

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 31.1.002.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УНИТАРНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ «ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО -  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ»  
НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА «КУРЧАТОВСКИЙ  
ИНСТИТУТ» (НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» - ВИАМ), РОССИЙСКАЯ  
ФЕДЕРАЦИЯ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от «05» декабря 2023 г. № 11

О присуждении Леонову Александру Андреевичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Литейные магниевые сплавы системы Mg-P3Э-Zr с повышенной температурой воспламенения» по специальности 2.6.1. – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов принята к защите «03» октября 2023 г. (протокол заседания №7) диссертационным советом 31.1.002.01, созданным на базе федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Российская Федерация, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17, приказ Минобрнауки России от 24.10.2022 г. № 1363/нк «О выдаче разрешения на создание совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук на базе федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Соискатель Леонов Александр Андреевич, «16» ноября 1992 года рождения, в 2015 году окончил магистратуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «МАТИ» -

Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского» по направлению «Материаловедение и технологии материалов». Справка № 072 о сдаче кандидатских экзаменов выдана в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ 14.07.2023 г.

Леонов Александр Андреевич работает начальником лаборатории № 624 «Магниевого и литейного алюминиевого сплавы» федерального унитарного предприятия «Всероссийский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Диссертация выполнена в лаборатории № 624 «Магниевого и литейного алюминиевого сплавы» федерального унитарного предприятия «Всероссийский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Научный руководитель – кандидат технических наук Дуонова Виктория Александровна – начальник научно-исследовательского отделения «Титановые, магниевые, бериллиевые и алюминиевые сплавы» федерального унитарного предприятия «Всероссийский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Официальные оппоненты:

- Бецофен Сергей Яковлевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (г. Москва);

- Овчинников Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет» (г. Москва).

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (г. Самара) в своем положительном отзыве, подписанном заведующим кафедрой обработки металлов давлением академиком РАН, доктором технических наук, профессором

Гречниковым Федором Васильевичем и заведующей кафедрой «Технологии металлов и авиационного материаловедения», доктором технических наук, доцентом Носовой Екатериной Александровной, и утвержденным первым проректором – проректором по научно-исследовательской работе, доктором технических наук, доцентом Прокофьевым Андреем Брониславовичем в своем положительном отзыве, указала, что в работе Леонова Александра Андреевича решена актуальная научно-техническая задача, имеющая важное хозяйственное значение – разработаны новые магниевые сплавы, обладающие преимуществами перед серийными магниевыми сплавами, что позволит добиться повышения тактико-технических характеристик изделий авиастроительной отрасли за счет повышения весовой эффективности, безопасности эксплуатации, рабочей температуры изделий из магниевых сплавов. Разработанный в работе комплекс теоретических, технических и технологических решений необходимо использовать при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 22.03.01 и 22.04.02 «Материаловедение и технологии материалов», а также аспирантов по специальности 2.6.1. – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов. Работа представляет собой законченную, самостоятельно выполненную научно-квалификационную работу, соответствующую критериям, установленным п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (ред. от 11.09.2021 г.), а автор диссертации, Леонов Александр Андреевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Соискатель имеет 62 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 10 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 6 работ.

В опубликованных работах содержатся основные научные и практические результаты, изложенные в диссертационной работе соискателя: результаты выполненных работ по исследованию влияния редкоземельных элементов и параметров термической обработки на структуру и свойства, исследованию особенностей фазового состава и тонкой структуры литейных магниевых сплавов системы Mg-PЗЭ-Zr. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения. Все работы выполнены в соавторстве. Личный вклад соискателя состоит в постановке

цели, задач исследования, формировании плана и выборе методов проведения исследований, анализе мировых тенденций, анализе и обобщении полученных результатов исследований, разработке составов новых литейных магниевых сплавов системы Mg-PЗЭ-Zr и режимов их термической обработки, проведении комплекса экспериментальных исследований образцов литейных магниевых сплавов системы Mg-PЗЭ-Zr, составлении нормативно-технической документации, подготовке публикаций и представлении результатов работ.

Наиболее значимые работы:

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 магниево-редкоземельном 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 МЛ19 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.
7. Мостяев И.В., Трофимов Н.В., Леонов А.А. Магниево-редкоземельные 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., Дуонова 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 магниевых 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».

