



**МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ**

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский политехнический университет»
(Московский Политех)

Б. Семеновская ул., д.38, Москва, 107023
Тел.+7 495 223 05 23, Факс +7 499 785 62 24
www.mospolytech.ru | E-mail: mospolytech@mospolytech.ru
ОКПО 04350607, ОГРН 1167746817810,
ИНН/КПП 7719455553/771901001

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

К.Т.Н.

А.Ю. Наливайко

2026 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет» («Московский Политех») на диссертационную работу на диссертационную работу Дуюновой Виктории Александровны на тему: «Научно-технологические основы разработки высокопрочных жаропрочных литейных магниевых сплавов нового поколения с повышенной пожарной безопасностью», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.6.1. –
Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Актуальность темы:

Актуальность диссертационной работы В.А. Дуюновой заключается в необходимости разработки нового поколения легких конструкционных материалов для авиационной, космической и двигателестроительной отраслей промышленности, обеспечивающих повышение весовой эффективности изделий при одновременном сохранении требуемого уровня прочности, надежности и безопасности эксплуатации. Магниевого сплавы благодаря низкой плотности и высоким удельным прочностным характеристикам способны обеспечить существенное снижение массы конструкций при замене традиционно применяемых алюминиевых сплавов. Как

отмечено в диссертации, такая замена потенциально позволяет повысить весовую эффективность деталей до 30 %.

Несмотря на это применение магниевых сплавов в конструкциях ответственной техники до настоящего времени ограничивается рядом принципиальных недостатков, к числу которых относятся их склонность к воспламенению, недостаточный уровень прочностных и жаропрочных характеристик и ограничения по рабочим температурам. Важным с практической точки зрения является фактор пожарной безопасности: в условиях пожара магниевые сплавы способны к интенсивному горению с формированием высокотемпературного очага, что предъявляет повышенные требования к их составу, структурному состоянию и эксплуатационным характеристикам.

На основании вышеизложенного научно обоснованная разработка отечественных литейных магниевых сплавов, сочетающих высокую прочность и жаропрочность с повышенной температурой воспламенения, представляет собой важную научно-техническую задачу. Автором справедливо отмечено, что имеющиеся исследования в этой области не дают систематизированного представления о взаимосвязи состава, структуры и температуры воспламенения, что затрудняет целенаправленную разработку пожаробезопасных магниевых сплавов.

Поставленная в диссертации цель – разработка научно-технологических основ разработки высокопрочных жаропрочных литейных магниевых сплавов нового поколения с повышенной пожарной безопасностью, работоспособных при температурах до 350 °С – соответствует современным задачам развития материалов.

Структура работы и публикации:

Диссертация Дуюновой В.А. состоит из введения, 6 глав и выводов, изложена на 319 страницах, включая 107 рисунков, 79 таблиц и список литературы из 242 наименования. По теме диссертации опубликовано 24 публикации, из которых 16 – в журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, и получено 6 патентов РФ.

Введение включает в себя актуальность представленной работы, сформулированные цель и задачи, научную новизну и практическую значимость работы. Автором формулируются положения, выносимые на защиту, представляется апробация работы, а также публикации по теме проведенных исследований.

В первой главе приведено современное состояние вопроса на основании обзора литературы по теме диссертационной работы, в рамках которого рассмотрены традиционные литейные магниевые сплавы с указанием их основных характеристик и областей применения. Автор приводит описание влияния структурно-фазового состояния на характеристики, включая огневые, магниевых сплавов, в том числе описывает роль редкоземельных элементов. На основании проведенной аналитической работы автором выявлена недостаточная изученность взаимосвязи «химический состав – структура – прочность – жаропрочность + пожаробезопасность – технологичность» и необходимость разработки нового класса литейных магниевых сплавов, сформулированы выводы и составлена структурная схема, отражающая всесторонний подход к решению поставленных задач.

Вторая глава содержит описание объектов и методов исследований, примененных в работе. Представлен перечень шихтовых материалов, которые использовались для изготовления экспериментальных и опытных композиций и составов литейных магниевых сплавов. Описаны методики моделирования, металлографических исследований, определения механических, коррозионных, огневых характеристик.

