

ОТЗЫВ

**официального оппонента Гречникова Федора Васильевича
на диссертационную работу Дуюновой Виктории Александровны
«Научно-технологические основы разработки высокопрочных
жаропрочных литейных магниевых сплавов нового поколения с
повышенной пожарной безопасностью», представленную на соискание
ученой степени доктора технических наук по специальности
2.6.1. – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов**

Актуальность темы диссертации

Современное развитие авиационной техники в значительной степени определяется необходимостью одновременного повышения энергетической эффективности, надежности и безопасности летательных аппаратов. Снижение массы конструкций остается одним из наиболее действенных способов улучшения их тактико-технических характеристик, уменьшения расхода топлива и увеличения полезной нагрузки. В связи с этим разработка и внедрение легких конструкционных материалов с повышенным комплексом эксплуатационных характеристик является одним из важных направлений современного авиационного материаловедения.

Среди металлических конструкционных материалов наибольшим потенциалом снижения массы обладают сплавы на основе магния. Однако реализация этого преимущества ограничивается недостатками самого материала. Для традиционных литейных магниевых сплавов характерны снижение прочностных характеристик с повышением температуры, недостаточная стабильность структуры при длительном тепловом воздействии и, что особенно важно для авиационной техники, склонность к воспламенению и горению. В результате область их применения оказывается значительно уже той, которая потенциально могла бы быть достигнута исходя из их высокой удельной прочности.

Возникает принципиально новая материаловедческая задача: повышение прочности магниевого сплава не должно сопровождаться потерей пластичности и термической стабильности, увеличение жаропрочности должно обеспечиваться устойчивым структурно-фазовым состоянием, а расширение температурного диапазона эксплуатации требует одновременного решения проблемы пожарной безопасности.

Таким образом, речь идет о создании не материалов с максимально высоким отдельным показателем, а сплавов в которых обеспечен сбалансированный комплекс характеристик.

Решение данной проблемы связано с многокомпонентным легированием магния редкоземельными элементами. Однако практическое использование такого подхода требует установления закономерностей совместного влияния легирующих компонентов на фазообразование, структурную стабильность и механические свойства, определения рациональных температурно-временных параметров термической обработки и понимания факторов, обеспечивающих сопротивление материала воспламенению. Не менее важным является переход от закономерностей, установленных на лабораторных составах, к технологически воспроизводимому в производственных условиях материалу, пригодному для получения изделий из него.

Именно на решение этого комплекса взаимосвязанных задач направлена диссертационная работа В.А. Дуюновой. В ней проблема создания магниевых сплавов нового поколения рассматривается на нескольких уровнях – от выбора принципов легирования и исследования структурно-фазовых превращений до разработки конкретных сплавов ВМЛ25 и ВМЛ26, технологии их получения и промышленного опробования.

Таким образом, актуальность диссертационной работы В.А. Дуюновой определяется необходимостью преодоления существующих ограничений применения магниевых сплавов и создания на их основе нового поколения легких конструкционных материалов, сочетающих высокую прочность, работоспособность при повышенных температурах и повышенную пожарную безопасность. Решение этой проблемы имеет высокое значение для расширения возможностей применения магниевых сплавов в перспективных изделиях авиационной техники.

Структура и содержание работы

Содержание и структура диссертации находятся в логическом единстве и соответствуют поставленной цели исследования, критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследования. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, выводов, списка литературы из 242 наименований. Объем работы составляет 319 страниц, в том числе 107 рисунков и 79 таблиц.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту, научная

новизна, достоверность, практическая значимость, приведены данные об апробации работы, публикациях, структуре и объеме диссертационной работы.

Первая глава формирует научную основу последующих экспериментальных исследований. Рассмотрены основные принципы легирования высокопрочных и жаропрочных магниевых сплавов, особенности формирования их структуры и фазового состава, а также механизмы твердорастворного и дисперсионного упрочнения. Представлены особенности образования промежуточных фаз, характеристики редкоземельных элементов (РЗЭ), влияние энергетического состояния кристаллической решетки, межатомных связей, дефектов и размера зерна, а также закономерности распада пересыщенного твердого раствора. Подробно проанализирована роль РЗЭ в формировании жаропрочного состояния магниевых сплавов. Показано, что элементы цериевой и иттриевой подгрупп различаются по характеру взаимодействия с магниевой матрицей. Рассмотрено влияние фазового состава и структурного состояния на огневые характеристики магниевых сплавов, а также существующие проблемы их промышленного внедрения.