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Отзыв на диссертацию ведущей организации – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева». Отзыв подписан заведующим кафедрой обработки металлов давлением академиком РАН, доктором технических наук, профессором Гречниковым Федором Васильевичем и заведующей кафедрой технологий металлов и авиационного материаловедения доктором технических наук, доцентом Носовой Екатериной Александровной, и утвержден первым проректором – проректором по научно-исследовательской работе доктором технических наук, доцентом Прокофьевым Андреем Брониславовичем. Отзыв положительный.

Имеются замечания:

- в практической значимости работы отмечено, что на основании проведенных исследований была разработана нормативная документация (ТР, ТИ) на плавку, литье разработанных сплавов и изготовление отливок из них, в которой содержатся, как правило, параметры плавки. При этом в самой работе какие-либо исследования, посвященные данному направлению, отсутствуют;

- в работе не показаны показатели времени остаточного горения, методика определения которой автором разработана, описана и внесена в практическую

значимость, также не описан характер изменений, происходящих с магниевым сплавом после огневых испытаний;

- в разделе 3.1 на основании теоретических и экспериментальных исследований автором выбрана композиция № 3 для проведения дальнейших исследований, содержащая в своем составе иттрий, неодим и гадолиний, а также добавку церия. В дальнейших исследованиях роль церия не отражена;

- отсутствует пояснение, почему выбрано только одно время закалки в условиях различных температур, приведенных в таблице 17 раздела 3.4;

- целью работы является разработка нового поколения литейных магниевых сплавов, при этом при проведении исследований автором рассматривается только структура и комплекс физико-механических и эксплуатационных свойств, технологические же параметры не изучаются. Оказывает ли рассмотренное автором влияние легирования редкоземельными элементами, например, на жидкотекучесть?

- в описании структуры и объема диссертации в автореферате указано, что работа состоит из трех глав. На самом деле в диссертации четыре главы. Описания результатов четвертой главы в автореферате не приводится.

2. Отзыв на диссертацию официального оппонента Бецофена Сергея Яковлевича, доктора технических наук, профессора, профессора кафедры «Технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)». Отзыв положительный.

Имеются замечания:

- в работе исследования методом ПЭМ ограничены старением при 220 °С в течение 10 часов, что не позволяет оценить соотношения метастабильных фаз  $\beta$  типа в сплаве в зависимости от температуры и времени старения и более надежно обосновать оптимальные условия упрочняющей обработки;

- результаты сравнительных огневых испытаний сплава системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr и серийного магниевых сплава МЛ10 показали, что преимущество разрабатываемого сплава с РЗМ в значительной степени определяется образованием защитной окисной пленки, которая в отличие от МЛ10 предотвращает взаимодействие металла с кислородом, к сожалению, в работе отсутствуют исследования защитной пленки в зависимости от состава сплава;

- в работе исследовали структуру сплавов на трех структурных уровнях, металлографическом, рентгеноструктурном и ПЭМ, при этом предложен оригинальный количественный критерий эффективности упрочняющей термообработки на основании снижения интенсивности отражений от крупных интерметаллидов за счет увеличения доли рентгеноаморфной составляющей, которую затем тщательно исследовали методами ПЭМ, желательно в будущем найти количественные корреляции служебных свойств с соотношением нанокристаллических неравновесных метастабильных фаз типа  $\beta$  и LPSO;

- следовало бы уточнить причину выбора для проведения исследований температур закалки 540 и 560 °С, в то время, как ДСК анализ и моделирование показали температуру плавления эвтектики 520-533 °С;

- имеются ошибки и неточности в тексте, например, на стр. 90 ошибочно приведена ссылка на рис. 20, тогда как это рис. 25.

Указанные замечания не снижают положительную оценку проведенной работы, не ставят под сомнение научную новизну, выводы и полученные результаты.

2. Отзыв на диссертацию официального оппонента Овчинникова Виктора Васильевича, доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой «Материаловедение» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет». Отзыв положительный.

