длительных выдержках наблюдается коагуляция β_1 выделений, приводящая к существенному снижению прочностных характеристик. После выдержки при 350 °С в течение 1000 часов временное сопротивление снижается до 194 МПа, а предел текучести – до 127 МПа.

Проведены исследования влияния длительных эксплуатационных нагревов при приложении постоянного напряжения 50 МПа. Показано, что общий характер изменения прочностных свойств сохраняется, однако приложение нагрузки ускоряет процессы деградации структуры при повышенных температурах. Наиболее выраженное снижение прочности наблюдается при температуре 350 °С, где напряжения способствуют ускорению процессов коагуляции вторичных фаз и разупрочнения сплава. Установлено, что влияние температуры является определяющим фактором деградации структуры, тогда как приложение нагрузки дополнительно интенсифицирует процессы перестаривания при высокотемпературной эксплуатации. На основании анализа тепловых карт изменения временного сопротивления установлено, что область максимальной стабильности прочностных характеристик соответствует температурам до 250 °С независимо от времени выдержки. При температуре 350 °С формируется область интенсивного снижения прочности, особенно при выдержках 500-1000 часов, что соответствует развитию процессов перестаривания и деградации дисперсной упрочняющей структуры.

В пятой главе представлены результаты промышленного освоения технологии получения высокопрочного жаропрочного литейного магниевого сплава ВМЛ26, включая разработку параметров выплавки, фильтрации расплава и технологии исправления литейных дефектов методом холодного газодинамического напыления. Разработаны технологические параметры бесфлюсовой выплавки в индукционных печах с использованием защитной газовой атмосферы SF_6+CO_2 . Установлено, что оптимальным является соотношение компонентов защитной смеси 1:15, обеспечивающее стабильную защиту поверхности расплава, снижение окисления магния и редкоземельных элементов, уменьшение газонасыщенности и повышение химической однородности металла. Показано, что применение данной газовой смеси позволяет повысить уровень механических свойств и снизить скорость коррозии по сравнению с традиционной флюсовой технологией.

Исследовано влияние интенсивности электромагнитного перемешивания на структуру и свойства сплава ВМЛ26. Установлено, что при силе тока индуктора 100-150 А реализуется режим, обеспечивающий равномерное распределение циркония и редкоземельных элементов по объему расплава. При недостаточной интенсивности перемешивания (50 А) наблюдается выраженная ликвационная неоднородность, образование локальных участков с повышенной концентрацией интерметаллидов и снижение механических свойств. Показано, что увеличение силы тока индуктора с 50 до 150 А приводит к повышению временного сопротивления с 263 до 304 МПа и снижению коэффициента вариации содержания иттрия с более чем 60 % до 3-5 % (рисунок 11).

