

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, профессора Бецофена Сергея Яковлевича 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 научной специальности 2.6.1. – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Актуальность представленной диссертационной работы В.А. Дуюновой обусловлена необходимостью совершенствования материалов для современной авиационной техники, к которым предъявляется комплекс постоянно возрастающих требований по прочности, весовой эффективности, температуре эксплуатации и безопасности эксплуатации. Одним из путей снижения массы конструкций является более широкое применение магниевых сплавов, обладающих низкой плотностью и высокими удельными прочностными характеристиками. Однако их использование, особенно в теплонагруженных и ответственных деталях, ограничивается присущими магниевым сплавам недостатками – недостаточно высокой прочностью и жаропрочностью, ограниченно низкой температурой эксплуатации, склонностью к воспламенению и анизотропией механических свойств.

В связи с этим создание высокопрочных литейных магниевых сплавов, сохраняющих работоспособность при повышенных температурах и обладающих повышенной пожарной безопасностью, представляет собой актуальную материаловедческую задачу.

Представленная работа направлена на решение указанной задачи путем комплексного легирования магниевых сплавов редкоземельными элементами (РЗЭ). Особое значение имеет исследование совместного влияния Y, Nd, Gd и других РЗЭ и установление взаимосвязи между химическим составом, формирующимися фазами и эксплуатационными свойствами материала.

Структура и содержание диссертации

Диссертационная работа В.А. Дуюновой включает введение, шесть глав, основные выводы, список использованных источников и приложения. Общий объем работы составляет 319 страниц, 107 рисунков и 79 таблиц, библиографический список содержит 242 наименования.

Во введении сформулированы цель и задачи исследования, обоснована актуальность выбранной темы, выявлены научная новизна и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации и публикациях автора.

Первая глава носит обзорно-аналитический характер. В ней рассмотрено современное состояние в области литейных магниевых сплавов, применяемых в авиационной технике, проанализированы существующие жаропрочные и пожаробезопасные сплавы. Особое внимание уделено влиянию редкоземельных элементов, фазового состава, дисперсности и морфологии вторичных фаз на механические и огневые характеристики материала. На основании проведенного анализа обоснован выбор системы Mg-PЗЭ-Zr как основы для дальнейших исследований.

Во второй главе приведены сведения об исследуемых материалах и примененных методах исследования, таких как дифференциальная сканирующая калориметрия, растровая и просвечивающая электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ и расчетное моделирование. Комплекс испытаний включал определение механических и жаропрочных характеристик, коррозионной стойкости и показателей пожаробезопасности.

В третьей главе решается задача оптимизации химического состава высокопрочного жаропрочного магниевого сплава с повышенной пожарной безопасностью. На первом этапе автором исследованы экспериментальные композиции системы Mg-PЗЭ-Zr, различающиеся содержанием Gd, Nd, Y и Ce, а также дополнительным легированием Zn, Sc, Al и Cd. Для каждого состава проведена оценка структуры, механических характеристик и сопротивления воспламенению. Дальнейшие исследования направлены на уточнение состава и выбор термической обработки, обоснованы режимы закалки и последующего старения. Исследовано влияние Y, Nd, Gd и Zn на свойства при комнатной и повышенных температурах, определены оптимальные интервалы их содержания. Полученный экспериментальный массив использован для разработки математических моделей, позволяющих рассчитывать прочностные характеристики при 250 и 300 °C в зависимости от содержания легирующих компонентов.

В четвертой главе проведено комплексное исследование оптимального состава, выбранного по результатам предыдущего этапа работы. С использованием расчетных и экспериментальных методов изучены фазовые превращения при термической обработке, особенности формирования упрочняющих фаз и их влияние на механические свойства. Обоснованы рациональные режимы термической обработки, а также исследованы последствия пережога материала. Значительная часть главы посвящена оценке пожарной безопасности разработанного состава. Установлено, что минимальная температура начала устойчивого горения составляет не менее 805 °C, а при воздействии высокотемпературного пламени материал в большинстве случаев не воспламеняется либо способен к самозатуханию.