Имеются замечания:

- в работе отсутствуют какие-либо исследования влияния технологических параметров плавки и литья литейного магниевого сплава Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr, такие как температура и время введения редкоземельных элементов, время и температура рафинирования. Между тем, это является неотъемлемой частью изготовления отливок из любых металлических материалов;

- в разделе 3.1 в части работы, посвященной исследованию влияния РЗЭ и цинка на прочностные и жаропрочные характеристики и представленной в таблице 12, отсутствуют исследования варьирования содержания циркония;

- в этой же таблице 12 редкоземельные элементы по своему максимальному значению не превышают 4 %. Отсутствует уточнение причины этого факта;

- согласно описанию полученных регрессионных моделей, отмечена негативная роль иттрия и цинка на временное сопротивление и, гадолиния и цинка на предел

текучести. Исключение данных элементов и перерасчет математических моделей позволили бы повысить точность сходимости спрогнозированных значений с фактически полученными;

- в исследованиях, посвященных огневым характеристикам, указана температура воспламенения литейного магниевого сплава Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr, которая составила от 805 до 930 °С. Отсутствуют данные по аналогичной характеристике серийного жаропрочного литейного магниевого сплава МЛ10 и габаритам испытываемых образцов, также следовало указать, происходило ли воспламенение образцов в процессе испытаний и какое время затухания, методика определения которой представлена в практической значимости.

4. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», подписан кандидатом технических наук Е.А. Лукиной. Отзыв на автореферат.

Имеются замечания:

- в автореферате отсутствуют исследования и показатели коррозионной стойкости, что является важной характеристикой вследствие вышеописанных недостатков магневых сплавов;

- автором отмечено, что упрочнение достигается за счет фаз двух типов –  $\beta$  и  $\gamma$ , причем вторая группа представлена как одиночными фазами, так и длиннопериодными фазами (LPSO). Автором показана последовательность фазовых превращений только для одной группы, а именно « $\beta$ »-типа, а последовательность превращений для фаз « $\gamma$ »-типа не отражена.

5. Акционерное общество «ОДК – Авиадвигатель», подписан главным металлургом Г.В. Черкашневым. Отзыв на автореферат.

Имеются замечания:

- ввиду низкой коррозионной стойкости магния и сплавов на его основе и возможных условий их эксплуатации во всеклиматических условиях автору следовало привести сравнительные данные таких исследований, либо продолжить дальнейшие исследования в этом направлении;

- в таблице 15 приведены фактически полученные на трех образцах средние значения после проведения прогнозирования и апробирования на практике, но не

представлен разброс минимальных и максимальных значений полученных прочностных характеристик (временного сопротивления и предела текучести).

6. Открытое акционерное общество «Каменск-Уральский металлургический завод», подписан директором по технологии кандидатом технических наук А.В. Разинкиным. Отзыв на автореферат.

Имеются замечания:

- отсутствие в тексте автореферата сведений о параметрах плавки и показателях коррозионных свойствах пожаробезопасного литейного магниевого сплава, что позволило бы еще больше укрепить практическую составляющую исследований.

7. Публичное акционерное общество «Объединенная авиастроительная корпорация» «ОКБ им. А.И. Микояна», подписан начальником отдела технологического сопровождения конструкторских работ А.С. Лукашиным. Отзыв на автореферат.

Имеются замечания:

- в автореферате следовало более подробно осветить аспекты, связанные с коррозионной стойкостью, ввиду того, что это является одной из основных причин сдерживания распространения магниевых сплавов в промышленности.

8. Закрытое акционерное общество «Интехмаш», подписан генеральным директором доктором технических наук В.Г. Панаевым. Отзыв на автореферат.

Имеются замечания:

- дальнейшие исследования следует продолжить в направлении улучшения моделей прогнозирования свойств, так как она не учитывает влияние параметров плавки, литья, термической обработки, примесных элементов;

- хотелось бы понимать на базе каких редкоземельных элементов разработаны жаропрочный ВМЛ25 и пожаробезопасный ВМЛ26 магниевые сплавы, если это та же система Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr, тогда чем обусловлено различие в полученных свойствах?

- также в практической значимости автору можно было бы указать температуру воспламенения жаропрочного сплава ВМЛ25. На каком уровне она находится по отношению к пожаробезопасному ВМЛ26 и серийному МЛ10?

9. Акционерное общество «Национальный центр вертолетостроения им. М.Л. Миля и Н.А. Камова», подписан начальником управления ФКИТП

АО «НЦВ Миль и Камов» кандидатом технических наук А.К. Слизовым. Отзыв на автореферат.

Имеются замечания:

- не приведена оценка экономической составляющей в сравнении с серийным сплавом МЛ10, так как в состав исследуемой композиции входит большее количество редкоземельных элементов, что приведет к повышению стоимости сплава;

- необходимо уточнить технологичность сплава с точки зрения заливки, а именно, каковы минимальные толщины стенок, максимальные габариты возможных изделий. Это важно при рассмотрении вопроса замены серийных магниевых сплавов с уменьшением толщин стенок для обеспечения весовой эффективности по отношению к ним.

