

ЛЕОНОВ АЛЕКСАНДР АНДРЕЕВИЧ

**ЛИТЕЙНЫЕ МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ СИСТЕМЫ Mg-PЗЭ-Zr
С ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ**

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:	Дуюнова Виктория Александровна кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отделения НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ
Официальные оппоненты:	Бецофен Сергей Яковлевич доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник НИО «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. Королева» (Самарский университет)

Защита состоится «__» _____ 2023 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 _____ Горбовец М.А.

© НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023.

© Леонов А.А., 2023

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Одним из ключевых требований Конструкторских Бюро в настоящее время является повышение весовой эффективности планера, которое достигается за счет применения материалов с пониженной плотностью, таких как магниевые сплавы. Именно поэтому магниевые сплавы нашли свое применение не только в условиях эксплуатации при нормальных температурах, но и в конструкциях, работающих при повышенных температурах. Для таких условий эксплуатации разработаны жаропрочные литейные магниевые сплавы системы Mg-P3Э-Zr. Данная система легирования в отличие от других систем легирования (Mg-Al-Zn, Mg-Zn-Zr) обладает значительными преимуществами при эксплуатации в условиях повышенных температур. Так, рабочей температурой эксплуатации серийного жаропрочного сплава МЛ19 является 300 °С длительно и 400 °С кратковременно, в то время как высокопрочный сплав МЛ5 эксплуатируется при температурах до 150 °С длительно и 175 °С кратковременно.

В настоящее время в данной отрасли нашли применение жаропрочные магниевые сплавы МЛ10, МЛ19 с температурой эксплуатации кратковременно 300-350 °С. Нерешенной проблемой является то, что они не обеспечивают современные требования по выдержке нагрузок при повышенных рабочих температурах. Данные сплавы обладают относительно высокими жаропрочными характеристиками при недостаточно высоких прочностных свойствах при нормальных температурах. Кроме того, пониженный порог воспламеняемости, а также требование к повышению рабочих температур свыше 400 °С ограничивает дальнейшее распространение магниевых сплавов и влияет на безопасность их эксплуатации. Это связано с тем, что образующаяся тонкая оксидная пленка, защищающая металл при дальнейшем повышении температуры, становится неустойчивой и начинает разрушаться. Процесс загорания в значительной мере зависит от состояния структуры и фазового состава сплава.

Указанные проблемы определили постановку и решение научной задачи по исследованию и разработке новых литейных магниевых сплавов, обладающих высокими прочностными, жаропрочными свойствами и повышенной температурой воспламенения в сравнении с серийно применяющимися жаропрочными и высокопрочными магниевыми сплавами.

Цель и задачи исследований

Целью работы является разработка нового поколения литейных магниевых сплавов, легированных редкоземельными элементами (иттрием, неодимом и гадолинием), обладающих стабильными прочностными (временным сопротивлением при 20, 250 и 300 °С, пределом текучести) и жаропрочными (пределом длительной прочности при температурах 200, 250 и 300 °С) характеристиками, а также повышенным порогом воспламеняемости.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследование влияния металлохимических свойств (размерный фактор, электроотрицательность) редкоземельных элементов на растворимость в магнии.
2. Исследование закономерностей формирования структуры, прочностных (временное сопротивление при 20, 250 и 300 °С, предел текучести, относительное удлинение) и жаропрочных (предел длительной прочности при 200, 250 и 300 °С) свойств при легировании редкоземельными элементами (иттрием, неодимом и гадолинием) магниевых сплавов с повышенной температурой воспламенения.
3. Исследование влияния температурно-временных параметров термической обработки на характер формирования структуры и прочностные (временное сопротивление при 20, 250 и 300 °С, предел текучести, относительное удлинение) характеристики магниевых сплавов с повышенной температурой воспламенения.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Установлено, что легирование иттрием, неодимом и гадолинием в совокупности с разработанным режимом упрочняющей термической обработки приводит к твердорастворному упрочнению и упрочнению за счет дисперсных наноразмерных (менее 10 нм) интерметаллидных частиц, выражающимся в повышении минимальных значений прочностных (временного сопротивления с 170 до 270 МПа, предела текучести с 120 до 170 МПа) и жаропрочных (предела длительной прочности на базе 100 часов при температурах 200 °С с 176 до 215 МПа; 250 °С – с 113 до 135 МПа; 300 °С – с 59 до 65 МПа) характеристик.

2. Установлено влияние температурно-временных параметров термической обработки на последовательность протекания фазовых превращений ($\alpha_{Mg} \rightarrow$ зоны Гинье-Престона/ $\beta_H \rightarrow \beta'' \rightarrow \beta'/\beta_T \rightarrow \beta_L/\beta' \rightarrow \beta_L/\beta'/\beta_T \rightarrow \beta$) в литейных магниевых сплавах системы Mg-РЗЭ-Zr с повышенной температурой воспламенения, максимальное упрочнение которых достигается за счет присутствия в структуре β (β_H , β'' , β_T , β' , β_1) и LPSO (представлены как единичными блоками γ' и γ'' , так и сеткой параллельных друг другу наноразмерных пластин на их основе) фаз.

3. Разработаны регрессионные модели прогнозирования по химическому составу прочностных свойств (временное сопротивление и предел текучести) магниевых сплавов системы Mg-РЗЭ-Zn-Zr, где в качестве РЗЭ выступают иттрий, неодим и гадолиний.

Практическая значимость работы

1. Разработаны составы и режимы термической обработки жаропрочного и пожаробезопасного литейных магниевых сплавов нового поколения, обладающих высокими механическими характеристиками при комнатной и повышенных температурах в сравнении с серийно применяющимися, и имеющих следующий уровень свойств:

- пожаробезопасный литейный магниевый сплав ВМЛ26 (патент РФ № 2753660) $\sigma_B \geq 300$ МПа, $\sigma_{0,2} \geq 190$ МПа, $\sigma_{100}^{250} = 135$ МПа, $\sigma_{100}^{300} = 65$ МПа, $T_{\text{воспл.}} = 800-1000$ °С.
- жаропрочный литейный магниевый сплав ВМЛ25 (патент РФ № 2562190) $\sigma_B \geq 270$ МПа, $\sigma_{0,2} \geq 215$ МПа, $\sigma_{100}^{250} = 100$ МПа, $\sigma_{100}^{300} = 40$ МПа.

Применение сплавов нового поколения позволит расширить область применения магниевых сплавов, повысить безопасность и надежность их эксплуатации в сравнении с серийными магниевыми сплавами-аналогами (МЛ5, МЛ10, МЛ19) за счет повышенных характеристик и температуры воспламенения.

2. Разработаны и освоены в промышленности технологии изготовления литейных магниевых сплавов ВМЛ25 и ВМЛ26 и отливок из них и оформлены технологические инструкция и рекомендации, которым присвоена литера А (литера присваивается по результатам испытаний опытно-промышленной партии при готовности к серийному производству):

- ТР 1.2.2872-2020 «Плавка, литье и термическая обработка литейного магниевового сплава марки ВМЛ26»;
- ТИ 1.595-24-1480-2021 «Изготовление фасонных отливок из магниевового сплава марки ВМЛ26»;
- ТИ 1.595-24-638-2015 «Плавка и литье жаропрочного литейного магниевового сплава, легированного РЗЭ» с литерой А;
- ТИ 1.595-24-737-2015 «Термическая обработка жаропрочного литейного магниевового сплава, легированного РЗЭ» с литерой А;

– Акт изготовления фасонных отливок из жаропрочного литейного магниевого сплава, легированного РЗЭ, в количестве 2500 кг от 31.03.2020 г.

3. Впервые в РФ разработаны методические материалы по проведению огневых испытаний магниевых сплавов:

– ММ 1.2.216-2021 «Определение температуры воспламенения образцов магниевых сплавов»;

– ММ 1.2.217-2021 «Определение времени остаточного горения образцов магниевых сплавов при температуре 1100 °С».

На защиту выносятся:

1. Установленные закономерности влияния редкоземельных элементов (иттрия, неодима и гадолиния) на твердорастворное упрочнение и выделения метастабильных интерметаллидных фаз в литейных магниевых сплавах системы Mg-РЗЭ-Zr с повышенной температурой воспламенения.

2. Разработанные регрессионные математические модели прогнозирования по химическому составу прочностных свойств (временное сопротивление и предел текучести) магниевых сплавов системы Mg-Gd-Nd-Y-Zn-Zr.

3. Установленные фазовые превращения основных упрочняющих метастабильных фаз (β_n , β'' , β_T , β' , β_1) в процессе старения литейных магниевых сплавов системы Mg-РЗЭ-Zr с повышенной температурой воспламенения.

Личный вклад автора заключается в поиске и проведении анализа литературных данных и источников по теме исследования, обосновании и постановке цели, задач и методов исследований, планировании и проведении экспериментов; проведении испытаний и исследований композиций жаропрочного и пожаробезопасного литейных магниевых сплавов с повышенными прочностными характеристиками при комнатной и повышенных температурах; анализе и обобщении полученных результатов исследований, формулировании выводов, подготовке к публикации результатов исследований.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на:

- V Всероссийской научно-технической конференции в 2021 г., г. Москва;
- XIV Всероссийском межотраслевом молодежном конкурсе научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» в 2022 г., г. Москва.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 6 работ в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и 2 патента.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, выводов, списка использованных источников. Содержит 125 страниц машинописного текста, в том числе 38 рисунков и 27 таблицы. Библиографический список включает 134 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 на основе литературного обзора научных публикаций отображены теоретические предпосылки к разработке литейных магниевых сплавов с повышенной температурой воспламенения, описаны основные металлохимические свойства и факторы, влияющие на взаимную растворимость легирующих элементов в магнии. Приведено влияние основных легирующих компонентов на магниевые сплавы. Представлена классификация литейных магниевых сплавов и анализ мировых тенденций развития в области жаропрочных магниевых сплавов. На основе проведенного обзора сформулированы цель и задачи настоящей работы.