Исследование поверхности после огневого воздействия показало перераспределение иттрия и других РЗЭ с формированием обогащенного ими поверхностного слоя, что определяет повышенную устойчивость материала к воспламенению. По результатам проведенных исследований разработанному сплаву присвоена марка ВМЛ26. В заключительной части главы рассмотрено влияние длительных эксплуатационных нагревов при 150, 250 и 350 °С на структуру и механические характеристики ВМЛ26.

В пятой главе представлены результаты промышленного опробования разработанного сплава ВМЛ26. Исследованы особенности выплавки сплава в индукционных печах, определены рациональные условия защиты расплава от окисления и отработана технология его фильтрации, направленная на снижение содержания неметаллических включений и повышение качества металла, проведена оценка стабильности механических и огневых характеристик ВМЛ26 и подтверждена возможность получения отливок с требуемым комплексом свойств.

В шестой главе проведены исследования многокомпонентной системы Mg-(Nd+Gd+Y+Er+Dy)-Zr, изучено влияние сочетания РЗЭ цериевой и иттриевой подгрупп на формирование структуры и механических характеристик, рассмотрено влияние дополнительного легирования кадмием на структуру и свойства жаропрочного магниевого сплава. По результатам исследований разработан новый сплав ВМЛ25. Выполнено сравнение сплавов ВМЛ25 и ВМЛ26 с серийными магниевыми сплавами МЛ9, МЛ10 и МЛ19. Показано преимущество новых материалов по комплексу прочностных и жаропрочных характеристик, коррозионной стойкости и сопротивлению воспламенению.

Научная новизна и практическая значимость исследований:

- определено влияние основных компонентов системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr на формирование комплекса механических свойств. Установлено, что иттрий и гадолиний в значительной степени определяют уровень прочности при повышенных температурах, тогда как изменение содержания неодима и цинка оказывает существенное влияние на пластичность и стабильность структурного состояния.

- установлены закономерности формирования свойств разработанного высокопрочного магниевого сплава при термической обработке и последующих эксплуатационных нагревах. Показано, что при 150 °С материал сохраняет стабильный уровень механических характеристик при выдержках до 1000 ч.

- экспериментально обоснована возможность повышения пожарной безопасности магниевых сплавов путем комплексного легирования РЗЭ.

Установлено перераспределение иттрия и других РЗЭ в поверхностный слой при высокотемпературном воздействии, связанное с формированием более устойчивого защитного окисленного слоя;

-Показано, что снижение интенсивности дифракционных линий упрочняющей интерметаллидной фазы β_1 ($\text{Mg}_3(\text{Zn}, \text{РЗЭ})$) 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.

-Установлена последовательность распада пересыщенного твёрдого раствора в магниевом сплаве системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr с образованием комплекса метастабильных фаз $\beta_T \rightarrow \beta' \rightarrow \beta_1$ и пластинчатых γ' и γ'' фаз, формирующихся в объеме и по границам зерен. Выявлено отличие от известного ОС β_1 фазы и матрицей $\alpha\text{-Mg}$. показано наличие ориентационного соотношения, отличающегося от ранее описанных в литературе, что свидетельствует о специфике фазообразования в разработанном сплаве.

Практическим результатом проведенных исследований стало создание новых литейных магниевых сплавов ВМЛ25 и ВМЛ26. Разработанные материалы превосходят серийные сплавы МЛ9, МЛ10 и МЛ19 по совокупности прочностных, жаропрочных и огневых характеристик; температура воспламенения повышена более чем на 100-150 °С.

Для указанных сплавов разработаны технологические решения, обеспечивающие переход от лабораторного состава к промышленному получению отливок. Отработаны процессы выплавки с использованием защитной газовой среды, фильтрации расплава и последующей термической обработки, разработаны ремонтные технологии. Практическая завершенность работы подтверждается полученными патентами, выпуском паспортов на ВМЛ25 и ВМЛ26, технических условий, технологических инструкций и рекомендаций по плавке, литью и термической обработке.