10. Публичное акционерное общество «Яковлев» филиал ПАО «Яковлев» «Региональные самолеты», подписан главным конструктором SSJ-NEW К.А. Кузнецовым. Отзыв на автореферат.

Имеются замечания:

- в автореферате отсутствует информация о технологических приемах для обеспечения защиты от окисления в процессе высокотемпературной (560 °С) закалки;

- не указано, чем обусловлена повышенная температура воспламенения выбранной композиции, равная 805 °С, при которой начинается процесс горения, в сравнении с серийным сплавом МЛ10.

Все отзывы носят положительный характер. В отзывах отмечено, что диссертационная работа является завершенной, самостоятельно выполненной научно-квалификационной работой, решающей важную задачу по разработке новых магниевых сплавов. Работа соответствует требованиям и критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842, предъявленным к диссертациям на соискание степени кандидата наук, а ее автор, Леонов Александр Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

- доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Бецофен Сергей Яковлевич является признанным специалистом в области магниевых сплавов. Под руководством и при непосредственном участии Бецофена С.Я. выполнен огромный объем научно-исследовательских работ, в том числе в рамках международных коопераций, направленных на исследования микроструктур, свойств магниевых сплавов;

- доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедения» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет» Овчинников Виктор Васильевич является одним из ведущих ученых в области материаловедения легких сплавов. Под руководством и при непосредственном участии Овчинникова В.В. проведен большой объем научно-исследовательских работ, посвященных разработке и исследованию свойств легких сплавов, на основании полученных результатов выпущены монографии и учебные пособия, имеющийся опыт оппонента позволяет успешно выполнять функции заведующего кафедрой «Материаловедения»;

- федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» является ведущим образовательным учреждением России в области материалов и технологий для ракетно-космической, авиационной, металлургической и других отраслей промышленности. Заключение было подготовлено учеными, которые непосредственно занимаются вопросами в области строения, свойств и методов обработки металлов и сплавов (заведующий кафедрой обработки металлов давлением академик РАН, д.т.н., профессор Гречников Ф.В.; заведующий кафедрой технологий металлов и авиационного материаловедения д.т.н., доцент Носова Е.А.

Список основных публикаций сотрудников ведущей организации за последние 5 лет:

1. Гречников Ф.В. Учет наследственности микроструктуры при моделировании полунепрерывного литья и последующей горячей прокатки слитков / Ф.В. Гречников, В.Ю. Арышенский, Я.А. Ерисов, С.В. Сурудин // *Металлургия машиностроения*. – 2019. № 4. С. 42-44
2. Костышев В.А. Исследование технологических схем и режимов прокатки раскатных колец из полых литых заготовок / В.А. Костышев, Я.А. Ерисов // *Металлы*. 2019. № 4. С. 89-94
3. Kostyshev V.A. Technological Schemes and Conditions for the production of rolling rings from hollow as-cast blanks // V.A. Kostyshev, Y.A. Erisov // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2019. Vo. 2019. No. 7. P. 737-742
4. Erisov Ya. The end-to-end simulation of semi-continuous casting and subsequent hot rolling with account of microstructure / Ya. Erisov, S. Surudin, I. Bobrovskij, C. Jiang, B. Khamrayev // *Key Engineering Materials*. 2019. Vol. 822. P. 11-15
5. Гречников Ф.В. Разработка реологической модели горячей деформации на примере алюминий-литиевых сплавов 1424 и В-1461 / Гречников Ф.В., Ерисов Я.А., Сурудин С.В., Разживин В.А. // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2020. № 6. С. 44-51
6. Khaimovich, A.I. Heat propagation in deformable polycrystalline metals with grain-size variation / Khaimovich A.I., Bobrovskii N.M., Luk'yanov A.A. etc. // *Russian engineering research* 2020. Vol. 40. Issue 11. P. 966-969.
7. Никитин В.И. Наследственное влияние структуры шихты и обработки расплава на свойства и деформируемость заэвтектических силуминов / В.И. Никитин, Д.Г. Черников, К.В. Никитин и др. // *Литейное производство*. 2021. № 6. С. 6-12
8. Khaimovich, A. Interface quality indices of Al-10Si-Mg aluminum alloy and Cr18-Ni10-Ti stainless-steel bimetal fabricated via selective laser melting / Khaimovich A., Erisov Y., Smelov V. etc. // *Metals*. 2021. Vol. 11. Issue 1. P. 1-16
9. Grechnikov, F.V. Development of a Rheological model of hot deformation as Exemplified by 1424 and B-1461 Aluminum Lithium alloys / F.V. Grechnikov, Y.A. Erisov, S.V. Surudin, V.A. Razzhivin // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2021. Vol. 62. No. 1. P. 48-53