Во второй главе приведено описание объектов и методов исследования. В качестве объектов исследований выступали многокомпонентные композиции сплавов на основе магния, легированные цинком, цирконием, редкоземельными элементами (иттрий, неодим и гадолиний). В работе использовались методы металлографических исследований (оптической, растровой, просвечивающей микроскопий, рентгеноструктурного анализа), исследований термических (дифференциальной сканирующей калориметрии), физических (твердости, 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.

Проведение огневых испытаний требует применение специальных методик, регламентирующих процедуры подготовки, выполнения испытаний и оценки огневых характеристик. В Российской Федерации в настоящее время такие методики отсутствуют, что определило необходимость их разработки. Для этого были проанализированы зарубежные аналогичные методики оценки огнестойкости, проведен анализ их недостатков, заключающихся в необходимости сертификации нормативной документации применительно к отечественной промышленности, заканчивая требованиями к помещению и габаритам образцов.

Сущность разработанной методики заключается в воздействии на закрепленные на подложке из асбестовой ткани длинные образцы из магниевых сплавов пламени в течение 2 или 4 минут. Во время испытаний в образцы устанавливаются термопарные датчики, позволяющие осуществлять контроль температуры образца в зоне воздействия пламени. Разработанные методики обеспечивают возможность использования малоразмерных образцов, отсутствие необходимости организации специального участка, возможность проведения лабораторных исследований.

В третьей главе представлены результаты исследований закономерностей формирования структуры и свойств при комплексном легировании РЗЭ литейных магниевых сплавов системы Mg–РЗЭ–Zr. В работе для прогнозирования растворимости РЗЭ и научного обоснования выбора качественной системы легирования на основании справочных данных построены графики (рисунок 1, 2), учитывающие металлохимические свойства элементов и демонстрирующие зависимость их растворимости в магнии от данных свойств. Установлены редкоземельные элементы, обладающие высокой растворимостью и повышенной способностью образовывать с магнием широкие области твердых растворов за счет невысокой разницы атомных радиусов, не превышающей 15 %, и небольшой разницы электроотрицательности (Юм-Розери В.). По мере

увеличения различия атомных радиусов взаимодействующих металлов и электроотрицательности уменьшается способность к образованию твердых растворов и возрастает склонность к образованию соединений металлов.

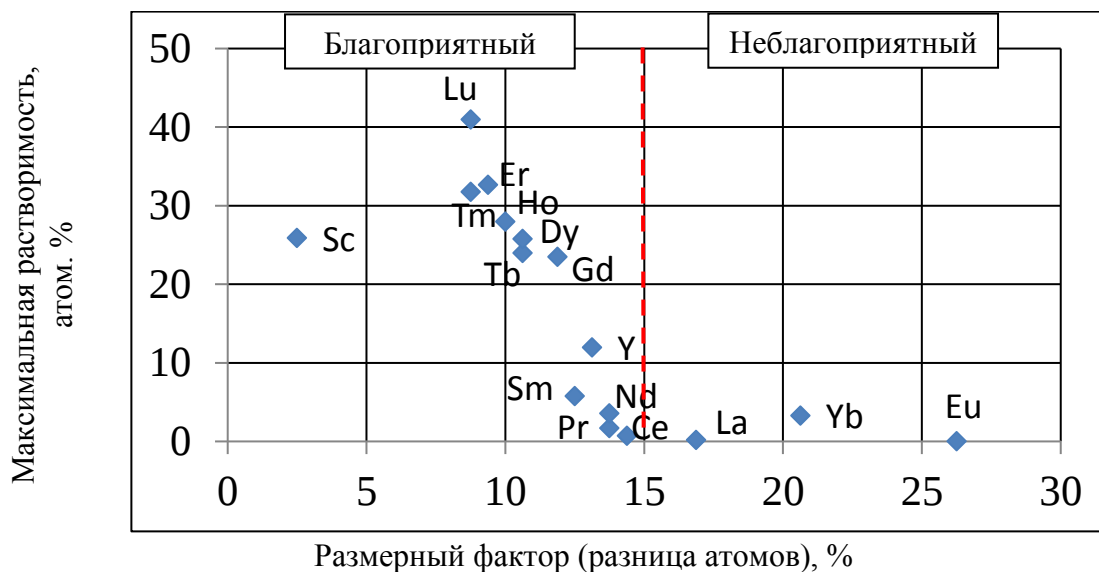


Рисунок 1. Диаграмма зависимости максимальной растворимости редкоземельных элементов в магнии

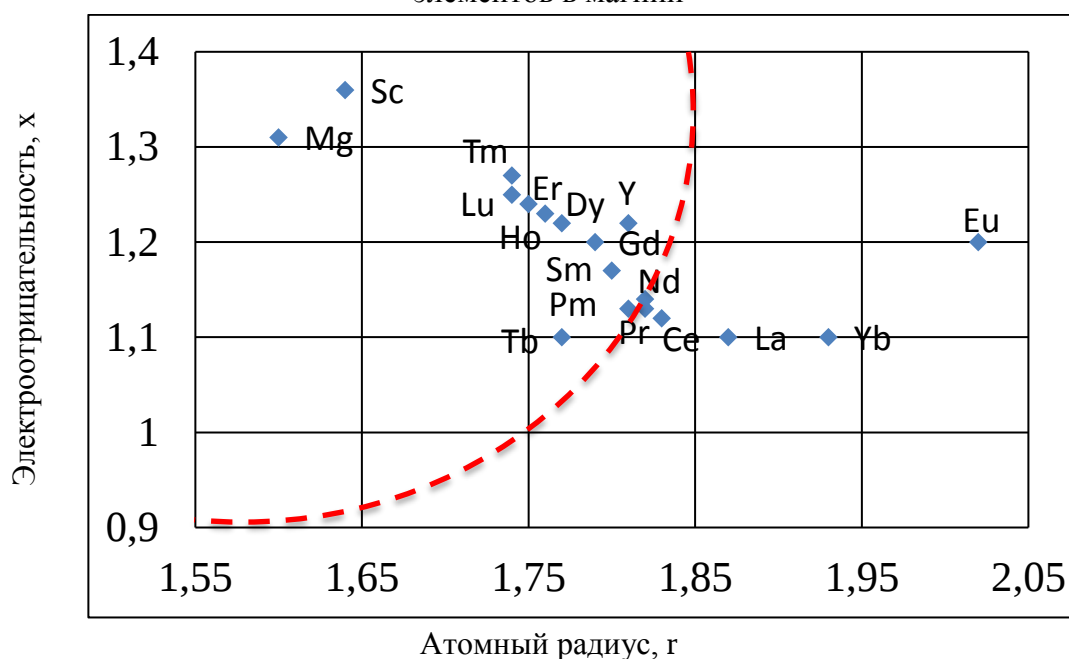


Рисунок 2. Диаграмма растворимости редкоземельных элементов в магнии

На диаграмме (рисунок 2) магний рассмотрен в качестве основного элемента и располагается в центре эллипса, который используется в качестве ограничителя растворимости. Его максимальная ширина составляет $\pm 15\%$ от величины атомного радиуса (r), а максимальная высота – $\pm 0,4$ единицы электроотрицательности. Элементы, которые обладают растворимостью в магнии больше 5 % (атом.) изображены точками, расположенными внутри границ эллипса, а элементы с меньшей растворимостью отмечены треугольниками вне границ, красными точками выделены элементы, достроенные в рамках настоящей работы.

Показано, что совокупное легирование магния редкоземельными элементами иттриевой (иттрий, гадолиний) и цериевой (неодим, церий) подгрупп приводит к повышению прочностных, жаропрочных и огневых характеристик, в то время как применение легирующих элементов преимущественно иттриевой (иттрий, гадолиний, иттербий, диспрозий, эрбий) подгруппы с добавками неодима (цериевая подгруппа) благоприятно сказывается на пластических характеристиках.

Результаты исследования приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты предварительных испытаний прочностных и жаропрочных характеристик экспериментальных композиций.

№ п/п	Наименование композиции	Режим термической обработки	Прочностные свойства			Жаропрочные свойства			T _{воспл.} , °C
			(минимальные значения)						
			20 °C			σ ₁₀₀ ²⁰⁰ , МПа	σ ₁₀₀ ²⁵⁰ , МПа	σ ₁₀₀ ³⁰⁰ , МПа	
			σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ, %				
1	Mg-1,0Zn-1,5Zr-3,0Gd- 2,8Nd-3,0Y	Закалка 535 ± 5 °C в течение 4-8 ч с охлаждением в горячей воде + старение 205 ± 5 °C в течение 8-16 ч с охлаждением на воздухе	285	180	2,50	215	120	60	939
2	Mg-1,5Zn-1,0Zr-2,0Gd- 1,5Y-0,5Cd-1,0Ce		280	190	2,70	210	130	60	904
3	Mg-1,0Zn-1,0Zr-4,0Gd- 2,5Nd-2,0Y-0,1Ce		290	190	3,40	215	125	65	898
4	Mg-0,5Zn-0,5Zr-3,0Nd- 1,5Gd-1,0Yb		270	220	1,62	180	100	43	846
5	Mg-1,0Zn-0,5Zr-4,0Nd- 2,0Gd-0,5Yb-2,0Dy		260	220	2,66	180	90	40	813
6	Mg-0,5Zn-0,5Zr-1,5Gd- 2,0Nd-1,0Er-0,5Dy-0,1Yb	охлаждением на воздухе	275	210	2,03	190	93	40	807
7	Mg-0,5Zn-0,5Zr-2,0Gd- 3,0Nd-1,5Y-0,5Er-1,0Dy		265	210	1,50	185	95	35	810

На основании предварительных испытаний для дальнейших исследований выбрана экспериментальная композиция № 3 системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr, обладающая наилучшим соотношением прочностных, жаропрочных и огневых характеристик.