Во **второй главе** представлены объекты и методы исследований, использованные при выполнении работы. В качестве исследуемых материалов выбраны многокомпонентные литейные магниевые сплавы систем Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr, Mg-(Nd+Gd+Y+Er+Dy)-Zr и Mg-РЗЭ-Zr с варьированием суммарного содержания редкоземельных элементов, а также экспериментальные композиции, дополнительно легированные кадмием. Для прогнозирования фазового состава применено термодинамическое моделирование. Температуры протекания фазовых превращений и процессы распада пересыщенного твердого раствора исследованы методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Для изучения структурно-фазового состояния использован комплекс методов растровой и просвечивающей электронной микроскопии, электронно-зондового микроанализа и рентгеноструктурного анализа. Механические характеристики определялись при комнатной, пониженной и повышенных температурах; проводились испытания на малоцикловую усталость и длительную прочность. Отдельно представлены методики коррозионных и огневых испытаний.

В **третьей главе** представлены результаты исследования влияния состава и технологических параметров изготовления на структурное состояние и комплекс физико-механических и жаропрочных характеристик литейных магниевых сплавов системы Mg-РЗЭ-Zr с повышенной температурой вос-

пламенения. Проведен выбор системы легирования и исследовано влияние качественного и количественного содержания редкоземельных элементов на формирование структуры и свойств экспериментальных композиций. Установлено, что совместное введение Gd, Nd, Y, Ce и Zr обеспечивает формирование мелкозернистой структуры и реализацию твердорастворного, зернограничного и дисперсионного механизмов упрочнения. Показано, что уровень механических характеристик определяется не столько суммарным содержанием РЗЭ, сколько их соотношением и участием в фазообразовании. Исследовано влияние основных легирующих элементов на свойства сплавов и получены зависимости, использованные для последующего математического моделирования системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr. На основании проведенного комплекса исследований определены оптимальные концентрации компонентов, обеспечивающие требуемый баланс прочностных характеристик при комнатной и повышенных температурах. С применением методов математического планирования эксперимента разработаны модели прогнозирования временного сопротивления, предела текучести и кратковременной прочности при температурах 250 и 300°C в зависимости от химического состава сплава. Полученные расчетные зависимости экспериментально проверены и показали высокую сходимость с результатами испытаний, что позволило использовать их для обоснованного выбора перспективного состава высокопрочного жаропрочного магниевых сплава с повышенной температурой воспламенения.

Четвертая глава содержит результаты разработки состава и термической обработки нового высокопрочного жаропрочного литейного магниевых сплава. Проведено компьютерное моделирование термодинамических процессов фазовых превращений выбранного состава, результаты которого использованы для последующего экспериментального исследования структурно-фазового состояния материала. Методами электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа изучены фазовый состав и особенности формирования упрочняющей структуры опытного сплава. Исследовано влияние параметров термической обработки на структуру и механические характеристики материала. Установлены особенности распада пересыщенного твердого раствора и формирования метастабильных упрочняющих фаз, определен режим термической обработки, обеспечивающий наиболее благоприятное сочетание фазового состава, морфологии выделений и прочностных характеристик. Показана роль интерметаллидов циркония в процессах зарождения упрочняющих фаз. Рассмотрено влияние пережога на структуру и свойства

сплава. Установлено, что повышение температуры закалки до 540-560°C приводит к образованию грубых фаз $Mg_3(Zn, PЗЭ)$ по границам зерен и необратимому ухудшению структуры материала; последующая термическая обработка не обеспечивает полного восстановления исходного комплекса механических характеристик. Приведены результаты огневых испытаний, которые показали повышение температуры начала устойчивого горения до значений не ниже 805°C и способность сплава к самозатуханию после удаления источника пламени. Повышенная устойчивость к воспламенению связана с перераспределением редкоземельных элементов при нагреве и формированием термостабильного поверхностного слоя. Исследовано изменение структуры и механических свойств разработанного сплава, получившего марку ВМЛ26, после длительных эксплуатационных нагревов в интервале 150-350°C. Установлено, что изменение характеристик определяется эволюцией метастабильных упрочняющих фаз, включая процессы их выделения, укрупнения и коагуляции. Показано, что при 250°C сплав сохраняет благоприятное сочетание прочности и пластичности при выдержках до 500 ч, тогда как длительное воздействие температуры 350°C приводит к выраженному перестраиванию и деградации структуры.