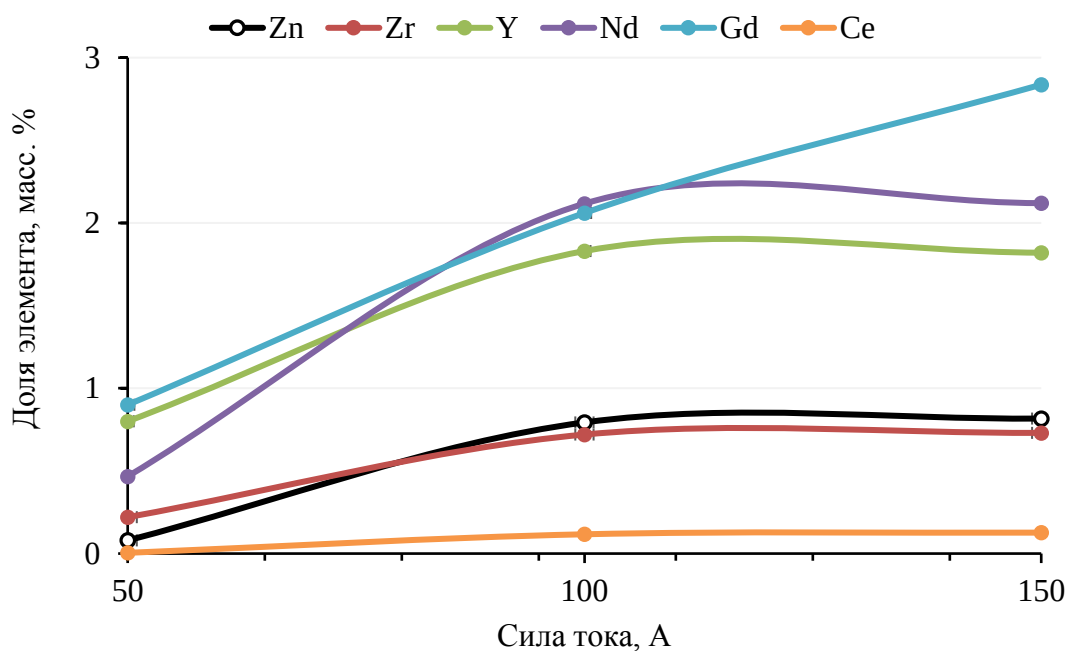


Рисунок 11. Зависимость количества усвоенного элемента от силы тока

Разработана технология фильтрации расплава с использованием пенокерамических фильтров на основе оксида циркония и стальных сеток. Установлено, что фильтрация в сочетании с интенсивным электромагнитным перемешиванием способствует снижению содержания оксидных и гидридных включений, повышению усвоения редкоземельных элементов и циркония на 10-15 % (рисунок 12), а также стабилизации фазового состава сплава. Методами электронной микроскопии выявлено формирование в структуре сплава γ' и LPSO-фаз, а также снижение количества гидридов иттрия при увеличении силы тока индуктора до 150 А. Показано, что применение фильтрации обеспечивает повышение структурной однородности, снижение скорости коррозии на $\sim 30\%$ и сохранение высокой температуры воспламенения сплава на уровне 840-985 °С.

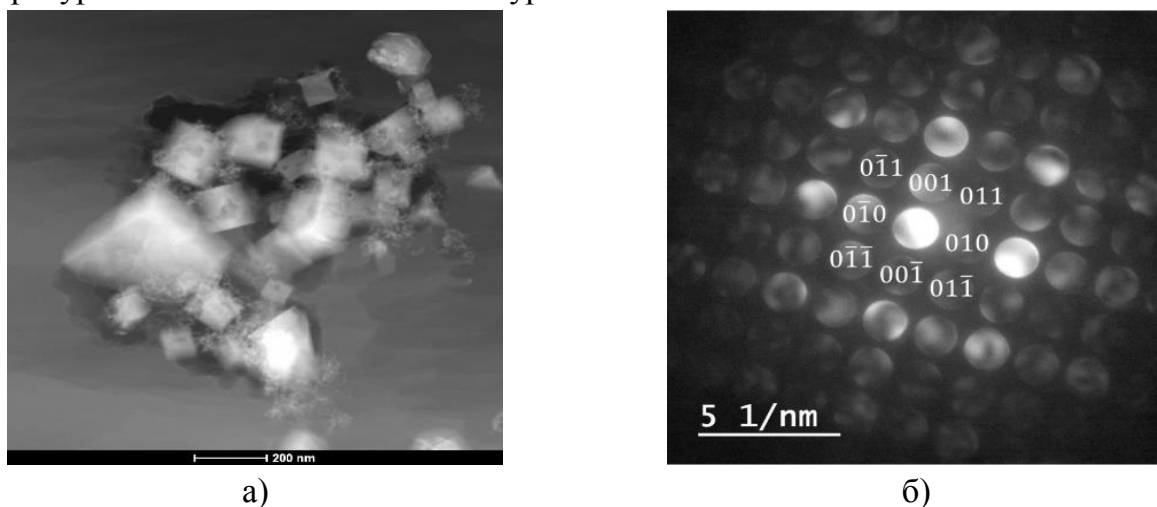


Рисунок 12. Результаты дифракционного и элементного анализа гидридов иттрия YH_2 : а) темнопольное изображение; б) дифракция в сходящемся пучке, проиндицированная в рефлексах YH_2 , ось зоны $[100]$.

Разработана технология исправления литейных дефектов отливок из сплава ВМЛ26 методом холодного газодинамического напыления. Для реализации технологии исследованы порошковые композиции систем Al-Mg-Gd, Al-Mg-Y и Al-Mg-Zr, обеспечивающие химическую совместимость с магниевыми сплавами системы Mg-P3Э-Zr (таблица 6).