С целью уточнения концентраций легирующих элементов были проведены исследования влияния основных легирующих компонентов в различных количественных соотношениях на свойства выбранной композиции, приведенные на рисунках 3 и 4, которые позволили установить влияние каждого редкоземельного элемента на показатели прочностных свойств при комнатной и повышенных температурах.

Установлено, что легирование иттрием практически не оказывает влияния на временное сопротивление, но способствует повышению предела текучести и понижению пластичности. С повышением содержания иттрия дополнительно возрастают прочностные характеристики при повышенных температурах.

Введение в расплав неодима в указанных интервалах практически не приводит к изменению механических свойств при комнатной и повышенных температурах. При содержании неодима свыше 3,2 % происходит снижение относительного удлинения.

Легирование гадолинием с повышением процентного содержания приводит к значительному улучшению прочностных характеристик при комнатной и повышенных температурах.

Дополнительно исследовалось влияние легкоплавкого элемента цинка, так как его содержание в расплаве необходимо минимизировать с целью предотвращения разупрочнения сплава при повышенных температурах. Анализ результатов показал, что при легировании цинком до 0,75 % (масс.) показатели прочности при комнатной и повышенных температурах практически не изменяются. При дальнейшем повышении его содержания наблюдается тенденция к снижению указанных характеристик.

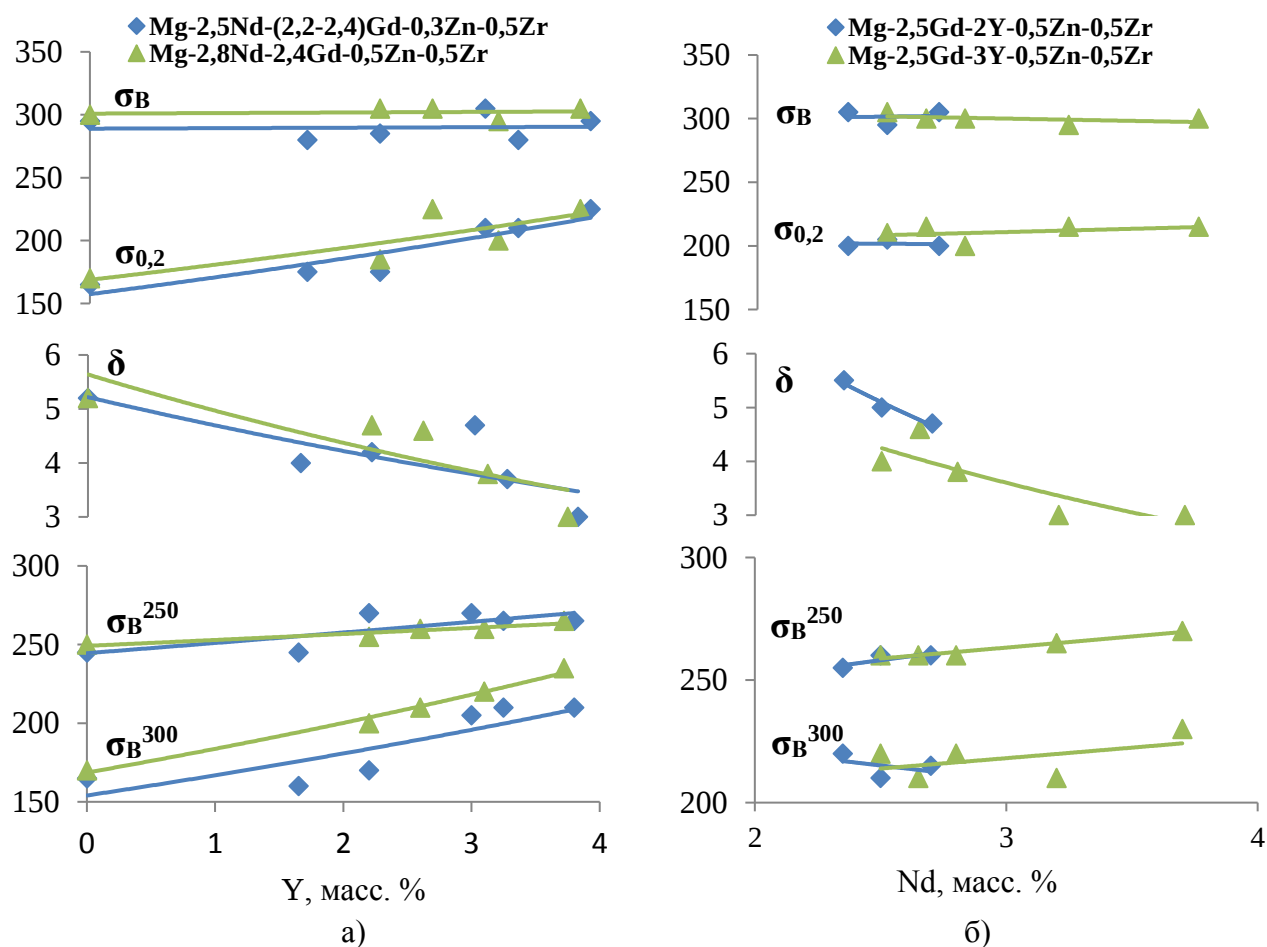


Рисунок 3. Влияние легирования РЗЭ свойства экспериментальных композиций:
а) иттрий; б) неодим

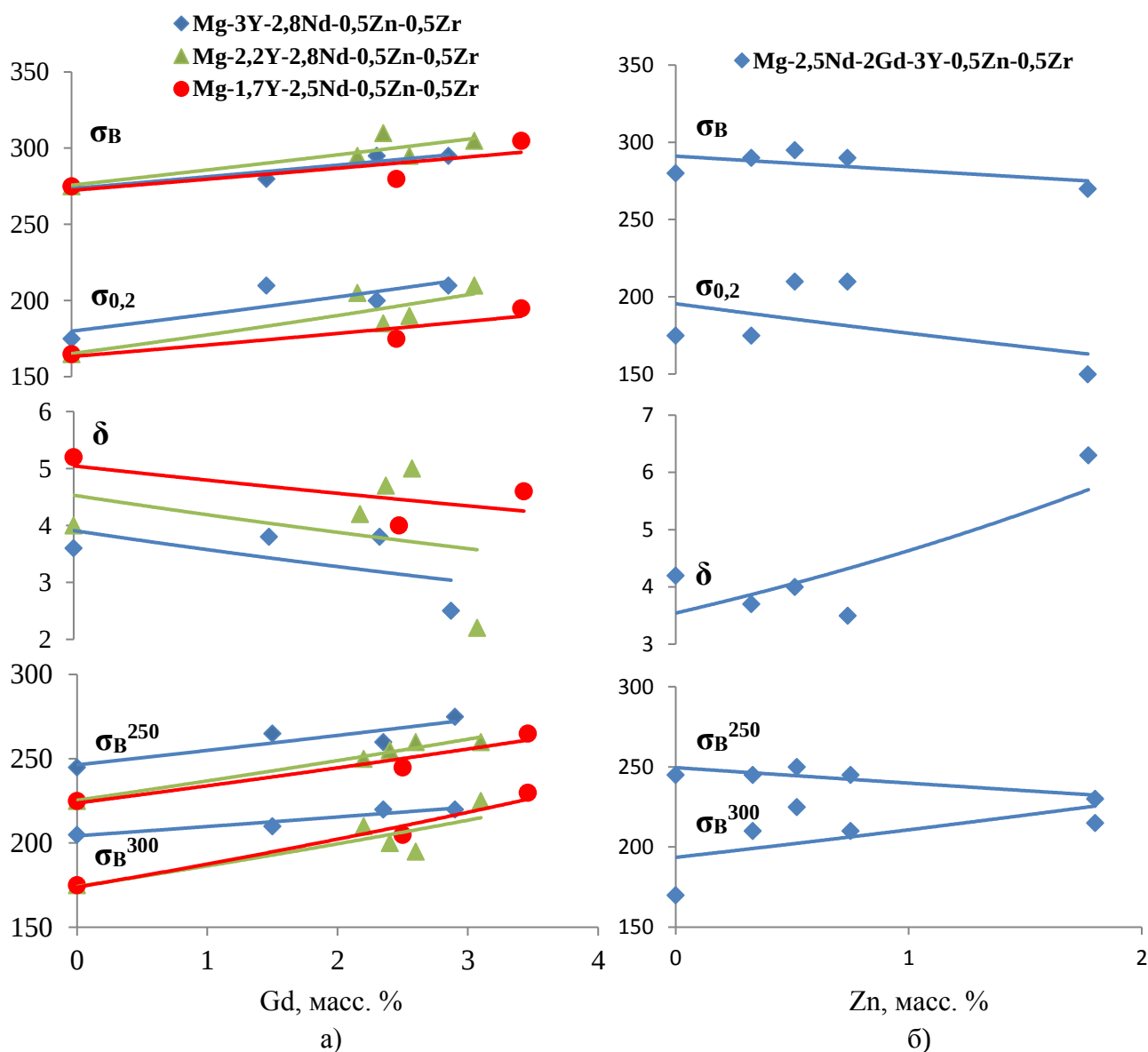


Рисунок 4. Влияние легирования РЗЭ и цинком свойства экспериментальных композиций:
а) гадолиний; б) цинк

На основании проведенных исследований и обработанных результатов разработана регрессионная модель прогнозирования по химическому составу прочностных свойств (временного сопротивления и предела текучести). Для этого использован метод многомерного регрессионного анализа, который позволил определить зависимость между несколькими переменными и предсказать значения зависимой переменной на основе значений независимых переменных. С помощью метода наименьших квадратов, который минимизирует сумму квадратов разностей между предсказанными значениями и фактическими значениями зависимой переменной, определены коэффициенты модели, необходимые в дальнейшем для прогнозирования свойств.