В **пятой главе** представлены результаты разработки промышленных технологий выплавки, изготовления отливок и ремонтных технологий применительно к разработанному сплаву. По результатам исследований определены оптимальные соотношения защитной газовой среды ($SF_6 + CO_2$ в соотношении 1:15), силы тока (100-150 А), разработан состав порошковой композиции ((Al-Mg-Zr) + 10% Al_2O_3 + 10% Zn) и технология устранения литейных дефектов с его применением (отношение прочности напыленного слоя к прочности основного металла – 0,90). Исследован комплекс характеристик (механические, коррозионные, адгезия, рентгенографический контроль), результаты которых подтвердили заявленный уровень и работоспособность разработанного материала и технологий.

В **шестой главе** представлены результаты развития предложенной в работе концепции комплексного легирования применительно к многокомпонентным магниевым сплавам системы Mg-(Nd+Gd+Y+Er+Dy)-Zr. Исследовано влияние сочетания РЗЭ цериевой и иттриевой подгрупп на структуру и механические свойства экспериментальных композиций. Показано, что увеличение суммарного содержания РЗЭ способствует повышению предела текучести, однако сопровождается снижением пластичности. Установлено, что совместное введение Nd, Gd, Y, Er и Dy позволяет реализовать сочетание

твердорастворного и дисперсионного механизмов упрочнения и сформировать термостабильное структурное состояние сплава. Изучено влияние дополнительного легирования кадмием на структуру и свойства жаропрочного магниевого сплава, содержащего РЗЭ. Показано, что введение Cd способствует усилению твердорастворного упрочнения магниевой матрицы и повышению предела текучести без существенного увеличения количества зернограницной эвтектики. На основании проведенных исследований определен оптимальный состав и разработан новый жаропрочный литейный магниевый сплав ВМЛ25. Проведены испытания и сравнительный анализ разработанных сплавов ВМЛ25 и ВМЛ26 с серийными жаропрочными магниевыми сплавами МЛ9, МЛ10 и МЛ19. Сопоставлены их прочностные характеристики при комнатной и повышенных температурах, а также другие характеристики, определяющие возможность применения материалов в конструкциях, работающих при повышенных температурах. По результатам сравнительных испытаний показано преимущество разработанных сплавов по комплексу прочностных и жаропрочных характеристик.

В конце диссертационного исследования приведены **выводы**, в котором сформулированы результаты работы. Основные научные результаты, полученные автором, их последовательность и содержание отражают структуру работы, соответствуют поставленным задачам и свидетельствуют о полноте их решения.

В целом, работа изложена технически грамотным языком. Каждая глава содержит важные результаты научных исследований автора и сопровождается развернутыми выводами. Общее оформление работы соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям.

Научная новизна

В ходе выполнения научных исследований автором диссертации получены следующие результаты, обладающие научной новизной:

1. Установлена последовательность распада пересыщенного твердого раствора в многокомпонентном сплаве системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr с образованием комплекса метастабильных фаз $\beta_T \rightarrow \beta' \rightarrow \beta_1$, а также пластинчатых γ' и γ'' -фаз. Для β_1 фазы экспериментально определены два типа ориентационных соотношений с матрицей α -Mg и показан переход ORI $\rightarrow$ ORI при росте и изменении состава выделений. Установлена роль интерметаллидов Zr_3Zn_2 , Zr_2Zn и $ZrMn_2$ как центров гетерогенного зарождения β_1 фазы.

2. Показано различие оптимальных температурных интервалов старения в зависимости от характера редкоземельных элементов в составе. Максимальный упрочняющий эффект для сплавов с преобладанием тяжелых РЗЭ достигается при 220-250°C, тогда как для систем с преобладанием элементов цериевой подгруппы – при 190-210°C. Установлено, что изменение температуры связано с различной скоростью диффузионно-контролируемого распада твердого раствора и термической стабильностью образующихся интерметаллидных фаз.

