

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента **Носовой Екатерины Александровны**, доктора технических наук, доцента, заведующего кафедрой «Технологии металлов и авиационного материаловедения» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» на диссертационную работу **Казакова Михаила Сергеевича** на тему: «Улучшение структуры и свойств алюминиевых сплавов для изделий перспективной ракетно-космической техники совершенствованием режимов технологических воздействий», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.6.17 – Материаловедение

### **Актуальность темы диссертационной исследования**

Развитие ракетно-космической отрасли ставит множество материаловедческих задач. Технические требования, формулируемые в конструкторской документации, требуют разработки новых материалов и дальнейшей их обработки для формирования комплекса свойств, а также более совершенных методов соединения конструктивных элементов. Алюминиевые сплавы в виде различных полуфабрикатов широко применяются для изготовления деталей в изделиях современного ракетостроения. При этом особенности конструкции ракетно-космической техники диктуют требования о необходимости использования разнообразных алюминиевых сплавов. Поэтому в различных узлах космических аппаратов и ракет-носителей находят применения отливки, штамповки, прессованные и катанные полуфабрикаты, которые в зависимости от системы легирования и содержания легирующих элементов могут быть термически упрочняемыми и не упрочняемыми. Применение новых экономно-легированных сплавов позволит обеспечить возможность повышения полезной нагрузки для ракет-носителей за счет пониженной массы и высоких удельных механических свойств.

Не менее важным аспектом получения готовой конструкции является процесс сборки узлов из отдельных элементов. Самым распространённым методом создания неразъемных соединений является сварка. Однако традиционные способы сварки методом плавления имеют множество недостатков. Дальнейшее повышение характеристик также возможно с внедрением новых технологий сварки.

Сварка трением с перемешиванием происходит в твердом состоянии и позволяет решить проблему образования широкого спектра дефектов и разупрочнения вследствие формирования зоны термического влияния. Этот процесс имеет преимущества с точки зрения экологии и экономии энергии по сравнению с другими технологиями соединения. Важным направлением для создания новых образцов космической техники, обеспечения надёжности конструкций в процессе их изготовления и эксплуатации является совершенствование способов обработки алюминиевых сплавов, а также применение перспективных методов воздействия на материалы для формирования улучшенной структуры и уровня свойств.

Исходя из этого, актуальность темы диссертационной работы Казакова М.С., направленной на разработку режимов технологических воздействий, обеспечивающих улучшение структуры и свойств алюминиевых сплавов, применяемых для изготовления перспективной ракетно-космической техники, не вызывает сомнения.

### **Структура, объем и форма изложения диссертации**

Диссертация изложена на 209 страницах машинописного текста, включает 99 рисунков и 27 таблиц. Диссертационная работы состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, содержащего 185 наименований, приложения.

Диссертация написана четким, грамотным языком; иллюстрации хорошо дополняют текст. Существенных замечаний по оформлению диссертации нет.

Результаты диссертации опубликованы в 9 научных работах, в том числе 6 статей в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ, из которых 2 статьи в журналах, соответствующих научной специальности 2.6.17, имеющих категорию К2. В публикациях изложены основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, проведенных автором.

Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались на российских и международных научно-технических конференциях: Актуальные проблемы ракетно-космической техники (г. Самара, 2019 г.), Высокие технологии в машиностроении (г. Самара, 2021 г.), Актуальные проблемы ракетно-космической техники (г. Самара, 2021 г.), Современные материалы, техника и технология (г. Курск, 2021 г.), Пром-Инжиниринг 2022 (г. Сочи, 2022 г.).

### **Краткая характеристика содержания диссертации**

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая значимость работы, приведены объект и предмет исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, подтверждена достоверность результатов работы, указан личный вклад автора в выполненные исследования. Приводятся сведения об апробации работы и публикациях, структуре и объеме диссертации.

**В первой главе** выполнен анализ конструкторско-технологических требований к элементам и узлам ракетно-космической техники; представлен аналитический обзор литературы, в котором установлены основные этапы развития технологий получения изделий из алюминиевых сплавов для космической и ракетной техники; проанализированы современные методы получения неразъемных соединений, описаны результаты разработки и исследования перспективных сплавов и новые методы формирования их структуры и свойств. На основании выполненного анализа сформулированы цель и задачи работы.

**Во второй главе** изложены методические особенности проведения экспериментальных работ, выполненных структурных, физико-механических, химических исследований. Описаны исследуемые алюминиевые сплавы.