Проведенные расчеты позволили получить уравнения регрессии для исследуемой композиции, позволяющей прогнозировать показатели временного сопротивления (1.1) и предела текучести (1.2):

$$Y = 245,9 - 0,05 \times X_Y + 6,65 \times X_{Nd} + 9,01 \times X_{Gd} - 7,5 \times X_{Zn} + 25,6 \times X_{Zr}, K = 0,7 \quad (1.1)$$

$$Y_1 = 104,3 + 12,4 \times X_Y + 19 \times X_{Nd} + 11,9 \times X_{Gd} - 17 \times X_{Zn} - 16,3 \times X_{Zr}, K = 0,74 \quad (1.2),$$

где Y – временное сопротивление (МПа), Y_1 – предел текучести (МПа), X_Y , X_{Nd} , X_{Gd} , X_{Zn} , X_{Zr} – концентрация иттрия, неодима, гадолиния, цинка и циркония соответственно.

Из полученных уравнений видно, что на показателе временного сопротивления отрицательно сказывается иттрий и цинк, а на показателе предела текучести – цинк и цирконий, имеющие в уравнениях отрицательные коэффициенты. Пределы концентраций легирующих компонентов для данных моделей составляют: иттрия – от 0 до 3,8 масс. %, неодима – от 2,36 до 3,7 масс. %, гадолиния – от 0 до 3,46 масс. %, цинка от 0 до 1,8 масс. %, циркония от 0,42 до 0,8 масс. %.

Для определения достоверности прогнозирования временного сопротивления и предела текучести и вычисления показателя отклонения были рассчитаны значения прочностных свойств и изготовлены композиции с различным содержанием иттрия, неодима, гадолиния, цинка и циркония, представленные в таблице 2. Исследовано 5 композиций по 3 образца на каждую композицию. Технология плавки и параметры термической обработки были одинаковы для всех композиций.

Таблица 2. Прогнозируемые и фактически полученные значения прогнозируемых характеристик.

№ п/п	Содержание легирующего элемента, масс. %					Наименование характеристики			
						20 °C			
						Прогнозируемый показатель		Фактический показатель (средние значения) *	
	Y	Nd	Gd	Zn	Zr	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа
1	2,40	2,50	3,20	0,40	0,40	298,47	206,32	295,00	200,00
2	2,30	2,90	3,00	0,15	0,35	299,90	215,36	295,00	205,00
3	2,20	3,10	2,50	0,50	0,20	290,30	208,47	280,00	205,00
4	2,90	2,20	2,90	0,10	0,70	303,68	203,46	300,00	190,00
5	3,30	2,20	2,20	0,90	0,10	275,99	196,27	270,00	195,00
* Значения округлены в соответствии с требованиями ГОСТ 1497									

Обобщение результатов позволило уточнить химический состав композиции, с которой проводились последующие исследования:

1) Mg-(0,1-0,7)Zn-(0,7-1,1)Zr-(2,0-4,5)Gd-(1,0-2,9)Nd-(1,6-3,0)Y.

С целью разработки специальных режимов упрочняющей термической обработки в работе проведены комплексные исследования, заключающиеся в моделировании формирования

фазового состава и проведении дифференциальной сканирующей калориметрии, результаты которых представлены в таблице 3.

Моделирование проводилось с помощью специализированного программного обеспечения ThermoCalc. Для этого определены условия, включающие выбор редкоземельных элементов и их концентрацию, основанный на данных предварительных исследований и регрессионной модели. Ось абсцисс была выбрана как ось координат, показывающая процентное содержание гадолиния в интервале от 0 до 10 масс. % с шагом в 2 %, ось ординат – как температура от 0 до 850 °С с шагом в 50 °С.

Таблица 3. Температуры фазовых превращений композиции на основе системы Mg-P3Э-Zr

Наименование температуры, характеризующей изменение фазового состояния при нагреве		Состояние образцов		
		Литое	Закаленное	Состаренное
Температура выделения метастабильной фазы, T, °С	Моделирование (ThermoCalc)	-	-	-
	ДСК	-	220	220
Температура выделения стабильной фазы, T, °С	Моделирование (ThermoCalc)	-	-	-
	ДСК		300	-
Температура максимального растворения стабильной фазы, T, °С	Моделирование (ThermoCalc)	-	-	-
	ДСК		-	360
Температура начала плавления эвтектики, T, °С	Моделирование (ThermoCalc)	533	523	523
	ДСК	520	515	514
Температура перехода сплава в однофазное состояние, T, °С	Моделирование (ThermoCalc)	-	-	-
	ДСК	-	540	540
Температура солидус сплава, Ts, °С	Моделирование (ThermoCalc)	823	823	823
	ДСК	809	809	809
Температура ликвидус сплава, TL, °С	Моделирование (ThermoCalc)	905	905	905
	ДСК	896	897	897

Анализ полученных данных позволил установить температуры растворения эвтектической составляющей, соединений, содержащих редкоземельные элементы иттрий, неодим и гадолиний, и температуры выделения стабильной фазы, а также выявить относительно малую скорость прохождения диффузионных процессов в магнии в твердом состоянии. Исходя из анализа полученных результатов, выбраны предварительные температурно-временные параметры термической обработки, заключающиеся в выдержке при температурах 540-560 °С в течение 10 ч и старении 200-250 °С.

Температуру старения следует исследовать ниже температуры выделения стабильной фазы, что обусловлено эффектом упрочнения магниевых сплавов с P3Э, который достигается за счет

процесса торможения дислокаций теми выделениями, которые образовались при распаде пересыщенного твердого раствора. Так как выделения стабильной фазы, как правило, некогерентны матрице, вокруг них не возникают поля упругих напряжений, а расстояния между выделениями достаточно велики, поэтому дислокации под действием сравнительно небольших напряжений могут их огибать. Это значит, что выделения стабильных фаз обычно вызывают значительно более слабое упрочнение при старении, чем выделения метастабильных фаз.

Были исследованы несколько температурно-временных параметров закалки, включая высокотемпературный режим, представленные в таблице 4, и их влияние на микроструктуру, представленную на рисунке 5.

По результатам исследований установлено, что, в отличие от низкотемпературных режимов, в том числе с медленной скоростью охлаждения, проведение высокотемпературной термической обработки приводит к максимальному растворению эвтектической составляющей $Mg_3(Zn, Nd, Gd, Y)$, что благоприятно сказывается на создании пересыщенного α -твердого раствора на основе магния с неодимом, гадолинием и иттрием, распад которого при старении играет ключевую роль в упрочнении. Следует отметить, что выбранные режимы обеспечивают сохранность формы образца при воздействии критически высоких температур.

Таблица 4. Температурно-временные параметры закалки экспериментальной композиции

№ режима термической обработки	Режимы термической обработки
1	Высокотемпературная выдержка при температуре 560 °С в течение 10 часов с охлаждением в горячей воде
2	Выдержка при температуре 560 °С в течение 10 часов с охлаждением на воздухе
3	Высокотемпературная выдержка при температуре 540 °С в течение 10 часов с охлаждением в горячей воде
4	Выдержка при температуре 540 °С в течение 10 часов с охлаждением на воздухе

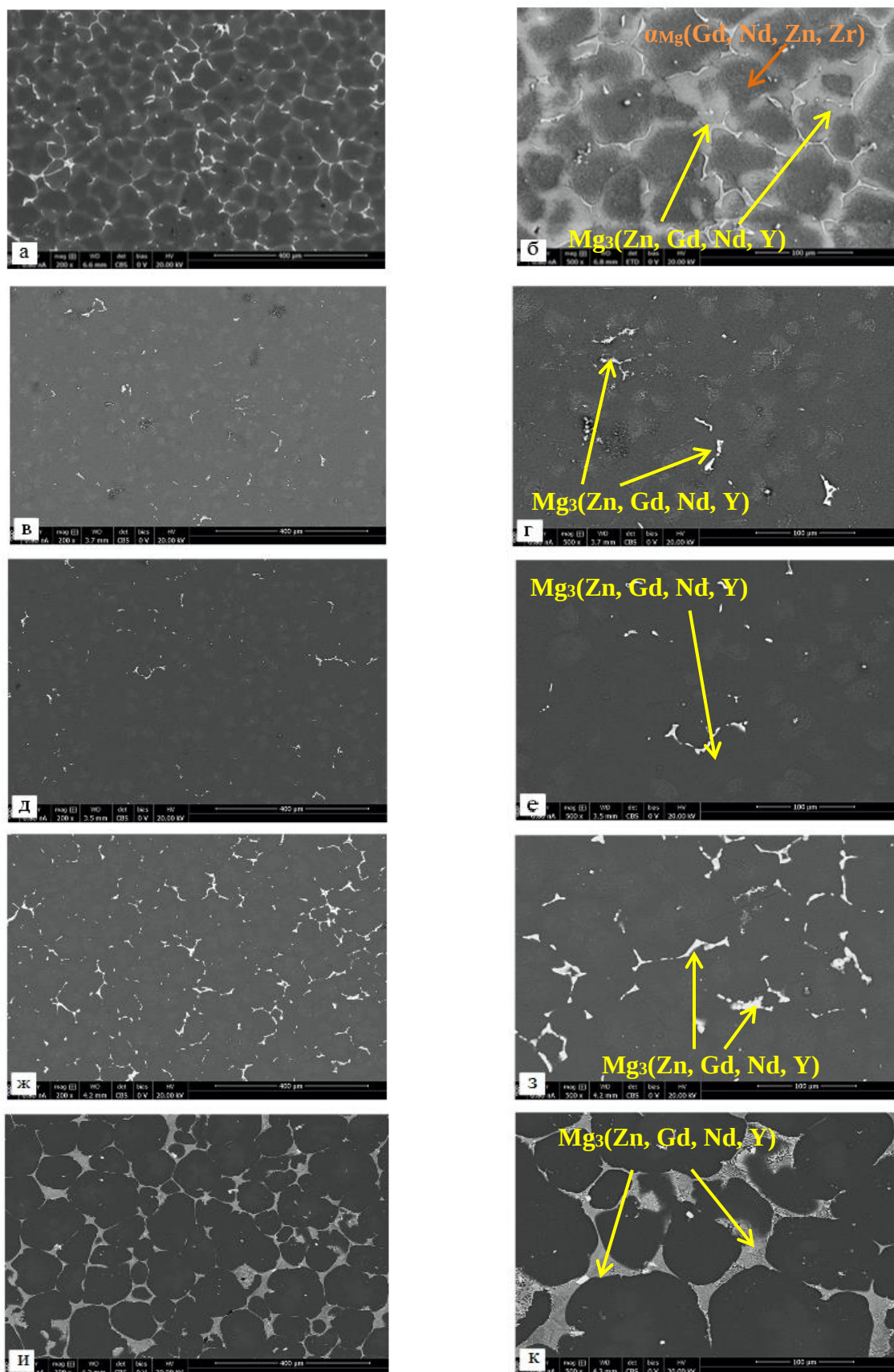


Рисунок 5. Микроструктура образца:
а, б – литое состояние; в, г – закалка по режиму №1,
д, е – закалка по режиму №2, ж, з – закалка по режиму №3,
и, к – закалка по режиму №4