3. Впервые разработаны и экспериментально проверены математические модели прогнозирования механических характеристик системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr при комнатной и повышенных (250 и 300°C) температурах, учитывающие содержание и соотношение Y, Nd, Gd и Zn; расхождение расчетных и экспериментальных данных составляет не более 10-15%, что позволяет использовать их для направленного выбора химического состава.

4. Экспериментально показано влияние наноразмерного состояния упрочняющей β_1 фазы на дисперсионное упрочнение сплава. Снижение интенсивности ее дифракционных линий после термической обработки связано с переходом значительной части выделений в наноразмерное, рентгеноаморфное состояние. Предложено использовать этот эффект как критерий степени дисперсионного упрочнения магниевого сплава.

5. Установлен механизм повышения пожарной безопасности сплавов системы Mg-РЗЭ-Zr. При огневом воздействии происходит перераспределение Y, Gd и Nd в поверхностную зону и формируется термостабильный окисленный слой, обогащенный иттрием и тяжелыми РЗЭ. Для разработанного сплава ВМЛ26 температура воспламенения составляет не менее 812°C, при этом материал способен к самозатуханию после удаления источника пламени.

6. Определены предельные условия термической обработки ВМЛ26. Показано, что пережог при 540-560 °C приводит к формированию грубых фаз $Mg_3(Zn, \text{РЗЭ})$ по границам зерен и необратимой деградации структуры; последующая термическая обработка не позволяет полностью восстановить исходный комплекс свойств.

7. Установлены закономерности изменения структуры и свойств ВМЛ26 при длительных эксплуатационных нагревах 150-350 °C. Показано, что при 250 °C в интервале выдержек 100-500 ч сохраняется оптимальное сочетание прочности и пластичности, тогда как длительное воздействие

350 °С сопровождается выраженным перестариванием, укрупнением и коагуляцией метастабильных β -фаз, и снижением прочности.

8. Предложенный подход к комплексному легированию получил развитие для системы Mg-(Nd+Gd+Y+Er+Dy)-Zr. Показано, что усложнение состава не изменяет принципиального характера структурообразования, а приводит к перераспределению вкладов твердорастворного и дисперсионного механизмов упрочнения. На этой основе разработан жаропрочный литейный магниевый сплав ВМЛ25.

Практическая значимость

Практическая значимость диссертационной работы заключается в доведении установленных научных закономерностей до создания двух новых литейных магниевых сплавов ВМЛ25 и ВМЛ26 с повышенным комплексом прочностных, жаропрочных и огневых характеристик. Для разработанных материалов определены режимы термической обработки и проведено промышленное опробование технологии выплавки и получения отливок. Разработаны технологические решения по защите и фильтрации расплава, а также исправлению локальных литейных дефектов методом газодинамического напыления. На новые материалы оформлены паспорта, технические условия, технологические инструкции и рекомендации по плавке, литью и термической обработке.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Обеспечена обоснованным использованием существующих положений металловедения, применением современного исследовательского оборудования, математического планирования экспериментов.

Подтверждение основных результатов диссертации в научной печати

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 16 статьях в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, получено 6 патентов РФ. Анализ содержания диссертации, опубликованных работ, в том числе работ, опубликованных в соавторстве, показал, что все научные положения, выносимые на защиту, выводы и рекомендации принадлежат диссертанту.

Количество и качество публикаций В.А. Дуюновой отвечает п. 11, 13 Положения о присуждении ученых степеней.

Оценка содержания диссертации

Объем и содержание диссертационной работы по степени научной новизны и практической значимости удовлетворяет требованиям ВАК Минобрнауки РФ, предъявляемым к докторским диссертациям. Анализ содержания диссертационной работы убеждает в ее завершенности. Содержание диссертации изложено грамотно, в логической последовательности, а принятая терминология и стиль изложения соответствует общепринятым нормам.

Поставленная цель, задачи исследования, и, соответственно, содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 2.6.1. – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы и ее основные положения.

