

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ

С.В. Яковлев

«30»

04

2026 г.

М.П.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного унитарного предприятия
«Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных
материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский
институт»

Диссертация Дуюновой Виктории Александровны на тему «Научно-технологические основы разработки высокопрочных жаропрочных литейных магниевых сплавов нового поколения с повышенной пожарной безопасностью» выполнена в лаборатории № 624 «Магниевые и литейные алюминиевые сплавы» научно-исследовательского отделения «Титановые, магниевые, бериллиевые и алюминиевые сплавы» федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ).

В период подготовки диссертации Дуюнова Виктория Александровна работала в федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ) в должности начальника лаборатории № 624

«Магниевого и литейного алюминиевого сплавы» и начальника научно-исследовательского отделения «Титановые, магниевые, бериллиевые и алюминиевые сплавы».

Дуюнова Виктория Александровна, 1980 года рождения в 2002 году окончила «МАТИ» – Российский Государственный Технологический Университет им. К.Э. Циолковского по специальности «Стандартизация и сертификация». Диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Новые составы и технология получения противопригарных присадочных материалов для производства магниевого литья, применительно к изделиям авиакосмической техники» защитила в 2008 году и решением диссертационного совета, созданного на базе федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», присуждена ученая степень кандидата технических наук по научной специальности 05.02.01 «Материаловедение (в машиностроении)», решение № 2/37-б от 14.10.2008 г. Решением Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации №2к/97 от 23.01.2009 г. выдан диплом кандидата технических наук серия ДКН № 074299. В 2024 году согласно Распоряжения Правительства Российской Федерации от 28.10.2024 № 3026-р присуждена премия Правительства Российской Федерации в области науки и техники за разработку и внедрение наукоемких промышленных технологий литья и технологических процессов изготовления корпусных отливок для зенитных управляемых ракет типа 48Н6 и 40Н6 из магниевых сплавов.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы. Область диссертационного исследования Дуюновой Виктории Александровны включает теоретические и экспериментальные исследования процессов структурообразования магниевых сплавов системы Mg-PZM-Zr при легировании редкоземельными элементами и последующей термической обработки; разработку и верификацию методов и методик исследования огневых (температуры воспламенения, времени остаточного

горения) испытаний магниевых сплавов; разработку математических моделей второго порядка прогнозирования механических характеристик многокомпонентных магниевых сплавов системы Mg-PЗМ-Zr; установление последовательности фазовых превращений и образования комплекса метастабильных фаз в зависимости от параметров термической обработки; разработку технологических параметров плавки, литья и ремонтных технологий, включая составы порошковых композиций, предназначенных для устранения литейных дефектов. В диссертационной работе Дуюновой В.А. обобщены и систематизированы результаты многолетних исследований и разработок автора в области высокопрочных жаропрочных литейных магниевых сплавов с повышенной температурой воспламенения, исследования механизмов и разработок методик и концепции оценки на их основе огневых характеристик.

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации заключается 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.

Степень достоверности результатов проведенных исследований. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается применением комплекса современного аттестованного оборудования и методик исследований, метрологической обеспеченностью оборудования, большим объёмом экспериментальных данных и их статистическим анализом. Достоверность результатов работы подтверждается согласованностью полученных данных и выявленных зависимостей с общими теоретическими представлениями о высокопрочных жаропрочных литейных магниевых сплавах, легированных редкоземельными элементами, с повышенной температурой

воспламенения и результатами исследований в данной области, известными из литературных источников.

Новизна результатов проведенных исследований.

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 твердого 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 проведенных исследований.

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.).

Ценность научных работ соискателя.

Работы соискателя имеют существенное значение для развития научного направления высокопрочных жаропрочных магниевых сплавов с повышенной пожарной безопасностью, поскольку позволяют повысить температуру воспламенения магниевых сплавов и расширить область их применения в узлах, работающих при повышенных температурах для обеспечения весовой эффективности конечных изделий, в частности, в двигателестроении.

Практическая ценность исследований определяется в первую очередь возможность применения разработанных методов оценки огневых испытаний для магниевых сплавов, позволяя оценивать их огневые характеристики, а также математических моделей для прогнозирования свойств многокомпонентных магниевых сплавов системы Mg-Y-Gd-Nd-Zn-Zr, позволяя существенно сократить этап экспериментальных исследований. Кроме того, разработанные подходы ремонтных технологий позволяют обеспечивать возврат в производство дорогостоящих отливок из магниевых сплавов, содержащих редкоземельные элементы.

Соответствие пунктам паспорта научной специальности.

Тема и содержание работы полностью соответствует выбранной научной специальности 2.6.1. – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов и соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности:

П 1. Изучение взаимосвязи химического и фазового составов (характеризуемых различными типами диаграмм, в том числе диаграммами состояния) с физическими, механическими, химическими и другими свойствами сплавов.

П 3. Теоретические и экспериментальные исследования влияния разнородных структур, в том числе кооперативного, на физические, химические, механические, технологические и эксплуатационные свойства металлов и сплавов, их моделирование и прогнозирование.

П 7. Изучение взаимодействия металлов и сплавов с внешними средами в условиях работы различных технических устройств, оценка и прогнозирование на этой основе работоспособности металлов и сплавов.

П 8. Исследование работоспособности металлов и сплавов в различных условиях, выбор и рекомендация наиболее экономичных и надежных металлических материалов для конкретных технических назначений с целью сокращения металлоемкости, увеличения ресурса работы, повышения уровня заданных физических и химических характеристик деталей машин, механизмов, приборов и конструкций.

П 9. Разработка новых принципов конструирования и моделирования структур сплавов (включая создание технологий их получения), обладающих заданным комплексом свойств, в том числе для работы в экстремальных условиях.

П 11. Определение механизмов влияния различных механических, тепловых, магнитных и других внешних воздействий на структуру металлических материалов и разработка на этой основе новых методик их испытаний, обеспечивающих надежное работоспособности конструкций.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.

Основные результаты диссертационной работы Дуюновой В.А. опубликованы в 23 научных работах в рецензируемых журналах, из которых 15 включены в перечень ВАК при Минобрнауки России для публикации основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени доктора наук, и

научных изданиях, индексируемых в международных базах данных, 5 патентов Российской Федерации и подана 1 заявка на изобретение.

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-PЗМ-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. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. 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-РЗМ-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-РЗМ-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 магниево-циркониевых сплавов. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Мухина И.Ю., Дуюнова В.А., Уридия З.П. Заявка № 2015115687/02 от 27.04.2015;

Заявка на изобретение:

21. Пат. 2862591 Российская Федерация, СПК 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;

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.

Текст диссертации был проверен на использование заимствованного материала без ссылки на авторов и источники заимствования. После исключения всех корректных совпадений иных заимствований не обнаружено.

Диссертационная работа Дуюновой Виктории Александровны рекомендуется к публичной защите на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Заключение принято на совместном заседании научно-исследовательских отделений «Полимерные композиционные материалы и технологии их переработки», «Функциональные материалы и технологии синтеза» и «Титановые, магниевые, бериллиевые и алюминиевые сплавы»

Присутствовало на заседании – 49 человека, из них докторов наук – 5, кандидатов наук – 21, в том числе с правом голоса – 22.

Результаты голосования: «за» – 22, «против» – 0, «воздержались» – 0.

Протокол № 17/1 от «30» апреля 2026 г.

Председательствующий на заседании:

Начальник НИО «Полимерные композиционные материалы и технологии их переработки», начальник НИО «Функциональные материалы и технологии синтеза» д.т.н.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized loop followed by a horizontal line and a diagonal stroke.

Славин
Андрей
Вячеславович