На основании анализа кривой изменения ДСК сигнала в качестве температуры старения для оценки корректности выбора режимов старения в работе исследовались 200, 220 и 250 °С с варьированием времени выдержки от 1 до 50 часов. Исследования показали, что максимальная твердость для температуры 200 °С достигается при выдержке в течение 50 часов, для температур 220 и 250 °С – 10 часов. Изменение показателей твердости для исследуемых температур в зависимости от времени старения представлено на рисунке 6. Кинетика изменения прочностных характеристик представлена на рисунке 7. Установлено снижение временного сопротивления, предела текучести и относительного удлинения для каждой из температур с увеличением времени старения, начиная с 10 часов.

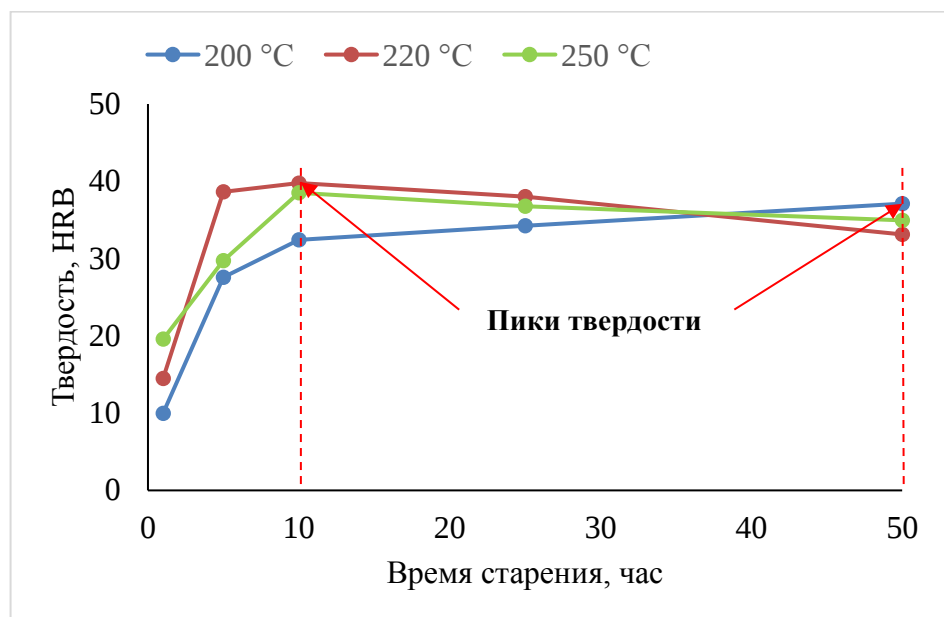


Рисунок 6. Кинетика изменения твердости литейного магниевого сплава системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr при температурах старения 200, 220 и 250 °С

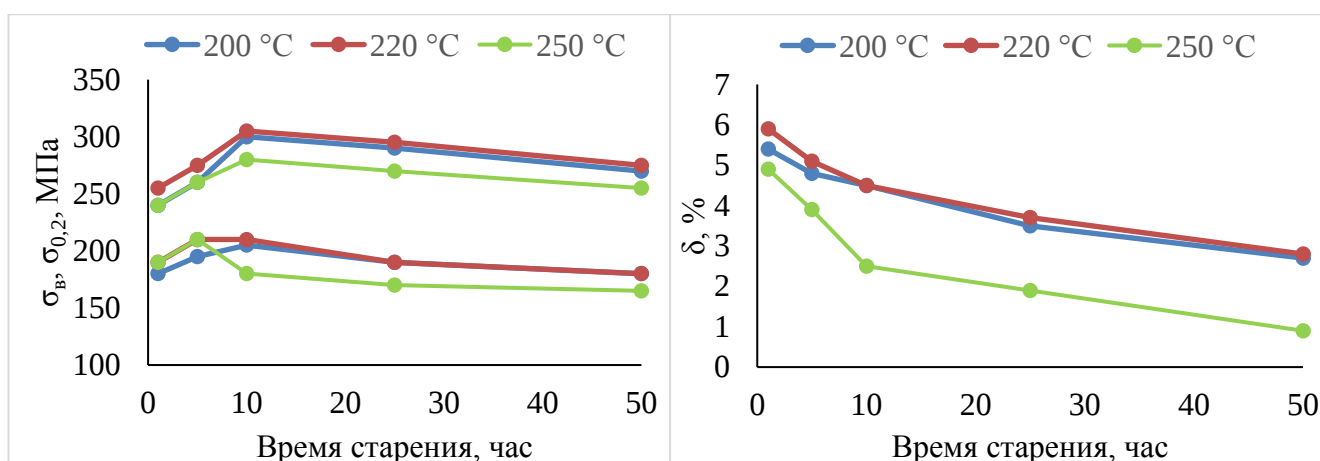


Рисунок 7. Изменение прочностных свойств литейного магниевого сплава системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr в зависимости от температурно-временных параметров старения

Зависимость изменения твердости и механических свойств от температурно-временных параметров старения представлена в таблице 5

Таблица 5. Зависимость изменения твердости и механических свойств от температурно-временных параметров старения.

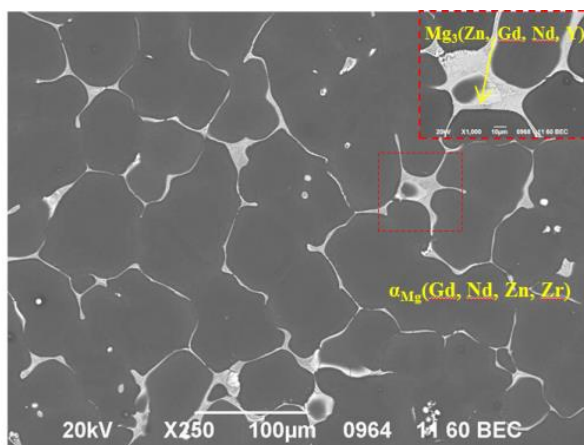
Режим старения		Механические свойства (минимальные значения)			Твердость HRB
Температура, °C	Время, ч	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	
200	1	240	180	5,4	9,97
	5	260	195	4,8	27,56
	10	300	205	4,5	32,42
	25	290	190	3,5	34,22
	50	270	180	2,7	37,10
220	1	255	190	5,9	14,47
	5	275	210	5,1	38,64
	10	305	210	4,5	39,77
	25	295	190	3,7	38,03
	50	275	180	2,8	33,11
250	1	240	190	4,9	19,56
	5	260	210	3,9	29,74
	10	280	180	2,5	38,50
	25	270	170	1,9	36,76
	50	255	165	0,9	34,94

Анализ результатов показателей прочностных характеристик, кинетика изменения которых представлена на рисунке 7, показал, что наилучшие значения достигаются для режима старения 220 °C с выдержкой в течение 10 часов.

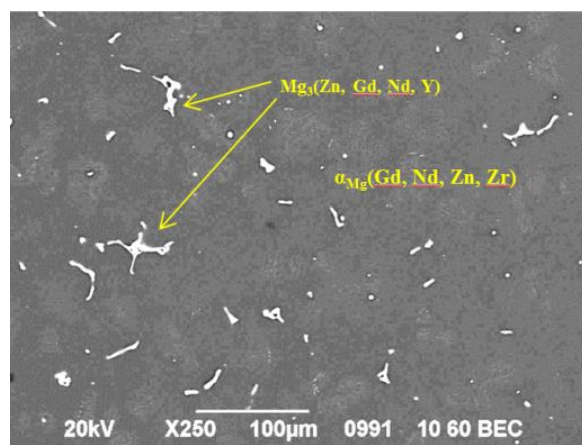
Для установления влияния легирующих элементов на процесс формирования фаз, участвующих в упрочнении сплавов на основе системы Mg-PЗЭ-Zr были проведены металлографические исследования.

Выбранный режим старения, заключающийся в выдержке при температуре 220 °C в течение 10 часов, позволяет в полной мере выявить структурные особенности.

Проведение упрочняющей термической обработки по полному технологическому циклу позволяет растворить эвтектическую составляющую $Mg_3(Zn, Nd, Gd, Y)$ и увеличить концентрацию редкоземельных элементов в твердом растворе на основе магния, способствующих созданию сложнолегированного многокомпонентного твердого раствора, обладающего повышенной стабильностью. Причем объемная доля оставшейся эвтектики по выбранному режиму термической обработки, обеспечивающему максимальное упрочнение, не превышает 15 %, что согласуется с данными по серийному сплаву МЛ10. В структуре формируются мелкодисперсные упрочняющие частицы, как по границам, так и в объеме зерен, способствующие упрочнению сплава. Результаты исследований методом растровой микроскопии представлены на рисунке 8.