В третьей главе показаны результаты исследований, направленных на выбор и оптимизацию состава литейного магниевого сплава, обладающего требуемым комплексом свойств. Показано влияние системы легирования на показатели горючести (температуры воспламенения, времени остаточного горения и потери массы образцов), в частности установлена положительная роль иттрия на повышение данных характеристик и необходимость корректировки содержания легкоплавких элементов (цинка и алюминия) для минимизации выгорания. По результатам исследований проведена корректировка составов и оценка влияния предварительных режимов термической обработки на структуру, механические, жаропрочные, огневые характеристики. Полученные результаты позволили выявить вклад используемых легирующих компонентов в изменение таких характеристик, как временное сопротивление, предел текучести, относительное удлинение и кратковременная прочность при 250 и 300 °С и легли в основу разработанных моделей прогнозирования свойств с максимальной относительной ошибкой прогнозирования 4,7 %. Проведенные исследования позволили оптимизировать состав исследуемого сплава.

Четвертая глава посвящена всестороннему исследованию оптимизированного состава и установлению закономерностей структурных изменений в процессе термического воздействия. В результате предварительных исследований выбраны 4 режима термической обработки и исследованы изменения структуры и свойств. Показано, что условия охлаждения обеспечивают оптимальное сочетание степени растворения эвтектики, дисперсности метастабильных выделений и равномерности их распределения, за счет чего достигаются повышенные свойства. На основании исследований выбран режим термической обработки: закалка 560 °С – 10 часов с охлаждением в воде 80-90 °С и искусственное старение при 220 °С – 10 часов. Предложены критерии оценки эффективности термической обработки из-за рентгеноаморфности интерметаллидных частиц – по величине увеличения периодов решетки твердого раствора с точки зрения степени твердорастворного упрочнения и по снижению интенсивности дифракционных линий основной интерметаллидной фазы с точки зрения дисперсионного упрочнения. Показаны углубленные исследования структурного состояния для обоснования достижения полученных характеристик. Установлено присутствие в сплаве сразу трех видов фаз – β (β_n , β'' , β_t , β' , β_1), γ (γ'' , γ' , LPSO) и фазы на основе циркония (Zr_3Zn_2 , Zr_2Zn , $ZrMn_2$) и описана роль каждого типа выявленных фаз. В главе содержится большой объем исследований по оценке поведения сплава при эксплуатационно-технологических воздействиях. Приведены результаты исследования устойчивости структуры и свойств к отклонениям технологических параметров термической обработки в виде пережога, которые показали необратимость структурных превращений и их влияние на понижение характеристик. Показано поведение сплава при проведении огневых испытаний, в рамках которых для практических целей разработаны методики оценки температуры воспламенения и времени остаточного горения, на основании которых определена минимальная температура воспламенения сплава, равная 805 °С. Показано, что в результате воздействия пламени в структуре формируется поверхностный деградированный слой, толщина и строение которого зависят от продолжительности воздействия: от 0,5-1,5 мм при 5 мин воздействия до 1,5-2,0 мм при 15 мин воздействия, в формировании которого отмечена роль Y и других редкоземельных элементов. Показано влияние эксплуатационных нагревов на изменение прочностных свойств и структуры, по результатам которых выявлены

оптимальные условия эксплуатации: 250 °С в течение 100-500 ч с кратковременными нагревами до 350 °С.

Пятая глава направлена на промышленное опробование разработанного сплава и разработке соответствующих промышленных технологий. Результаты исследований позволили установить оптимальное соотношение защитной газовой смеси, состоящей из SF_6 и CO_2 в соотношении 1:15, позволяющая обеспечить требуемый уровень прочностных и коррозионных характеристик при сокращении расхода смеси без ухудшения технологической стабильности процесса. Установлена оптимальная сила тока, равная 100-150 А и обеспечивающая однородность химического состава и чистоту по гидридам, ухудшающим качество получаемого сплава. Разработана технология устранения литейных дефектов методом газодинамического напыления применительно к отливкам и деталям, включая состав порошковой композиции, обеспечивающая отношение прочности напыленного слоя к прочности основного материала 0,90.