**В третьей главе** исследованы особенности процессов деформации, термической обработки, сварки и литья, которые применяются для получения деталей ракетно-космической техники. Показано, что в сплаве АК9 структурно-фазовое состояние исходного материала наследуется в отливках и при наличии железосодержащих фаз в виде хрупких пластин может оказывать отрицательное влияние на качественные характеристики литых заготовок. Для снижения уровня брака рекомендовано использовать при приготовлении шихты чушек с предварительно модифицированной структурой, в которой отсутствуют включения пластин фазы переменного состава  $Al_xSi_yFe_zMn_q$ .

Представлены результаты исследования, демонстрирующие возможность сохранения свежезакаленного состояния для сплавов Д1 и Д16 за счет выдержки при

отрицательной температуре с последующим формированием оптимальных механических свойств путем естественного старения.

Выявлено влияние нагрева в процессе сварки тепловых труб термостабилизирующих систем космических аппаратов на пластические свойства штуцеров из сплава АДЗ1, связанное с трансформацией зонно-состаренного состояния сплава в состояние с присутствием выделений фазового типа. Охлаждение зон термического влияния сварки за счет применения медных накладок позволило исключить образование выделений фазового типа и предотвратить появление трещин при сплющивании образцов и обжатию штуцеров.

Установлено, что применение режимов ускоренного старения деталей из сплава АК6 позволяет получить высокий уровень механических свойств и коррозионной стойкости при сокращении длительности цикла термической обработки на 65%.

В **четвертой главе** представлены результаты исследования особенностей структуры, механических свойств и коррозионной стойкости перспективного экономнолегированного сплава системы Al-Mg-Sc, претерпевшего различные виды деформации в процессе получения полуфабрикатов.

Установлено, что в структуре полуфабрикатов исследуемого сплава присутствует твердый раствор на основе Al и дисперсоиды металлов размером менее 1 мкм. Структура поковок отличается меньшей проработанностью (степень деформации 20-50%), чем у плит, а зерна ориентированы в хордовом направлении. По границам зерен наблюдаются фазы кристаллизационного происхождения, не видоизменившиеся в процессековки из слитка.

Показано, что катаные полуфабрикаты из перспективного экономнолегированного сплава системы Al-Mg-Sc обладают высоким уровнем механических свойств во всем исследованном диапазоне температур (от  $-196^{\circ}\text{C}$  до  $200^{\circ}\text{C}$ ). Механические свойства поковок существенно ниже, чем у катаных полуфабрикатов. Максимальный уровень свойств наблюдается в высотном направлении. Проведен анализ влияния времени хранения полуфабрикатов из сплава системы Al-Mg-Sc на механические характеристики.

Исследование коррозионной стойкости показало, что листы из сплава Al-Mg-Sc обладают стойкостью против общей коррозии, коррозии под напряжением, межкристаллитной коррозии и расслаивающей коррозии. Для плит выявлена стойкость против общей коррозии, коррозии под напряжением и расслаивающей коррозии, при этом выявлена склонность к межкристаллитной коррозии.

В **пятой главе** рассмотрено влияние режимов сварки трением с перемешиванием (СТП) на структуру и свойства сварных соединений катаных полуфабрикатов из сплава системы Al-Mg-Sc в диапазоне температур от  $-196$  до  $200^{\circ}\text{C}$  и проведено их сопоставление с уровнем свойств сварных соединений, полученных сваркой плавлением. Определены возможности выявления характерных внутренних дефектов сварных соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием различными методами неразрушающего контроля.

Установлена характерная структура сварных соединений СТП из сплава системы Al-Mg-Sc, а также влияние режимов сварки на её формирование. Проведено подробное исследования дефектов типа канальной поры и твердых включений.

Показано, что прочность сварных соединений СТП не зависит от исходного структурного состояния полуфабриката и направления волокна. Коэффициент прочности сварных соединений СТП из перспективного экономнолегированного сплава системы Al-

Mg-Sc для листов 0,9 при  $-196^{\circ}\text{C}$  и  $20^{\circ}\text{C}$ ; 0,8 при  $200^{\circ}\text{C}$ ; для плит 0,9 при  $-196^{\circ}\text{C}$ , 0,85 при  $20^{\circ}\text{C}$  и 0,8 при  $200^{\circ}\text{C}$ .

Установлено, что сварные соединения СТП обладают стойкостью к общей коррозии, коррозии под напряжением и расслаивающей коррозии. При этом сварные соединения СТП нагартованных плит и отожженных листов имеют явные признаки разрушения, наблюдаемые после испытаний на межкристаллитную коррозию.