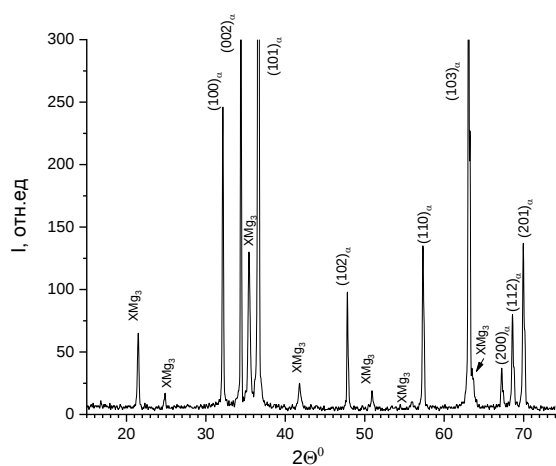
а



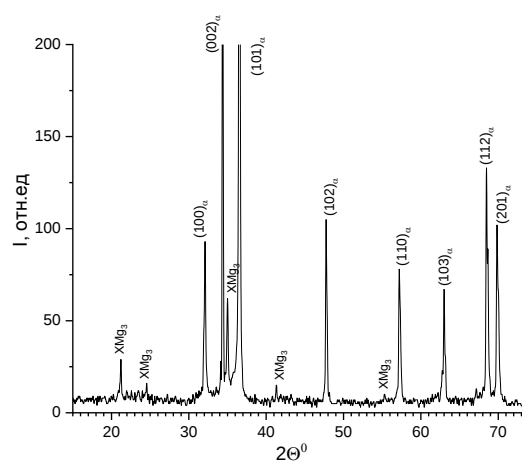
б

Рисунок 8. Микроструктура образца литейного магниевого сплава системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr в литом состоянии (а) и термообработанном (б) состояниях

Проведенные исследования рентгеноструктурным методом показали, что на полученных дифрактограммах кроме рефлексов α -твердого раствора на основе магния присутствуют отчетливые рефлексы, представленные на рисунке 9, которые соответствуют кристаллической структуре интерметаллидной фазы Mg_3X .



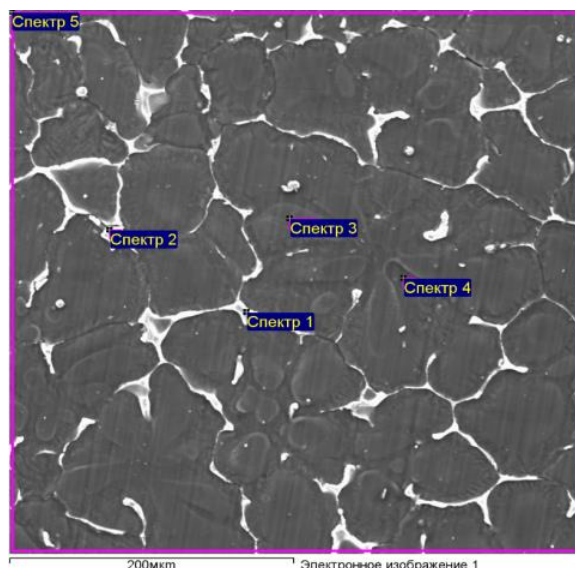
а)



б)

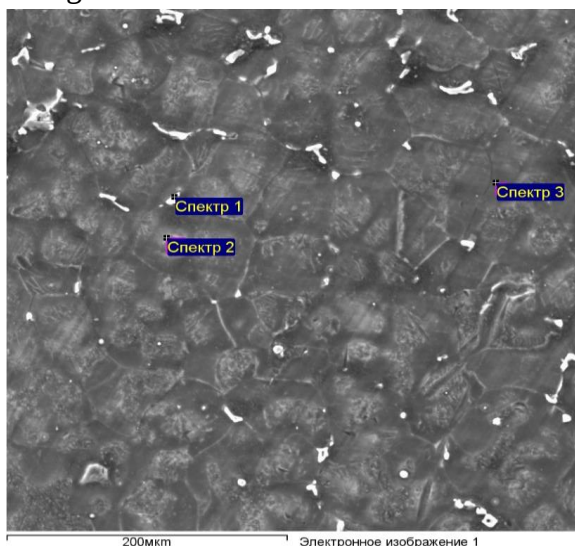
Рис.9. Дифрактограмма образца в литом (а) состоянии и после термообработки (б)

На рисунках 10 и 11 приведены результаты исследований на растровом сканирующем микроскопе FEI Verios 460 XHR в режиме обратно отражённых электронов с использованием электронно-зондового микроанализа.



Спектр	O	Mg	Zn	Y	Zr	Nd	Gd	Итого
Спектр 1	8.15	37.70	16.43	2.82	0.34	21.69	12.86	100.00
Спектр 2	8.34	26.81	21.63	3.55	0.37	25.17	14.12	100.00
Спектр 3	3.24	93.50	0.74	0.05	1.71	0.26	0.49	100.00
Спектр 4	3.59	92.95	0.91	0.40	0.21	0.67	1.25	100.00
Спектр 5	3.80	89.31	1.98	0.37	0.78	2.03	1.73	100.00
Среднее	5.43	68.05	8.34	1.44	0.68	9.97	6.09	

Рисунок 10. Микроструктура в обратно отраженных электронах и результаты электронно - зондового микроанализа литейного магниевого сплава системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr в литом состоянии



Спектр	O	Mg	Al	Ca	Zn	Y	Zr	Nd	Gd	Итого
Спектр 1	14.81	66.99	0.58	0.72	1.80	3.06	0.25	5.63	6.15	100.00
Спектр 2	3.01	87.71	0.00	0.02	1.24	0.87	2.10	2.09	2.95	100.00
Спектр 3	4.79	87.01	0.00	0.00	0.77	1.04	0.24	2.43	3.72	100.00
Макс.	14.81	87.71	0.58	0.72	1.80	3.06	2.10	5.63	6.15	
Мин.	3.01	66.99	0.58	0.00	0.77	0.87	0.24	2.09	2.95	

Рисунок 11. Микроструктура в обратно отраженных электронах и результаты электронно – зондового микроанализа литейного магниевого сплава системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr после термообработки

Из результатов микроанализа установлено, что данная фаза содержит магний, цинк, неодим, гадолиний. Наличие большой доли цинка объясняет пониженную в сравнении с интерметаллидными соединениями NdMg_3 (7,39 Å) и GdMg_3 (7,33 Å) величину периода решетки интерметаллидной фазы XMg_3 (7,170-7,231 Å), поскольку атомный радиус цинка (1,37Å) значительно меньше не только любых РЗЭ (1,74-1,87 Å), но и самого магния (1,6 Å). Периоды решетки α -твердого раствора на основе магния, представленные в таблице 6, превышают периоды решетки чистого магния, в особенности это касается периода решетки a_α . Это свидетельствует о том, что в твердом растворе растворены РЗЭ, радиусы атомов которых значительно превышают радиус атома магния.

Таблица 6. Периоды решетки α -твердого раствора и интерметаллидной фазы XMg_3

Образец	Объемная доля XMg_3	Периоды решетки			c/a
		XMg_3	a_α	c_α	
	Отн.ед	Å			Отн.ед
Mg	-	-	3,208	5,210	1,624
NdMg ₃	-	7,39	-	-	
GdMg ₃	-	7,33	-	-	
Экспериментальные значения					
Литое	1	7,170	3,213	5,207	1,621
После ТО	0,38	7,231	3,216	5,213	1,621

Проведение термической обработки способствует увеличению периода решетки твердого раствора, что свидетельствует об увеличении в нем содержания РЗЭ и об обеспечении эффекта твердорастворного упрочнения.

Также существует эффект упрочнения за счет выделения наноразмерных интерметаллидных фаз. Из приведенных на рисунке 9 дифрактограмм следует, что интенсивность рефлексов интерметаллидной фазы Mg_3X существенно снижается в результате термообработки. Однако полученная в обратно отраженных электронах микроструктура образца, представленная на рисунке 11, показывает, что термообработка приводит к принципиальному изменению морфологии выделений интерметаллидов, которые рассредоточиваются в теле зерна, что приводит к значительному упрочняющему эффекту, при этом большая часть интерметаллидов становится рентгеноаморфной, о чем свидетельствует резкое снижение интенсивности интерметаллидных рефлексов. В этом плане эффективность термообработки оценивается по максимальному снижению интенсивности дифракционных линий интерметаллидных частиц.

Методом просвечивающей электронной микроскопии исследовалось атомное строение сплава системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr. Комплексное легирование редкоземельными элементами в совокупности с выбранным режимом термической обработки позволяет создать сложную структуру, содержащую одновременно три группы интерметаллидов: упрочняющие фазы β типа, γ типа и интерметаллиды циркония. В структуре одновременно присутствует 7 метастабильных фаз - β_{H} , β_{T} , β'' , β' , β_1 , γ' , γ'' , HAADF-STEM изображения (hcr $a = 0.321 - 0.327$ nm, $c = 0.51$ nm), которые представлены на рисунках 11-15. Причем их количественное соотношение меняется в зависимости от времени выдержки. Основными для исследуемого режима термической обработки фазами являются β_{T} , β' фазы, выделения типа $[\beta_{\text{T}}/\beta_1]$ и $[\beta_{\text{T}}/\beta_1/\beta']$.