В шестой главе приведены результаты исследований, направленных на расширение и проверке работоспособности сформулированного научной концепции комплексного легирования на многокомпонентные системы $\text{Mg}-(\text{Nd}+\text{Gd}+\text{Y}+\text{Er}+\text{Dy})-\text{Zr}$, заключающихся в выборе основных легирующих элементов, обосновании режимов термической обработки. Показано, что состав, содержащий указанные редкоземельные элементы, обеспечивает перераспределение вкладов механизмов упрочнения и повышение сопротивления началу пластической деформации при сохранении пластичности на уровне 1,5-2,5 %. Дополнительно показано, что введение кадмия в совокупности с примененным двухступенчатым нагревом под закалку с температурным интервалом между ступенями 50 °С и старением 200-220 °С в течение 12 часов обеспечивает оптимальное соотношение между механизмами упрочнения и достижение требуемого уровня свойств. Приведены результаты испытаний и сравнительного анализа разработанных новых сплавов ВМЛ26 и ВМЛ25 с серийными жаропрочными сплавами МЛ9, МЛ10, МЛ19 по прочностным, жаропрочным, коррозионным и физическим свойствам, по результатам которых установлено превосходство разработанных новых сплавов.

Научная новизна:

Научная новизна диссертационной работы Дуюновой В.А. заключается в развитии научных представлений о закономерностях формирования структурно-фазового состояния многокомпонентных литейных магниевых сплавов системы Mg-RЗЭ-Zr и установлении взаимосвязей между их химическим составом, параметрами термической обработки, механизмами упрочнения, жаропрочностью и пожаробезопасностью. Автором предложена и научно обоснована концепция комплексного легирования, предусматривающая целенаправленное соотношение редкоземельных элементов цериевой и иттриевой подгрупп для управляемого формирования структуры и одновременного повышения кратковременной и длительной прочности, а также температуры воспламенения литейных магниевых сплавов.

Существенным научным результатом является установление закономерностей формирования и распада пересыщенного твердого раствора в многокомпонентных сплавах системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr. В работе определена последовательность образования метастабильных упрочняющих фаз $\beta_T \rightarrow \beta' \rightarrow \beta_1$, а также пластинчатых γ' - и γ'' -фаз, установлены ориентационные соотношения β_1 -фазы с матрицей α -Mg и показана роль интерметаллидов циркония как центров ее гетерогенного зарождения. Кроме того, установлено, что снижение интенсивности дифракционных линий β_1 -фазы связано с переходом значительной части выделений в наноразмерное состояние и может рассматриваться в качестве интегрального критерия степени дисперсионного упрочнения.

Научную новизну представляют также разработанные и экспериментально подтвержденные математические модели прогнозирования механических характеристик многокомпонентных сплавов Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr при комнатной и повышенных температурах в зависимости от химического состава и соотношения редкоземельных элементов. Полученное автором расхождение расчетных и экспериментальных результатов, составляющее не более 10-15 %, позволяет использовать предложенный подход для разработки составов магниевых сплавов с заданным комплексом свойств.

Особого внимания заслуживают результаты, раскрывающие механизм повышения пожаробезопасности литейных магниевых сплавов. Автором показано, что повышение температуры воспламенения до 800 °С и выше связано с

формированием термостабильных РЗЭ-содержащих фаз и изменением структуры защитной оксидной пленки. Тем самым пожаробезопасность рассматривается не как обособленная эксплуатационная характеристика, а во взаимосвязи с химическим и структурно-фазовым состоянием материала.

Научная новизна диссертационной работы соответствует уровню докторской диссертации и определяется совокупностью установленных закономерностей структуро- и фазообразования, выявленных механизмов упрочнения и повышения пожаробезопасности, разработанных моделей прогнозирования свойств и сформулированной концепции комплексного легирования литейных магниевых сплавов редкоземельными элементами. Полученные результаты развивают научные основы создания высокопрочных жаропрочных литейных магниевых сплавов нового поколения с повышенной пожарной безопасностью.

Обоснованность и достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций:

Обоснованность и достоверность научных положений, результатов и выводов диссертационной работы Дуюновой В.А. обеспечиваются комплексным характером проведенных исследований, использованием современных экспериментальных и расчетных методов, значительным объемом полученных данных, а также сопоставлением результатов, полученных различными взаимодополняющими методами. Автором применен широкий комплекс методов исследования структуры и фазового состава, включающий дифференциальную сканирующую калориметрию, растровую и просвечивающую электронную микроскопию, электронно-зондовый микроанализ и рентгеноструктурный анализ. В частности, электронно-микроскопические исследования позволили идентифицировать интерметаллидные и нанодисперсные упрочняющие фазы, исследовать распределение редкоземельных элементов и последовательность распада пересыщенного твердого раствора, а рентгеноструктурный анализ использован для определения фазового состава и его изменения в процессе термической обработки.