Вопросы и замечания

1. Оптимизация состава сплавов Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr проводилась по нескольким показателям, включая прочность при комнатной и повышенных температурах, пластичность и температуру воспламенения. Необходимо пояснить, какой из указанных показателей являлся определяющим при окончательном выборе химического состава ВМЛ26 и каким образом учитывался возможный конфликт между повышением прочности, пластичности и пожаробезопасности.

2. При распространении разработанной концепции на систему Mg-(Nd+Gd+Y+Er+Dy)-Zr показано, что повышение суммарной концентрации РЗЭ приводит к росту предела текучести при одновременном снижении пластичности, а введение тяжелых РЗЭ – Gd, Dy и Er – обеспечивает дополнительный вклад в твердорастворное и дисперсионное упрочнение. Необходимо было более четко разделить вклад отдельных тяжелых РЗЭ – прежде всего Er и Dy – в достигнутый уровень свойств.

3. Необходимо уточнить, чем обусловлен выбор кадмия в качестве дополнительного легирующего элемента и насколько существенным оказался его самостоятельный вклад в повышение жаропрочных характеристик по сравнению с эффектом, обеспечиваемым комплексным легированием редкоземельными элементами? Можно ли было получить сопоставимый уровень свойств без введения кадмия?

4. При анализе особенностей влияния иттрия на комплекс характеристик не указано, что иттрий приводит к формированию дальнего порядка ГПУ твердого раствора.

5. При интерпретации влияния гадолиния на жаропрочность сплавов необходимо было отметить, что в отличие от неодима и церия гадолиний и иттрий имеют высокий уровень растворимости с твердом растворе, что может оказывать существенное влияние на жаропрочность сплавов и формирование окисной пленки.

6. Предложенный критерий оценки степени дисперсионного упрочнения магниевых сплавов на основе эффекта снижения интенсивности дифракционных линий упрочняющей интерметаллидной фазы является оригинальным и исключительно важным методическим решением, при этом автор ограничил область применения этого эффекта только магниевыми сплавами, однако этот результат еще более важен для алюминиевых сплавов, тем более что диссертант имеет к этой тематике непосредственное отношение.

Заключение

Диссертационная работа Дуюновой Виктории Александровны «Научно-технологические основы разработки высокопрочных жаропрочных литейных магниевых сплавов нового поколения с повышенной пожарной безопасностью» представляет собой завершенное научно-квалификационное исследование, в котором на основе комплекса расчетных, экспериментальных и технологических работ решена крупная научно-техническая задача создания литейных магниевых сплавов с повышенными прочностными, жаропрочными и огневыми характеристиками.

Высказанные в отзыве вопросы и замечания имеют уточняющий и дискуссионный характер, касаются главным образом отдельных аспектов

оптимизации состава, технологических параметров и интерпретации полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку выполненной работы.

По совокупности представленных результатов диссертационная работа В.А. Дуюновой является завершенным исследованием, имеющим большое научное и практическое значение для развития металловедения и технологии литейных магниевых сплавов авиационного назначения.

Диссертационная работа В.А. Дуюновой по актуальности, научной новизне, обоснованности и достоверности результатов, а также по теоретической и практической значимости соответствует требованиям п 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор – Дуюнова Виктория Александровна – заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Официальный оппонент

профессор, доктор технических наук



С.Я. Бецофен

05.10.2026

Бецофен Сергей Яковлевич

профессор, доктор технических наук

профессор образовательного центра института № 11 «Новые материалы и производственные технологии»

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Адрес: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе

Телефон: +7 (499) 158-92-09

Адрес электронной почты: mai@mai.ru

Подпись С.Я. Бецофена удостоверяю:

Заместитель начальника Отдела кадров



М.А. Иванов