Таблица 6. Составы ПК для сплавов на основе магния

Условный номер состава ПК	Номер композиции (основа ПК)	Фракция основы ПК	Материал добавки
1	(Al-Mg-Gd)	<10 мкм	10 % Al ₂ O ₃ + 10% Zn
		от 10 до 63 мкм	
2	(Al-Mg-Y)	<10 мкм	
		от 10 до 63 мкм	
3	(Al-Mg-Zr)	<10 мкм	
		от 10 до 63 мкм	

Установлено, что наилучшие результаты обеспечивает порошковая композиция на основе системы Al-Mg-Zr, позволяющая обеспечить отношение прочности напыленного слоя к прочности основного материала 0,90. Результаты рентгенографического контроля и металлографических исследований подтвердили отсутствие дефектов, высокую адгезию напыленного слоя и отсутствие коррозионных поражений после испытаний в камере соляного тумана (рисунок 13).

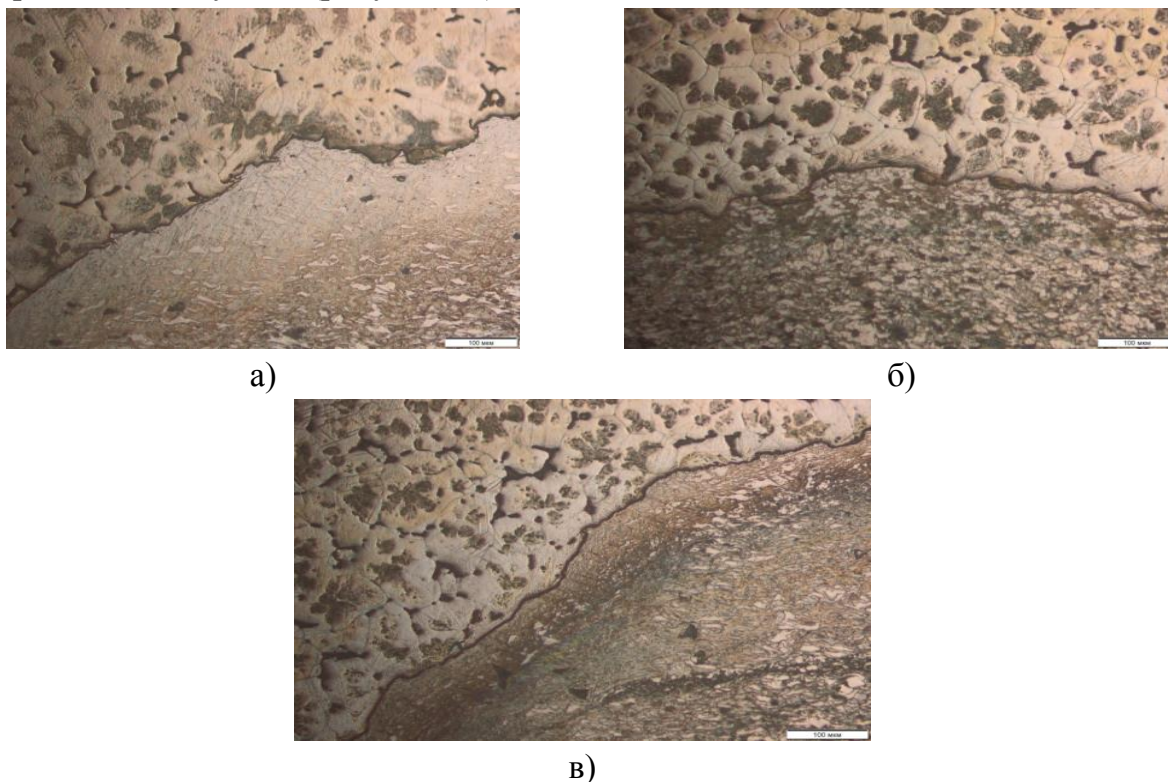


Рисунок 13. Микроструктура образцов из сплава ВМЛ26 с нанесенными порошковыми композициями с размером фракции <10 мкм:
(а) состав № 1 (Al-Mg-Gd), (б) состав № 2 (Al-Mg-Y), (в) состав № 3 (Al-Mg-Zr).