10. Aryshenskii, V. Alloying elements effect on the recrystallization process in magnesium-rich aluminum alloy / F. Grechnikov, E. Aryshenskii, Ya. Erisov, S. Konovalov, M. Tepterev, A. Kuzin // Materials. 2022. Vol. 15-15(20): 7062.

11. Khaimovich, A. Research on cracked conditions in nickel chrome alloy Ni50Cr33W4,5Mo2,8TiAlNb, obtained by direct laser deposition / Khaimovich A., Shishkovsky I., Erisov Y. etc. // Metals 2022. Vol. 12. Issue 11. № 11.

12. Agapovichev, A.V. Investigation of soft magnetic material Fe-6,5Si fracture obtained by additive manufacturing / Agapovichev A.V., Khaimovich A.I., Erisov Y.A., etc. // Materials. 2022. Vol. 15. Issue 24. № 24.

13. Khaimovich A. Thermodynamic conditions for consolidation of dissimilar materials in bimetal and functional graded structured / Khaimovich A., Erisov Ya., Shishikovsky I. // Materials. 2022. Vol. 15. Issue 3.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- показано, что совокупное влияние легирования редкоземельными элементами (иттрий, неодим, гадолиний) и упрочняющей термической обработки (высокотемпературная выдержка под закалку при температуре 560 °С в течение 10 часов с последующим старением при температуре 220 °С в течение 10 часов) обеспечивает наилучшее упрочнение сплава Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr, что выражается в повышении минимальных значений временного сопротивления, предела текучести и предела длительной прочности на базе 100 часов;

- экспериментально установлены коэффициенты регрессионных математических моделей прогнозирования прочностных свойств по химическому составу сплава Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr, показана высокая сходимость фактически получаемых показателей с прогнозируемыми;

- разработаны методики проведения огневых испытаний по определению температуры воспламенения и времени остаточного горения применительно к магниевым сплавам путем воздействия на образец открытого пламени с температурой 1100 °С;

- разработаны жаропрочный ВМЛ25 и пожаробезопасный ВМЛ26 литейные магниевые сплавы, превосходящие по прочностным и жаропрочным свойствам серийно применяющиеся магниевые сплавы.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что установленные закономерности влияния редкоземельных элементов и параметров термической обработки на структуру, свойства и последовательность фазовых превращений могут быть использованы для дальнейших разработок литейных магниевых сплавов с повышенными прочностными, жаропрочными и огневыми характеристиками с целью обеспечения прочности, надежности и безопасности при эксплуатации изделий из них. Результаты исследований, в частности методом просвечивающей электронной микроскопии, расширяют представления о структурных особенностях и процессах, протекающих в магниевых сплавах, легированных редкоземельными элементами.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- определены концентрации легирующих элементов, обеспечивающие достижение требуемого уровня свойства;
- определены температурно-временные параметры термической обработки, обеспечивающие в совокупности с легирующими элементами максимальное упрочнение системы за счет выделения упрочняющих интерметаллидов;
- показано, что выбранная система легирования иттрием, неодимом и гадолинием обеспечивает достижение повышенной температуры воспламенения выше 805 °С и максимальное сохранение массы образца;
- разработанные технологии и методические материалы по определению огневых характеристик оформлены большим объемом нормативной документации (ТР 1.2.2872-2020; ТИ 1.595-24-1480-2021; ТИ 1.595-24-638-2015 с литерой А; ТИ 1.595-24-737-2015 с литерой А; ММ 1.2.216-2021; ММ 1.2.217-2021);
- получен комплекс свойств жаропрочного ВМЛ25 и пожаробезопасного ВМЛ26 литейных магниевых сплавах (паспорты №№ 1945 и 2042), необходимый для выбора материала на стадии проектирования изделий и позволяющий установить возможность его применения в конструкции изделия;
- проведено технологическое опробование с положительным результатом разработанных жаропрочного ВМЛ25 и пожаробезопасного ВМЛ26 литейных магниевых сплавов в условиях металлургических предприятий АО «МКБ «Факел» и АО «АК «Рубин», по результатам которого получен акт изготовления фасонных отливок в количестве 2500 кг.