Достоверности полученных результатов способствует проведение испытаний в соответствии с действующими стандартами и методическими документами.

Механические свойства определялись с применением стандартизованных методов испытаний на растяжение при нормальных и повышенных температурах; длительную прочность, усталость и твердость; коррозионные испытания также проводились по соответствующему ГОСТ. Для оценки пожаробезопасности использован комплекс специализированных методик, предусматривающих определение температуры воспламенения, времени остаточного горения при воздействии температуры 1100 °С и пожароопасности материала по потере массы после воздействия пламени. Такой подход позволяет оценивать разрабатываемые материалы не по отдельным характеристикам, а по совокупности показателей, непосредственно определяющих их эксплуатационную пригодность.

Следует особо отметить, что при промышленной апробации автором учитывались факторы, способные существенно повлиять на воспроизводимость результатов при переходе от лабораторной плавки к серийному производству: окисление расплава, выгорание легирующих элементов, дегазация, образование неметаллических включений и пористости, параметры защитной среды и перемешивания расплава. По результатам этих исследований разработана технологическая документация, направленная на обеспечение воспроизводимости структуры и свойств отливок в производственных условиях.

Дополнительным подтверждением обоснованности выводов является проведенный сравнительный анализ разработанных и серийных литейных магниевых сплавов. Полученные экспериментальные данные демонстрируют преимущества новых материалов как при комнатной, так и при повышенных температурах. В частности, для сплава ВМЛ26 приведены результаты длительных испытаний при 250, 300 и 350 °С, позволяющие непосредственно оценить сохранение прочностных характеристик в условиях высокотемпературного воздействия и сопоставить их с характеристиками серийных сплавов МЛ9, МЛ10 и МЛ19.

Значимость полученных результатов:

Значимость результатов диссертационной работы В.А. Дуюновой определяется сочетанием их **научной ценности и практической направленности на создание и внедрение нового поколения литейных магниевых сплавов.** Полученные результаты формируют научно-технологическую основу для

разработки материалов, в которых одновременно реализован комплекс характеристик, традиционно трудно совмещаемых для магниевых сплавов: высокая прочность, жаропрочность, работоспособность при повышенных температурах и повышенная пожарная безопасность.

Научная значимость работы состоит прежде всего в развитии представлений о принципах управления структурно-фазовым состоянием многокомпонентных магниевых сплавов системы Mg-PЗЭ-Zr посредством комплексного легирования редкоземельными элементами и выбора рациональных режимов термической обработки. Установленные закономерности формирования и распада пересыщенного твердого раствора, образования и эволюции метастабильных упрочняющих фаз, а также выявленная роль отдельных групп РЗЭ создают научную основу для целенаправленного формирования требуемого комплекса свойств магниевых сплавов.

Важно отметить значимость результатов с практической точки зрения. На основе проведенных исследований разработаны литейные магниевые сплавы нового поколения ВМЛ25, ВМЛ26 и ВМЛ27. В диссертации показано, что разработанные материалы превосходят серийные магниевые сплавы по ряду механических и жаропрочных характеристик.

Отдельного внимания заслуживают результаты в области пожарной безопасности. Разработаны методические подходы к определению температуры воспламенения, времени остаточного горения при температуре 1100 °С и оценке пожароопасности магниевых материалов по потере массы после воздействия пламени. Наличие соответствующих методических документов существенно повышает прикладную ценность исследования, поскольку создает основу не только для разработки пожаробезопасных сплавов, но и для объективной оценки и нормирования их огневых характеристик.

Вопросы и замечания по диссертационной работе:

Диссертационная работа В.А. Дуюновой выполнена на высоком научно-техническом уровне и содержит значительный объем экспериментального материала. Вместе с тем при ознакомлении с работой возникают отдельные вопросы и замечания, которые преимущественно носят дискуссионный характер и не снижают общей положительной оценки диссертации.

1. В работе разработаны математические модели прогнозирования механических свойств сплавов системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr. При их экспериментальной проверке автором получена высокая сходимость: средняя относительная ошибка прогнозирования не превышает 2 %, максимальная составляет 4,7 %. В каких пределах концентраций легирующих элементов разработанные модели могут считаться достоверными и возможна ли их экстраполяция за пределы исследованной области составов?