В шестой главе представлено развитие разработанной научной концепции комплексного легирования магниевых сплавов на многокомпонентные системы Mg-(Nd+Gd+Y+Er+Dy)-Zr и Mg-(Nd+Gd+Dy+Er)-Zn-Zr-Cd. Основной целью исследований являлось подтверждение универсальности предложенного подхода к формированию термостабильной многоуровневой упрочняющей структуры за счет сочетания редкоземельных элементов с различной растворимостью, размерным несоответствием атомов и склонностью к образованию интерметаллидных фаз.

Установлено, что введение тяжелых редкоземельных элементов иттриевой подгруппы (Gd, Dy, Er) обеспечивает формирование структуры, включающей пересыщенный твердый раствор α_{Mg} , зернограничную эвтектику и дисперсные внутрикристаллические выделения. Показано, что различие атомных радиусов Nd, Gd, Dy и Er приводит к формированию сложного поля упругих искажений в магниевой матрице, повышающего сопротивление дислокационному скольжению и замедляющего диффузионные процессы при высокотемпературной эксплуатации.

Проведены исследования экспериментальных составов системы Mg-(Nd+Gd+Y+Er+Dy)-Zr в литом и термообработанном состояниях. Установлено, что после обработки по режиму T61 в структуре формируется многоуровневая упрочняющая система, сочетающая твердорастворное и дисперсионное упрочнение. Полученные сплавы характеризуются средними показателями временного сопротивления до 285 МПа, предела текучести до 220 МПа и длительной прочности при 250 °С на уровне 100-105 МПа. Показано, что наиболее высокий уровень жаропрочности достигается в составах, содержащих тяжелые редкоземельные элементы Dy и Er.

Дополнительное развитие концепции реализовано путем введения кадмия в систему Mg-(Nd+Gd+Dy+Er)-Zn-Zr. Установлено, что кадмий, обладая высокой растворимостью в магнии и значительным размерным несоответствием атомов, усиливает твердорастворное упрочнение без существенного увеличения объемной доли зернограничной эвтектики. Показано, что введение Cd способствует повышению предела текучести и стабилизации структуры при длительных выдержках.

Разработан скорректированный режим термической обработки, включающий двухступенчатый нагрев под закалку, охлаждение в горячей воде и старение при 200-220 °С. Установлено, что данный режим обеспечивает более полное растворение избыточных фаз и формирование равномерно распределенной мелкодисперсной упрочняющей структуры. После оптимизации термической обработки достигнут уровень механических свойств: $\sigma_B = 270-280$ МПа, $\sigma_{0,2} = 220-230$ МПа при сохранении удовлетворительной пластичности и высокой длительной прочности при 250 °С.

На основании проведенных исследований разработан новый жаропрочный литейный магниевый сплав системы Mg-(Nd+Gd+Dy+Er)-Zn-Zr-Cd, которому присвоена марка ВМЛ25.

Выполнен сравнительный анализ разработанных сплавов ВМЛ25 и ВМЛ26 с серийными жаропрочными магниевыми сплавами МЛ9, МЛ10 и МЛ19 (таблица 7). Установлено, что разработанные сплавы превосходят серийные сплавы-аналоги по уровню кратковременной и длительной прочности, пределу текучести, коррозионной

стойкости и огневым характеристикам. Сплав ВМЛ26 обеспечивает временное сопротивление до 300 МПа и длительную прочность $\sigma_{100}^{250} = 135$ МПа, а температура его воспламенения достигает 812 °С, что существенно превышает показатели серийных магниевых сплавов.

Таблица 7. Механические свойства при комнатной и повышенных температурах разработанных ВМЛ25, ВМЛ26 и серийных МЛ9, МЛ10 и МЛ19 магниевых сплавов

Хар-ка*	Марка сплава				
	Жаропрочный ВМЛ25	Высокопрочный пожаробезопасный ВМЛ26	Жаропрочный МЛ9**	Жаропрочный МЛ10**	Жаропрочный МЛ19**
σ_B , МПа	270	300	230	235	220
$\sigma_{0,2}$, МПа	215	200	110	140	120
σ_B^{250} , МПа	205	220	185	-	185
σ_B^{350} , МПа	195	185	-	-	-
* минимальные значения					
** справочник «Авиационные материалы». Том 5					

Выводы

1. Разработана и научно обоснована концепция комплексного легирования литейных магниевых сплавов системы Mg-P3Э-Zr, основанная на управлении структурно-фазовым состоянием, растворимостью редкоземельных элементов и характером формируемых интерметаллидных фаз. Показано, что целенаправленное соотношение элементов цериевой и иттриевой подгрупп, технологических режимов изготовления, включая термическую обработку, позволяет формировать структурное состояние с контролируемым балансом твердорастворного и дисперсионного упрочнения.