По результатам апробации различных методов неразрушающего контроля установлено, что с учетом ограничений данных методов рекомендуется ультразвуковой эхо-импульсный метод с датчиками на фазированных решетках в сочетании с дифракционно-временным методом для проведения сплошного контроля при двухстороннем доступе к сварному соединению; при одностороннем доступе необходимо применять только эхо-импульсный метод. В качестве дополнительных методов рекомендуется рентгенографический и капиллярный методы.

В **заключении** приведены основные результаты и выводы по диссертационной работе.

В **приложении** приведен акт о внедрении (использовании) результатов диссертационной работы в производственной деятельности АО «РКЦ «Прогресс» (г. Самара)

#### **Оценка степени научной новизны результатов диссертации**

В диссертационной работе автором получены следующие новые научные результаты:

1. Выявлены новые закономерности формирования структуры и свойств алюминиевых сплавов при варьировании режимов технологических воздействий в процессах получения отливок, сварки, деформирования и термической обработки.

2. Впервые установлены причины изменения микроструктуры, падения пластических свойств и разрушения сварных герметизирующих деталей термостабилизирующих систем космических аппаратов, изготавливаемых из сплава системы Al-Mg-Si.

3. Установлены особенности кинетики старения сплавов системы Al-Cu-Mg в процессе выдержки после закалки при отрицательной температуре; определены инкубационный период до начала процессов интенсивного упрочнения сплавов и влияние выдержки при отрицательной температуре на механические свойства. Выявлено влияние ускоренного старения при повышенных температурах на механические свойства и коррозионную стойкость сплава системы Al-Mg-Si-Cu.

4. Определены закономерности влияния структурно-фазового состояния исходных шихтовых материалов на формирование структуры, свойств и дефектов в отливках сплава системы Al-Si-Mg.

5. Впервые установлено влияние температуры на механические свойства экономно-легированного сплава Al-Mg-Sc в отожженном и нагартованном состоянии деформированных полуфабрикатов (плиты, листы, поковки).

6. Впервые установлено влияние режимов сварки трением с перемешиванием на структуру и свойства сварных соединений катаных полуфабрикатов различной толщины из сплава системы Al-Mg-Sc в диапазоне температур от  $-196^{\circ}\text{C}$  до  $200^{\circ}\text{C}$ , а также приведена классификация внутренних дефектов сварных соединений СТП, определена степень их

влияния на эксплуатационные свойства, представлены рекомендации по выявлению дефектов методами неразрушающего контроля.

### **Степень обоснованности и достоверности научных положений, рекомендаций, заключений и выводов**

Обоснованность и достоверность научных положений, рекомендаций, заключений и выводов, сформулированных в диссертационной работе, подтверждаются использованием аттестованных методик проведения исследования на современном оборудовании и широким спектром методов исследования. При выполнении диссертационной работы был выполнен большой объем экспериментальных исследований, что обеспечивает достоверность полученных результатов. Данные, полученные в рамках экспериментальных работ, обладают удовлетворительной сходимостью с положениями теоретического металловедения и в целом не противоречат данным нормативных документов и результатам исследований других авторов.

### **Соответствие представленной работы требованиям, предъявляемым к диссертациям и паспорту специальности**

Положения и результаты диссертации Казакова М.С. обладают научной новизной и практической значимостью, при этом полученные результаты соответствуют научным положениям. Основные результаты диссертации относятся к области теоретических и экспериментальных исследований фундаментальных связей структуры алюминиевых сплавов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности деталей, применяемых для создания деталей ракетно-космической техники. Проведены работы по исследованию структуры, испытанию и определению эксплуатационных свойств полуфабрикатов из перспективного алюминиевого сплава системы Al-Mg-Sc и сварных соединений из них, полученных методом СТП.

Публикации имеют достаточно высокий уровень и полностью отражают содержание диссертации.

Диссертационная работы Казакова М.С. отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту научной специальности 2.6.17 – Материаловедение по пунктам 1, 6.

### **Практическая значимость и использование результатов**

В результате выполнения диссертационной работы установлено, что для повышения качества отливок необходимо использовать для приготовления шихты чушки с предварительно модифицированной структурой, в которой отсутствуют включения пластин фазы переменного состава  $Al_xSi_yFe_zMn_q$ , что позволило снизить уровень брака на 25%. Выявлена возможность сохранения свежезакаленного состояния для сплавов системы Al-Cu-Mg с последующим формированием оптимальных механических свойств, путем естественного старения. Показана возможность применения режимов ускоренного старения деталей из сплава системы Al-Mg-Si-Cu, позволяющая получить высокий уровень механических свойств и коррозионной стойкости при сокращении длительности цикла термической обработки на 65%. Определены оптимальные параметры изготовления сварных деталей для термостабилизирующих систем, подвергающихся холодной