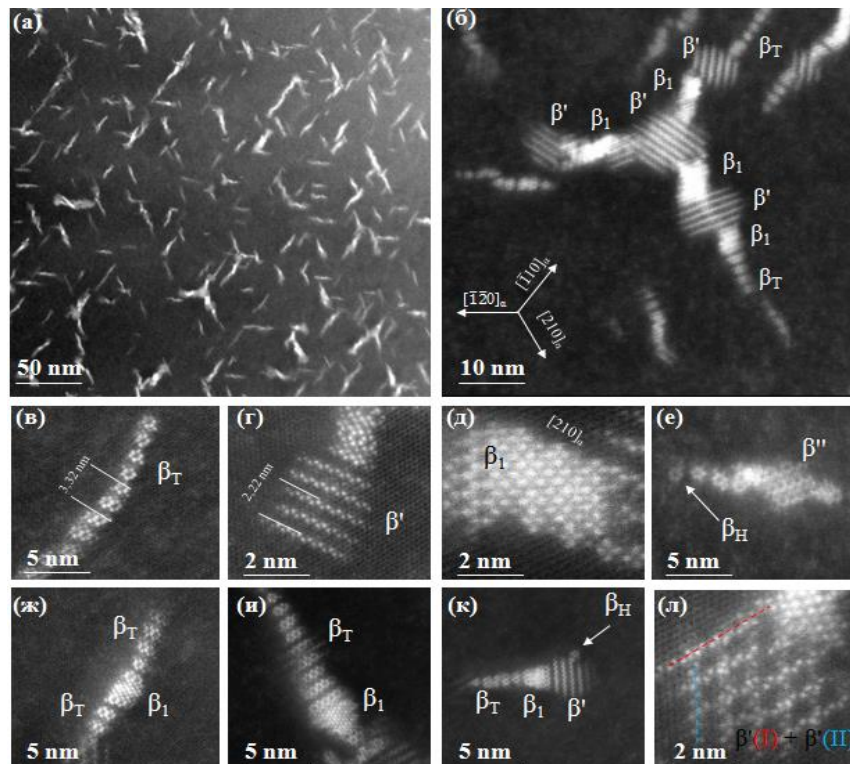


Рисунок 12. HAADS-STEM изображения метастабильных фаз в литейном магниевом сплаве системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr после термической обработки с параметрами старения 220 °C в течение 10 часов ($[001]_{\alpha}$):

- а) общий вид; б), ж), и), к) наиболее распространенные в структуре выделения;
- в), г), д), е) кристаллическая структура β'' , β_T , β' , β_1 фаз;
- л) перекрытие двух β' фаз, ориентированных в двух направлениях α -Mg

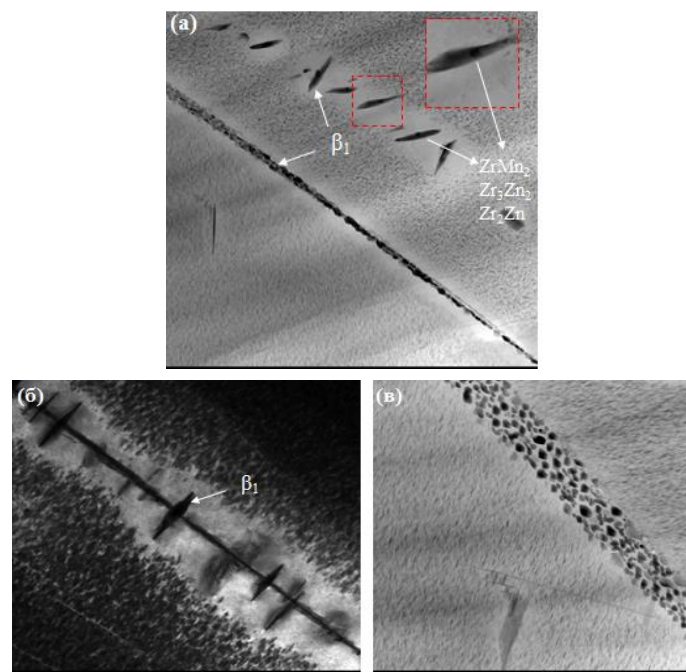


Рисунок 13. Фаза β_1 в литейном магниевом сплаве системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr после термической обработки с параметрами старения 220 °C в течение 10 часов:

- а) скопления пластин β_1 , растущих на частицах типа $ZrMn_2$;
- б) зона, свободная от выделений, вблизи крупноразмерной β_1 -фазы;
- в) сетка частиц β_1 -фазы на границе зерна

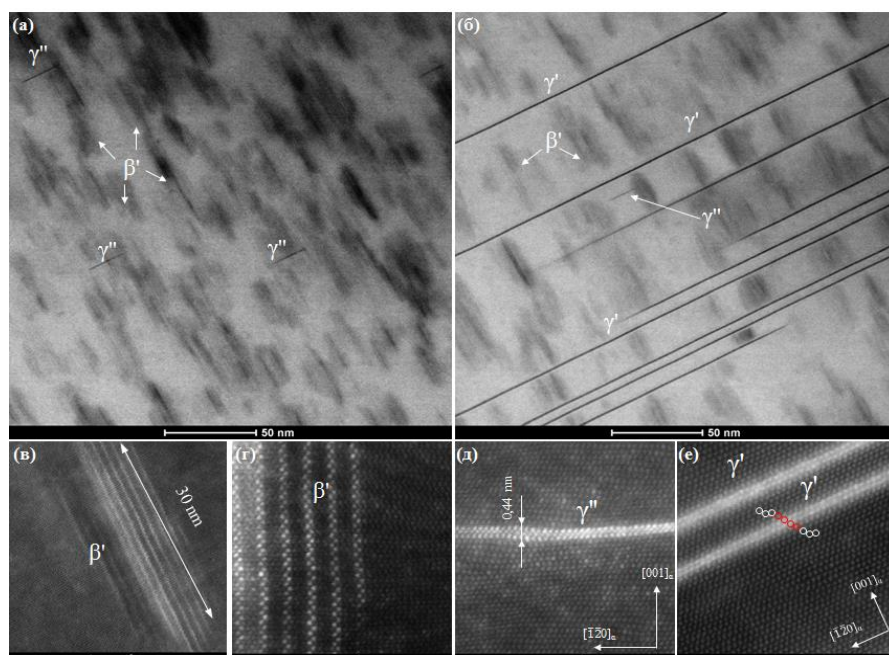


Рисунок 14. Метастабильные β' , γ' и γ'' фазы в литейном магниевом сплаве системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr после термической обработки с параметрами старения 220 °C в течение 10 часов ($[100]_{\alpha}$):

- а) общий вид; б) область с высоким содержанием γ' ;
в), г), д) е) кристаллическая структура β' , γ' и γ''

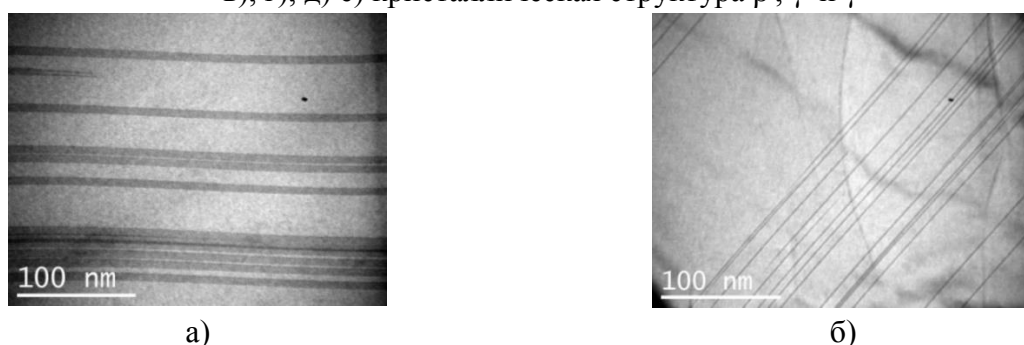


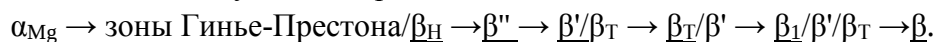
Рисунок 15. LPSO-фаза в объеме зерна в литом (а) и термообработанном (б) состояниях

Проведенные исследования позволили установить последовательность фазовых превращений. В процессе старения основными упрочняющими выделившимися фазами являлись метастабильные фазы β типа, центрами зарождения которых являются зоны Гинье-Престона. При повышении времени выдержки происходит повышение показателя твердости из-за роста указанных фаз. Практически полное отсутствие при исследуемом времени выдержки β_H и β'' фаз говорит о их росте и превращении в являющиеся основными для данного состояния сплава β' и β_T фазы. В структуре также формируются сложные структуры типа $[\beta_T/\beta_1]$ и $[\beta_T/\beta_1/\beta']$.

В указанных фазах происходит перераспределение растворенных элементов, продолжается рост β_1 (Mg_3PZ_3) фазы за счет растворения в ней таких модификаций как β'' (Mg_3PZ_3), β' (Mg_7PZ_3), β_T (Mg_5PZ_3), β_H (единичный упорядоченный агломерат атомов PZЭ) ввиду того, что частицы с большей поверхностной энергией имеют больший химический потенциал. Это приводит к тому, что растворенные молекулы переносятся на эти частицы, увеличивая их размер. В конечном итоге при дальнейшем увеличении времени выдержки при старении фаза β_1 образует β (Mg_5PZ_3) фазу. Отмечены так же два механизма зарождения фазы β_1 – гомогенный (наноразмерные выделения) и гетерогенный (крупные выделения). Гетерогенный

характер зарождения обусловлен присутствием интерметаллидов циркония ($ZrMn_2$, Zr_3Zn_2 и Zr_2Zn), служащих центрами кристаллизации, и способствует ускоренному росту пластин крупной β_1 фазы.