2. Установлены закономерности влияния атомного радиуса, электроотрицательности и температуры плавления редкоземельных элементов на растворимость в магнии, устойчивость пересыщенного твердого раствора и термическую стабильность образующихся фаз. Показано, что элементы иттриевой подгруппы обеспечивают более выраженное твердорастворное упрочнение и повышенную термостабильность структуры по сравнению с элементами цериевой подгруппы.

3. Экспериментально подтверждено, что совместное легирование магниевой матрицы редкоземельными элементами различных подгрупп формирует структурно устойчивую систему, включающую пересыщенный α -твердый раствор, дисперсные внутрикристаллические выделения и термостабильные зернограницные фазы. Такая структура обеспечивает повышение сопротивления началу пластической деформации при сохранении достаточной пластичности.

4. Разработаны режимы термической обработки для многокомпонентных литейных магниевых сплавов, обеспечивающие формирование устойчивого пересыщенного твердого раствора и контролируемый распад при старении. Показано, что корректировка

температурно-временных параметров позволяет перераспределять вклад твердорастворного и дисперсионного механизмов упрочнения и управлять соотношением предела текучести, кратковременной и длительной прочности.

5. Установлена взаимосвязь между химическим составом, фазовым состоянием и жаропрочными характеристиками при 250-300 °С. Показано, что повышение термостабильности интерметаллидных фаз и снижение подвижности дислокаций в объеме зерен и по границам зерен являются ключевыми факторами обеспечения сопротивления ползучести.

6. Показано, что комплексное легирование редкоземельными элементами оказывает влияние на процессы высокотемпературного окисления и температуру воспламенения магниевых сплавов. Установлено, что формирование плотной оксидной пленки с участием РЗЭ способствует повышению пожаробезопасности при сохранении механических характеристик.

7. Разработанные составы магниевых литейных сплавов нового поколения (патенты №№ 2562190; 2753660, 2425903) обеспечивают совокупность прочностных, жаропрочных и эксплуатационных характеристик, соответствующих современным требованиям, при сохранении весовых преимуществ магниевых сплавов.

8. Расширение концепции комплексного легирования на многокомпонентные магниевые сплавы системы типа $Mg-(Nd+Gd+Y+Er+Dy)-Zr$ подтвердило ее универсальность и воспроизводимость. Установлено, что усложнение металлохимического состава не изменяет принципиальный механизм упрочнения, а приводит к перераспределению вкладов структурных факторов, позволяя целенаправленно варьировать свойства сплава.

9. Проведенные исследования позволили разработать паспорта на новые литейные высокопрочные жаропрочные магниевые сплавы с повышенной температурой воспламенения марок ВМЛ26, ВМЛ25, которые являются квалификационными документами, содержащими полный комплекс сведений о материалах, устанавливающие возможность использования разработанных материалов в конструкциях авиационной техники и их преимущества перед ранее разработанными материалами с указанием условий и областей их применения, а также технические условия (ТУ) на эти сплавы, технологические инструкции (ТИ) и рекомендации (ТР) на плавку сплавов, литьё деталей из сплавов, термическую обработку деталей, методические материалы (ММ) на проведение огневых испытаний (паспорт на сплав – 2 шт.; ТУ- 5 шт., ТР – 5 шт., ТИ – 3 шт., ММ – 3 шт.).

Список основных трудов по теме диссертации опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:

1. **Дуюнова В.А.**, Петров И.А., Леонов А.А., Трофимов Н.В. Разработка математических моделей прогнозирования свойств магниевого сплава системы $Mg-P3M-Zn-Zr$ и оценка ее сходимости. Авиационные материалы и технологии. 2026. № 2. С. 51-63. DOI: 10.18577/2713-0193-2026-0-2-51-63;