Замечания по диссертационной работе

В диссертации успешно решена сложная в научном и практическом плане задача, однако при этом нельзя не отметить ряд замечаний:

1. При исследовании фазового состава разработанного сплава установлено, что интерметаллиды циркония Zr_3Zn_2 , Zr_2Zn и $ZrMn_2$ могут выступать центрами гетерогенного зарождения β_1 фазы и тем самым влиять на кинетику распада пересыщенного твердого раствора. Возможно ли целенаправленно управлять количеством и распределением указанных цирконийсодержащих частиц технологическими параметрами получения сплава и использовать этот механизм для дополнительного регулирования дисперсности упрочняющих выделений?

2. В работе показано образование LPSO-фазы в виде наноразмерных пластин, ориентированных в базисных плоскостях α -Mg, и отмечено ее положительное влияние на жаропрочность и длительную прочность материала. Насколько устойчиво данное структурное состояние при длительной эксплуатации и можно ли выделить вклад LPSO-фазы в жаропрочность отдельно от вклада метастабильных β -фаз и твердорастворного упрочнения?

3. При промышленном опробовании ВМЛ26 подтверждена возможность получения отливок с требуемым комплексом характеристик. Однако в диссертации недостаточно подробно рассмотрен вопрос структурной и механической неоднородности материала в различных сечениях отливки. Как изменение скорости охлаждения и толщины стенки влияет на размер зерна, количество и морфологию интерметаллидных фаз и, соответственно, на меха-

нические свойства ВМЛ26? Проводилась ли оценка допустимой разницы характеристик между различными участками реальных отливок?

4. В пятой главе для повышения металлургического качества ВМЛ26 предложено применение фильтрации расплава, направленной на снижение содержания неметаллических включений. При этом для многокомпонентных магниевых сплавов существенное значение имеет не только чистота расплава, но и сохранение заданного содержания химически активных РЗЭ. Не сопровождается ли фильтрация частичной потерей или перераспределением редкоземельных легирующих элементов и оценивалось ли изменение химического состава сплава до и после прохождения расплава через фильтр?

5. Для исправления локальных литейных дефектов разработана технология холодного газодинамического напыления с использованием порошковых композиций системы Al-Mg-Zr. Прочность восстановленных участков составляет 0,85-0,90 от прочности основного металла, при этом не отмечено ухудшения коррозионной стойкости и адгезии лакокрасочного покрытия. Каковы ограничения данной технологии по размерам, глубине и расположению исправляемого дефекта и может ли она применяться для нагруженных зон ответственных отливок либо ее использование должно ограничиваться определенными категориями дефектов?

6. В работе исследованы механические характеристики разработанных материалов при различных температурах, длительная прочность и малоцикловая усталость, что позволяет достаточно полно оценить их работоспособность. Однако эксплуатация авиационных деталей может сопровождаться одновременным воздействием механической нагрузки и многократных температурных циклов. Насколько, по мнению автора, полученные результаты позволяют прогнозировать поведение ВМЛ25 и ВМЛ26 в условиях термомеханического циклирования и требуется ли проведение дополнительных испытаний такого типа перед расширением области применения разработанных сплавов?

Указанные замечания не снижают ценность и общую положительную оценку диссертационной работы, не влияют на основные научные и практические результаты и не затрагивают основных положений, вынесенных соискателем на защиту.

Заключение

Диссертационная работа Дуюновой Виктории Александровны на тему «Научно-технологические основы разработки высокопрочных жаропрочных

литейных магниевых сплавов нового поколения с повышенной пожарной безопасностью» выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой самостоятельную завершенную научно-квалификационную работу, в которой изложены научно обоснованные технические и технологические решения по подходам к разработке новых литейных магниевых сплавов, сочетающих высокие прочностные, жаропрочные и огневые характеристики.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа соответствует критериям, установленным п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (ред. от 11.09.2021 г.), а ее автор, Дуюнова Виктория Александровна, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.1. – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Официальный оппонент

Научный руководитель СамНЦ РАН,
академик РАН, доктор технических наук,
профессор


23.09.2026 г.

Ф.В. Гречников

Подпись Гречникова Ф.В.



А.В. Васильев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СамНЦ РАН)

Адрес: 443001, г. Самара, Студенческий переулок, 3А

Телефон: +7 (846) 337-53-81

Адрес электронной почты: fgrech@ssc.smr.ru