пластической деформации. Показано влияние температуры испытаний в диапазоне -196 до 200°С на механические свойства деформированных полуфабрикатов из перспективного экономнолегированного сплава системы Al-Mg-Sc и сварных соединений из них. Также установлено влияние времени хранения на механические свойства деформированных полуфабрикатов из перспективного экономнолегированного сплава системы Al-Mg-Sc и сварных соединений из них. Продемонстрирована возможность получения сварных соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием, с коэффициентом прочности для отожжённых листов из сплава Al-Mg-Sc 90%, а для нагартованных плит из сплава Al-Mg-Sc 85-90%. Полученные результаты позволяют прогнозировать поведение сплава в реальных конструкциях.

Определены основные виды дефектов, характерных для сварки трением с перемешиванием катаных полуфабрикатов из сплава Al-Mg-Sc, не выявляемые визуально, а также установлена степень их влияния на прочностные характеристики сварного соединения. Рассмотрены особенности неразрушающего контроля полученных сварных соединений применительно к изделиям ракетно-космической техники, разработаны рекомендации по применению эхо-импульсного ультразвукового контроля с использованием фазированных антенных решеток и его сочетание с рентгенографией, капиллярным контролем и дифракционным временным ультразвуковым контролем.

Перечисленные разработки прошли апробацию в действующем производстве и внедрены в технологические процессы и операции контроля качества в АО РКЦ “Прогресс” (г. Самара).

Полученные результаты диссертационной работы могут быть использованы на других машиностроительных предприятиях, выпускающих изделия ракетно-космического и авиационного назначения.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. На рисунках макроструктуры и внешнего вида образцов отсутствует масштабная линейка. Для достоверности и качества интерпретации результатов съёмки необходимо проводить с изображением линейки или объекта, размеры которого постоянны. При цитировании заимствованных изображений размеры оговариваются в тексте.

2. В подразделе 4.3. отсутствует указание марки материала, для которого проведены ускоренные климатические испытания.

3. Для зависимостей механических свойств на большинстве рисунков и указания их уровня в таблицах отсутствует доверительный интервал.

4. Требуют пояснения полученные результаты изменения механических свойств плит и поковок опытного сплава Al-Mg-Sc, которые оказались выше у плит, однако в регламентирующих документах и производственных инструкциях механические свойства поковок имеют незначительно, но более высокий уровень и меньшую анизотропию. Также необходимо объяснить, почему в катаных образцах свойства в долевом направлении выше, чем в поперечном, что противоречит общепринятым наблюдениям и требованиям нормативных документов.

5. Отсутствует объяснение повышения относительного удлинения плит из сплава Al-Mg-Sc в долевом направлении при увеличении времени хранения свыше 5 лет. Желательно проведение дополнительных исследований причин изменения свойств полуфабрикатов из сплава Al-Mg-Sc в процессе хранения.

6. В работе не выявлены и не объяснены причины повышенной склонности к межкристаллитной коррозии плит из сплава Al-Mg-Sc.

### Заключение

Отмеченные замечания существенно не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы, не снижают ее научную и практическую ценность.

Диссертационная работа Казакова М.С. является законченной научно-квалификационной работой, предлагающей решение актуальной научной задачи – улучшение структуры и свойств алюминиевых сплавов в процессе получения отливок, деформации, термической обработки, сварки, которая имеет важное значения для развития материаловедения и создания новых изделий ракетно-космической техники.

Автореферат достаточно полно и правильно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Казакова М.С. соответствует требованиям, в том числе, п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», ВАК Российской Федерации, утвержденного Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям, а её автор Казаков Михаил Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 Материаловедение.

Даю согласие на обработку моих персональных данных.

Официальный оппонент

Доктор технических наук (2.6.17 – Материаловедение),  
доцент, заведующий кафедрой «Технологии  
металлов и авиационного материаловедения»  
ФГАОУ ВО «Самарский национальный  
исследовательский университет имени  
академика С.П. Королева»

*под 30.11.2023*

Носова Екатерина Александровна

Специальность, по которой защищена диссертация:.

Адрес почтовый и электронный: 443086, Самарская область, г. Самара, Московское шоссе,  
д. 34, 8 (846) 267-46-40, e-mail: nosova.ea@ssau.ru.



*Носова Е.А.* удостоверяю.  
отдела сопровождения деятельности  
Советов Самарского университета  
*Бояркина* Бояркина У.В.  
*11* 20 23 г.