2. **Дуюнова В.А.**, Леонов А.А., Трофимов Н.В., Мухина И.Ю., Уридия З.П., Токарев М.С. Влияние газодинамического напыления порошковых материалов на адгезию лакокрасочных покрытий, коррозию, механические свойства магниевых сплавов. Труды ВИАМ. 2026. № 3 (157). С. 54-65. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-54-65;
3. Мухина И.Ю., **Дуюнова В.А.**, Леонов А.А., Токарев М.С., Трапезников А.В., Власова К.А. Тенденции развития в области составов и технологий изготовления порошковых композиций для алюминиевых и магниевых сплавов. Труды ВИАМ. 2025. № 11 (153). С. 3-11. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-3-11;
4. Трофимов Н.В., Леонов А.А., **Дуюнова В.А.**, Токарев М.С. Современные подходы к повышению качества литья и локальному ремонту изделий из магниевых сплавов. Труды ВИАМ. 2025. № 4 (146). С. 57-69. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-57-69;
5. Леонов А.А., Трофимов Н.В., **Дуюнова В.А.** Кинетика старения и изменение механических свойств при пережоге литейного магниевого сплава системы Mg - Y - Nd - Gd - Zn – Zr. Металловедение и термическая обработка металлов. 2024. № 5 (827). С. 62-67 DOI: 10.30906/mitom-2024-5-62-67 // Leonov A.A., Trofimov N.V., Duyunova V.A. Kinetics of aging and changes in the mechanical properties of Mg – Y – Nd – Gd – Zn – Zr cast magnesium alloy during overburning. Metal Science and Heat Treatment. 2024. Т. 66. № 5-6. С. 317-322. DOI: 10.1007/s11041-024-01053-x;
6. Леонов А.А., **Дуюнова В.А.**, Трофимов Н.В., Уридия З.П., Мухина И.Ю. Исследование влияния режимов термической обработки на структуру и свойства пожаробезопасного литейного магниевого сплава системы Mg-P3M-Zr. Металлы. 2023. № 1. С. 16-22. DOI:10.31857/S0869573323010032 // Leonov A.A., Duyunova V.A., Trofimov N.V., Uridiya Z.P., Mukhina I.Yu. Effect of heat-treatment conditions on the structure and properties of a fireproof cast magnesium alloy of the Mg–REM–Zr system. Russian Metallurgy (Metally). 2023. Т. 2023. № 1. С. 13-18.). DOI:10.1134/s0036029523010081;
7. Уридия З.П., **Дуюнова В.А.**, Леонов А.А., Трофимов Н.В. Исследование микроструктуры жаропрочных литейных Mg-сплавов. Литейное производство. 2021. № 2. С. 10-12;
8. **Дуюнова В.А.**, Леонов А.А., Трофимов Н.В., Ростовцева А.С. Особенности влияния качественного и количественного соотношения редкоземельных элементов в новом пожаробезопасном литейном магниевом сплаве. Металлы. 2021. № 6. С. 34-38 // Duyunova V.A., Leonov A.A., Trofimov N.V., Rostovtseva A.S. Effect of qualitative and quantitative ratios of rare-earth elements in a new fireproof cast magnesium alloy. Russian Metallurgy (Metally). 2021. Т. 2021. № 11. С. 1409-1412. DOI:10.1134/S0036029521110033;
9. **Дуюнова В.А.**, Мухина И.Ю., Уридия З.П., Леонов А.А., Трофимов Н.В. Исследование влияния переходных и редкоземельных элементов на свойства литейных магниевых сплавов. Металлургия машиностроения. 2021. № 6. С. 16-21.
10. Леонов А.А., Трофимов Н.В., **Дуюнова В.А.**, Уридия З.П. Тенденции развития литейных магниевых сплавов с повышенной температурой воспламенения (обзор) Труды ВИАМ. 2021. № 2 (96). С. 3-9. DOI:10.18577/2307-6046-2021-0-2-3-9;

11. **Дуюнова В.А.**, Леонов А.А., Трофимов Н.В. Исследования влияния редкоземельных элементов и термической обработки на структуру и свойства жаропрочного литейного магниевого сплава системы Mg-PЗМ-Zr. *Металлы*. 2020. № 5. С. 58-63. // Duyunova V.A., Leonov A.A., Trofimov N.V. Effect of rare-earth elements and heat treatment on the structure and properties of a heat-resistant cast Mg-REM-Zr magnesium alloy *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020. Т. 2020. № 9. С. 982-986. DOI:10.1134/S0036029520090049;