Оценка достоверности результатов исследования выявила достоверность полученных результатов и сделанных выводов, что обеспечивается использованием современного аттестованного поверенного оборудования, комплексным всесторонним подходом, большим объемом полученных данных.

Личный вклад соискателя состоит в постановке цели, задач исследования, формировании плана и выборе методов проведения исследований, анализе мировых тенденций, анализе и обобщении полученных результатов исследований. Леонов А.А. непосредственно принимал участие в проведении исследований, получении и анализе полученных результатов, разработке математических регрессионных моделей прогнозирования по химическому составу, разработке режимов упрочняющей термической обработки литейного магниевого сплава Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr, разработке двух новых литейных магниевых сплавов, проведении технологического опробования на двух металлургических предприятия авиакосмической отрасли.

В ходе защиты диссертации были заданы вопросы и высказаны следующие критические замечания:

1. В докладе отмечено, что упрочнение происходило за счет интерметаллидов циркония, но в тоже время было отмечено, что они приводят к гетерогенному росту метастабильной фазы  $\beta_1$ . С целью наилучшего состояния структуры не лучше ли исключить введение в состав данного компонента?

2. В процессе эксплуатации прекращаются ли выявленные превращения, образуются стабильные фазы, которые и составляют комплекс свойств? Насколько они стабильны в процессе эксплуатации и происходят ли при более высоких температурах, чем эксплуатационные?

3. Почему в качестве легирующих из всех редкоземельных элементов были выбраны именно иттрий, неодим и гадолиний, а не более дешевые?

4. В работе приведены сведения по влиянию параметров термической обработки на твердость, прочностные показатели, однако не показано, как влияют параметры термической обработки на температуру воспламенения?

5. На представленной ДСК кривой показан тепловой эффект, который показан острым пиком и протекает в интервале температур 511-519 °С. Указано, что это растворение эвтектической составляющей. Однако известно, что растворение - это диффузионный процесс, то есть он протекает либо во времени, либо в достаточно

широком интервале температур. У Вас же разница всего 8 °С и по виду пика скорей всего это плавление эвтектической составляющей, а потом растворение при выдержке.

6. В название упоминается повышенная температура воспламенения, которая в работе объясняется образованием оксидной пленки. Необходимо ли заранее формировать эту пленку, чтобы не было проблем с воспламеняемостью при эксплуатации?

7. Насколько пористой образовывалась оксидная пленка, препятствующая контакту атомов магния с кислородом?

8. Результаты сравнительных огневых испытаний сплава системы Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr и серийного магниевых сплава МЛ10 показали, что преимущество разрабатываемого сплава с РЗЭ в значительной степени определяется образованием защитной окисной пленки, которая в отличие от МЛ10 предотвращает взаимодействие металла с кислородом. К сожалению, в работе отсутствуют исследования защитной пленки в зависимости от состава сплава.

9. Согласно описанию полученных регрессионных моделей, отмечена негативная роль иттрия и цинка на временное сопротивление, и гадолиния и цинка на предел текучести. Исключение данных элементов и перерасчет математических моделей позволили бы повысить точность сходимости спрогнозированных значений с фактически полученными.

Соискатель Леонов А.А. согласился с замечаниями, ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

1. Цирконий в магниевых сплавах используется как модификатор за счет твердозеренного измельчения и измельчения нерастворенными частицами циркония, которые при охлаждении являются центрами кристаллизации и зарождения дендритов  $\alpha$ -твердого раствора. Ранее исследователями уже было доказано, что отсутствие циркония в составе и отсутствия такого процесса как модифицирование цирконием приводит к огрублению структуры и снижению механических характеристик. Соответственно именно поэтому цирконий нашел свое распространение практически во всех системах магниевых сплавов, в том числе с редкоземельными элементами, за исключением разве что системы Mg-Al-Zn, где цирконий является нежелательной добавкой ввиду его взаимодействия с алюминием. На примере же исследований, проведенных в работе, доказано, что

такой характер зарождения имеет место быть, но он не приводит к разупрочнению материала и обеспечивает достижение требуемого уровня свойств.