2. Одним из наиболее значимых результатов работы является повышение пожаробезопасности разработанных магниевых сплавов. Результаты испытаний экспериментальных составов демонстрируют достаточно заметный диапазон значений температуры воспламенения, причем испытания проводились на образцах различной толщины – от 0,8 до 2,2 мм. Насколько существенно геометрия и толщина образца влияют на температуру воспламенения и возможно ли непосредственно переносить полученные результаты лабораторных исследований пожаробезопасности на реальные отливки?

3. В диссертации показана работоспособность разработанных сплавов при повышенных температурах, однако установлено, что при 350 °С длительная выдержка приводит к выраженному перестариванию и деградации структуры, вследствие чего эксплуатационные нагревы при данной температуре допустимы лишь при кратковременном воздействии. Как следует понимать заявленную работоспособность сплава при температурах до 350 °С, если длительные выдержки при этой температуре приводят к деградации структуры?

4. Автором проведено промышленное опробование высокопрочного пожаробезопасного сплава ВМЛ26, причем специально исследовалась воспроизводимость его химического состава, структурного состояния и эксплуатационных характеристик при переходе к реальному литейному производству. Вместе с тем концепция работы распространяется и на другие разработанные материалы, прежде всего ВМЛ25 и ВМЛ27. В какой степени результаты промышленного опробования ВМЛ26 могут быть распространены на технологии изготовления отливок из ВМЛ25 и ВМЛ27 и требуется ли для каждого из этих сплавов самостоятельная оптимизация технологических параметров?

5. В сравнительном анализе показано преимущество ВМЛ25 и ВМЛ26 перед серийными сплавами МЛ9, МЛ10 и МЛ19 по комплексу эксплуатационных

характеристик, включая прочность, жаропрочность, коррозионную стойкость и температуру воспламенения. Для практического выбора материала существенны не только достигнутые характеристики, но стоимость самого сплава, содержащего большое количество редкоземельных элементов, стабильность их поставок и технологическая сложность производства. Представляется полезным дать более развернутую оценку технологической и экономической эффективности применения разработанных многокомпонентных сплавов по сравнению с серийными материалами.

Заключение:

Диссертационная работа Дуюновой В.А. «Научно-технологические основы разработки высокопрочных жаропрочных литейных магниевых сплавов нового поколения с повышенной пожарной безопасностью», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.6.1. – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов, является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена крупная научно-техническая проблема, имеющая существенное значение для развития металловедения и создания перспективных материалов.

В работе сформулированы и научно обоснованы принципы комплексного легирования литейных магниевых сплавов системы Mg-PЗЭ-Zr, установлены закономерности формирования их структурно-фазового состояния и механизмы упрочнения, разработаны математические модели прогнозирования механических характеристик, раскрыты механизмы повышения пожаробезопасности и предложены технологические режимы изготовления и термической обработки новых сплавов. Полученные результаты позволили обеспечить одновременное повышение прочностных и жаропрочных характеристик и температуры воспламенения магниевых сплавов.

Основные научные положения и результаты диссертации обладают необходимой степенью обоснованности и достоверности, что обеспечивается значительным объемом экспериментальных исследований, применением современного аттестованного оборудования и апробированных методов, метрологическим обеспечением, воспроизводимостью результатов и их

статистической обработкой. Полученные автором закономерности согласуются с современными представлениями о структуре, фазообразовании и механизмах упрочнения литейных магниевых сплавов, легированных редкоземельными элементами.

По актуальности, научной новизне, объему и уровню выполненных исследований, достоверности и значимости полученных результатов диссертационная работа соответствует требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, 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.

Диссертационная работа Дуюновой В.А. рассмотрена на заседании кафедры «Материаловедение» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет» (протокол № 2/26, дата 03.09.2026), на котором присутствовал 21 сотрудник кафедры, проголосовавших единогласно за утверждение данного отзыва.

Заведующий кафедрой «Материаловедение»,
профессор, доктор технических наук
(диссертация защищена по специальности
05.02.10 Сварка, родственные процессы и технологии)



Овчинников Виктор Васильевич

Подпись В.В. Овчинникова удостоверяю.



Сведения о ведущей организации

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

Россия, 107023, г. Москва, ул. Б. Семеновская, 38

Телефон: +7 (495) 223-05-23, e-mail: mospolytech@mospolytech.ru