12. Мухина И.Ю., **Дуюнова В.А.**, Кошелев О.В., Кошелев А.О. Об устранении металлургических дефектов сложноконтурных отливок из Mg-сплавов. *Литейное производство*. 2019. № 2. С. 7-13;

13. Фролов А.В., Мухина И.Ю., **Дуюнова В.А.**, Уридия З.П. Влияние легирующих элементов и структурных факторов на жаропрочность магниевых сплавов. *Труды ВИАМ*. 2015. № 9. С. 7. DOI:10.18577/2307-6046-2015-0-9-7-7;

14. Волкова Е.Ф., **Дуюнова В.А.** О современных тенденциях развития магниевых сплавов. *Технология легких сплавов*. 2016. № 3. С. 94-105

15. Мухина И.Ю., **Дуюнова В.А.**, Фролов А.В., Уридия З.П. Влияние легирования РЗМ на жаропрочность литейных магниевых сплавов. *Металлургия машиностроения*. 2014. № 5. С. 34-38;

Патенты Российской Федерации:

16. Пат. 2562190 Российская Федерация, МПК: С22С 23/04, С22С 23/06. Сплав на основе магния / Каблов Е.Н., Антипов В.В., Мухина И.Ю., **Дуюнова В.А.**, Уридия З.П., Фролов А.В., Леонов А.А.; заявитель и патентообладатель ФГУП «ВИАМ» 2014145124/02 заявл. 10.11.2014; опубл. 10.09.2015, бюл. № 25;

17. Пат. 2753660 Российская Федерация, СПК С22С 23/04, С22С 23/06. Пожаробезопасный высокопрочный литейный магниевый сплав / Каблов Е.Н., Трофимов Н.В., Леонов А.А., Уридия З.П., **Дуюнова В.А.**; заявитель и патентообладатель ФГУП «ВИАМ» 2020136001 заявл. 02.11.2020; опубл. 19.08.2021, бюл. № 23;

18. Пат. 2425903 Российская Федерация, СПК С1. Сплав на основе магния. Мухина И.Ю., Уридия З.П., **Дуюнова В.А.**, Галкин Д.Н., Аржанов С.А. Заявка № 2010137271/02 от 08.09.2010;

19. Пат. 2318031, Российская Федерация, СПК С1. Сплав на основе магния и изделие, выполненное из него. Мухина И.Ю., Мауленов О.Б., Уридия З.П., Степанов В.В., **Корчагина В.А.**, Боков К.А. Заявка № 2006140211/02 от 15.11.2006;

20. Пат. 2601718, Российская Федерация, СПК С1. Способ плавки и литья магниевых сплавов. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Мухина И.Ю., **Дуюнова В.А.**, Уридия З.П. Заявка № 2015115687/02 от 27.04.2015;

21. Пат. 2862591 Российская Федерация, С23С 4/04, С23С4/12, С23С 30/00. Порошковая композиция для газодинамического напыления на изделия из магниевых сплавов. Трофимов Н.В., Токарев М.С., Леонов А.А., **Дуюнова В.А.**; заявитель и патентообладатель НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ 2025127268 заявл. 06.10.2025; опубл. 21.05.2026, бюл. № 15

в других изданиях:

22. Леонов А.А., **Дуюнова В.А.**, Трофимов Н.В.; Заводов А.В., Ашмарин А.А. Особенности структурно-фазового состояния пожаробезопасного литейного магниевого сплава и их влияние на прочностные и жаропрочные характеристики. В сборнике: Климовские чтения - 2024: перспективные направления развития авиадвигателестроения. сборник статей научно-технической конференции. Санкт-Петербург, 2024. С. 430-439;

23. Трофимов Н.В., Леонов А.А., **Дуюнова В.А.**, Мухина И.Ю., Ростовцева А.С., Токарев М.С. Использование РЗМ как основной фактор, влияющий на повышение температуры воспламенения и механические свойства перспективного пожаробезопасного магниевого сплава. В сборнике: Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники. Материалы V Всероссийской научно-технической конференции. Москва. 2021. С. 125-138.

«Научно-технологические основы разработки высокопрочных жаропрочных литейных магниевых сплавов нового поколения с повышенной пожарной безопасностью»

Подписано в печать 2026 г. Заказ ...

Формат бумаги 60 × 90/16. Печ. л 2. Тираж 100 экз.

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