2. Все зависит от времени эксплуатации, потому что, если это кратковременные забросы, то влияние их на характеристики незначительны, если это длительные забросы, то это может привести к фазовым превращениям, однако данных исследований в работе не проведено и это запланировано в дальнейшем. В целом были предварительные испытания и разупрочнение материала при кратковременных забросах незначительно. В процессе старения на графиках было показано, что увеличение времени старения, то есть увеличение выдержки инициирует эти превращения.

3. В исследованиях также использовался церий с целью снижения стоимости композиции. Кроме того, в работе помимо гадолиния, иттрия и неодима были рассмотрены диспрозий, эрбий и иттербий. По результатам предварительных испытаний композиция с данными элементами уступала по прочностным, жаропрочным и огневым характеристикам. Поэтому для исследований в дальнейшем была выбрана композиция с иттрием, гадолинием и неодимом. Композиция с диспрозием, эрбием и иттербием также использовалась в аналогичных исследованиях и стала основой для разработки жаропрочного сплава ВМЛ25 с повышенными пластическими характеристиками.

4. При проведении огневых испытаний и разработке методик в качестве образцов применялись как в литом, так и в термообработанном состояниях. Разница между показателями температуры воспламенения составляла не более 5 °С, что позволяет сделать вывод о том, что если термическая обработка и влияет на данный показатель, то незначительно.

5. График дальше не продлен, но пик начинается с указанной температуры и заканчивается при температуре 540 °С. При указанной температуре действительно происходит начало плавления эвтектики.

6. Магниевого сплавы как материал не эксплуатируются в изделиях без дополнительной защиты. В условиях двигателестроения могут применяться огнезащитные пасты, которые дополнительно обеспечивают требуемую защиту. В части формирования защитной пленки в случае с серийным сплавом МЛ10 защитная пленка, которая содержит неодим, не обеспечивала требуемой защиты и происходило возгорание, и температура воспламенения была невысокой. В случае с

исследуемым сплавом защитная пленка имела синергетический эффект влияния как оксида иттрия, так и других редкоземельных элементов, что и повышало прочность этой пленки и температуру воспламенения.

7. Оксидная пленка не была пористой, однако при воздействии пламени газовой горелки происходило ее «разрушение» и горение образца, а вот в структуре, в которой имелась остаточная эвтектика, в результате ее выгорания образовывались межграницные поры.

8. Ключевая роль в обеспечении защитной функции в процессе окисления отводится оксиду иттрия, однако также присутствует синергетический эффект оксидов других легирующих элементов, образующих плотную пленку на поверхности образцов по сравнению с оксидом магния. Образование более стабильного и плотного защитного слоя по сравнению с оксидом магния и способствует повышению температуры воспламенения. В составе МЛ10 из редкоземельных элементов присутствует только неодим, который также способствует образованию защитной пленки, однако один неодим не способен в значительной мере повышать температуру воспламенения магниевых сплавов и жаропрочность.

9. Действительно, если исключить элементы с негативной ролью, можно повысить точность значений. Однако указанные элементы положительно влияют на такие характеристики, как жаропрочность, огнестойкость, необходимые для эксплуатации в условиях повышенной температуры. Поэтому с целью сохранения высоких для магниевых сплавов показателей данных характеристик и для понимания показателей прочностных свойств в работе при моделировании было решено использовать полную систему легирования.

10. Соискатель указал, что все высказанные замечания, пожелания и недостатки будут учтены в дальнейшей научной работе.

На заседании «5» декабря 2023 г. диссертационный совет принял решение, что представленная диссертационная работа соискателя Леонова А.А. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, соответствующую требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических работ. За проведенные исследования, посвященные литейным магниевым сплавам

системы Mg-P3Э-Zr с повышенной температурой воспламенения, имеющие важное значение для авиационно-космической отрасли, присудить Леонову Александру Андреевичу ученую степень кандидата технических наук по научной специальности 2.6.1. – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 4 докторов технических наук по специальности 2.6.1. – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов, участвовавших в заседании, из 19 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 16, против – 0, недействительных бюллетеней – 1.

Председатель  
диссертационного совета  
д.т.н.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н.



Антипов Владислав  
Валерьевич

фамилия, имя, отчество  
(полностью)

Горбовец Михаил  
Александрович

фамилия, имя, отчество  
(полностью)

Дата оформления заключения: «05» декабря 2023 г.