Таким образом, последовательность фазовых превращений в литейных магниевых сплавах Mg-PЗЭ-Zr выглядит следующим образом:



Вторая группа фаз, γ типа, образуется в сплавах Mg-PЗЭ с дополнительным содержанием цинка. Фаза γ' представляет собой единичные блоки LPSO фаз в виде длинных пластин, фаза γ'' представлена короткими пластинами толщиной в одну элементарную ячейку. LPSO фазами являются так называемые твердые растворы с упорядоченной структурой дальнего порядка, или нанодисперсные длиннопериодные фазы, характеризующиеся наличием чередующихся в определенном порядке слоёв с различным содержанием цинка и иттрия. Их наличие формирует сеть пластин, упрочняющую микрообъем каждого зерна, что является фактором дополнительного упрочнения.

Проведенные микроструктурные исследования позволили установить, что повышенные прочностные и жаропрочные характеристики литейных магниевых сплавов системы Mg-PЗЭ-Zr в первую очередь обусловлены наличием большого числа упрочняющих фаз β и LPSO типов.

По разработанным методикам огневых испытаний были проведены испытания литейного сплава системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr в сравнении с серийным сплавом МЛ10 системы Mg-Nd-Zn-Zr, процесс испытаний приведен на рисунках 16 и 17. По результатам испытаний установлено, что температура воспламенения литейного магниевого сплава Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr составила от 805 до 930 °С. В процессе проведения огневых испытаний образец сплава системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr мгновенно покрывался защитной окисной пленкой, препятствующей взаимодействию с кислородом. Тем самым, образец не выгорал, а «скручивался», максимально сохраняя массу, потеря которой не превышала 0,4 %. В случае с серийным магниевым сплавом МЛ10, горение продолжалось до полного расплавления зоны воздействия пламени, образующийся на поверхности слой окислов был не способен предотвратить контакт атомов магния с кислородом воздуха, что и приводило к полному выгоранию образца в месте воздействия пламени. Потеря массы составляла до 20 %.

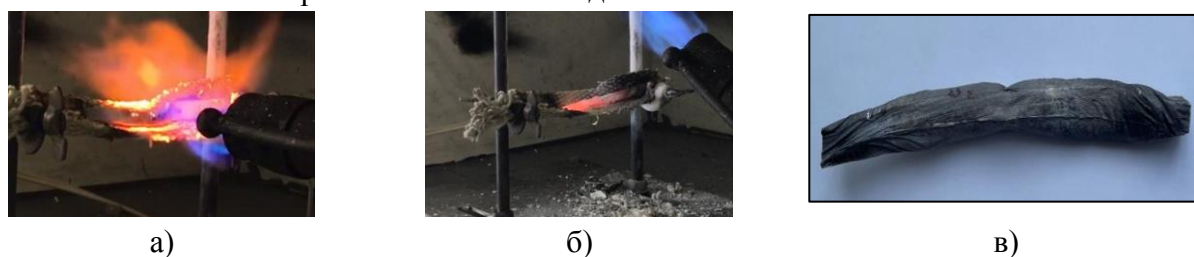


Рисунок 16. Сплав Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr в процессе испытаний:

а) в процессе воздействия пламени; б) после возгорания; в) образец после испытания

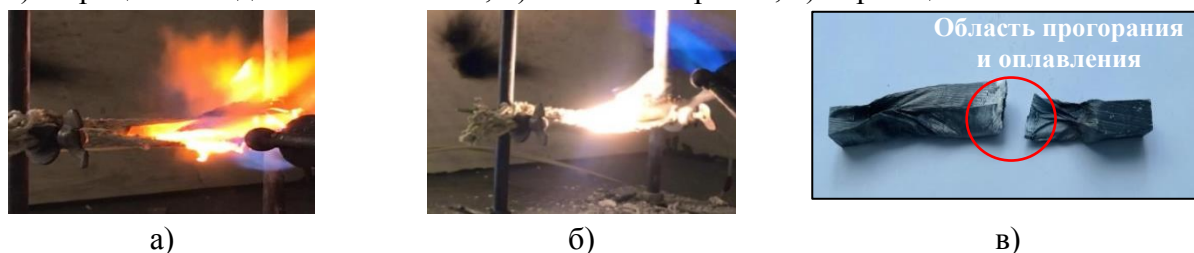


Рисунок 17. Сплав МЛ10 в процессе испытаний:

а) в процессе воздействия пламени; б) после возгорания; в) образец после испытаний

Выводы

1. Установлены редкоземельные элементы (Sc, Lu, Er, Tm, Ho, Dy, Gd, Tb, Y, Sm, Nd), обладающие высокой растворимостью и повышенной способностью образовывать с магнием широкие области твердых растворов за счет невысокой разницы атомных радиусов, не превышающей 15 %, и небольшой разницы электроотрицательности (Юм-Розери В.).

2. Установлено качественное (Y, Nd, Gd) и количественное (до 10 масс. %) соотношение легирующих редкоземельных элементов, обладающих совокупностью благоприятных металлохимических (размерным фактором ($\leq 15\%$), электроотрицательностью ($\leq 0,2$)) факторов по отношению к магнию, способствующих формированию устойчивого состояния кристаллической решетки, при котором достигается максимальное для системы упрочнение твердого раствора.

3. Разработаны регрессионные модели прогнозирования по химическому составу прочностных свойств (временное сопротивление и предел текучести) магниевых сплавов системы Mg-PЗЭ-Zn-Zr, где в качестве ПЗЭ выступают иттрий, неодим и гадолиний.

4. Исследовано влияние температурно-временных параметров термической обработки на физико-механические характеристики пожаробезопасного литейного магниевых сплава системы Mg-PЗЭ-Zr и показано, что оптимальным режимом термической обработки, обеспечивающим максимальное упрочнение ($\sigma_B \geq 300$ МПа), является: высокотемпературная выдержка при температуре 560 °С в течение 10 ч с последующим старением при температуре 220 °С в течение 10 ч.

5. Установлено, что легирование магния редкоземельными элементами, а также цинком и цирконием, в совокупности с разработанным режимом термической обработки обеспечивает формирование в структуре β ($\beta_H, \beta'', \beta_T, \beta', \beta_1$) и сложносоставных выделений типа $[\beta_T/\beta_1]$ и $[\beta_T/\beta_1/\beta']$, а также LPSO фаз, представленных как единичными блоками γ' и γ'' фаз, так и сеткой параллельных друг другу наноразмерных пластин на их основе, содержащих различное количество слоев, обогащенных иттрием и цинком.

6. Установлена последовательность фазовых превращений фаз, протекающих в процессе термической обработки в магниевых сплавах системы Mg-PЗЭ-Zr, имеющая следующий вид: $\alpha_{Mg} \rightarrow \text{зоны Гинье-Престона} / \beta_H \rightarrow \beta'' \rightarrow \beta' / \beta_T \rightarrow \beta_T / \beta' \rightarrow \beta_1 / \beta' / \beta_T \rightarrow \beta$.

7. Установлено, что интерметаллиды на основе циркония ($ZrMn_2$, Zr_3Zn_2 и Zr_2Zn) служат центрами гетерогенного зарождения метастабильной β_1 и последующего ускоренного роста пластин, размер которых достигает 500 нм (при гомогенном зарождении размер фаз составляет до 5 нм), формирующих вокруг себя зоны, свободные от выделений шириной до 400 нм, разупрочняющие твердый раствор, в том числе вблизи границ зерен.

8. Разработаны и проведена общая квалификация (паспортизация) пожаробезопасного и жаропрочного литейных магниевых сплавов системы Mg-PЗЭ-Zr марок ВМЛ26 и ВМЛ25, обладающие высокими прочностными ($\sigma_B \geq 270 \dots 300$ МПа), жаропрочными ($\sigma_{100}^{250} \geq 100$ МПа, $\sigma_{100}^{300} \geq 40$ МПа) и огневыми ($T_{\text{воспл.}} = 800 \dots 1000$ °С) свойствами в сравнении с серийными магниевыми сплавами и зарубежными аналогами ($\sigma_B = 220 \dots 230$ МПа, $\sigma_{100}^{250} = 69 \dots 113$ МПа, $\sigma_{100}^{300} = 24,5 \dots 59$ МПа, $T_{\text{воспл.}} = 700 \dots 800$ °С).

**Основные результаты диссертации отражены в следующих работах,
опубликованных в журналах, входящих в перечень ВАК:**

1. **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-PЗМ-Zr // *Металлы*. 2023. № 1. С. 16-22.
2. 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.
3. **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.
4. 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.
5. Е.Н. Каблов, М.В. Акинина, Е.Ф. Волкова, И.В. Мостяев, **А.А. Леонов**. Исследование особенностей фазового состава и тонкой структуры литейного магниевого сплава МЛ9 в литом и термообработанном состояниях // *Авиационные материалы и технологии*. № 2 (59). 2020.
6. Фролов А.В., Мухина И.Ю., **Леонов А.А.**, Уридия З.П. Влияние легирования редкоземельными металлами на свойства и структуру литейного магниевого сплава экспериментального состава системы Mg-Zr-Zn-Y-Nd // *Труды ВИАМ*. 2016. № 3 (39). С.3.

Другие публикации, в том числе патенты:

7. Мостяев И.В., Трофимов Н.В., Леонов А.А. Магниевые сплавы нового поколения с повышенной температурой воспламенения для элементов внутреннего набора планера // В книге: Молодежь и будущее авиации и космонавтики. Сборник аннотаций конкурсных работ XIV Всероссийский межотраслевой молодежный конкурс научно-технических работ и проектов. Москва. 2022. С. 193-195.
8. 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.
9. Патент № 2562190 «Сплав на основе магния».
10. Патент № 2753660 «Пожаробезопасный высокопрочный литейный магниевый сплав».

Отпечатан 1 экз.
Исп. А.А. Леонов
Печ. А.А. Леонов

Автореферат А.А. Леонова

«Литейные магниевые сплавы системы Mg-PЗЭ-Zr с повышенной температурой воспламенения»

Подписано в печать 2023 г. Заказ ...
Формат бумаги 60 × 90/16. Печ. л 1. Тираж 100 экз.
Отпечатано в типографии НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.
105005, г. Москва, ул. Радио, 17.