

ОТЗЫВ

**официального оппонента д.т.н., профессора, директора научно-исследовательского центра технологий контроля качества ракетно-космической техники, профессора федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»
Прохоровича Владимира Евгеньевича
на диссертационную работу Казакова Михаила Сергеевича
на тему: «Улучшение структуры и свойств алюминиевых сплавов для изделий перспективной ракетно-космической техники совершенствованием режимов технологического воздействия», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 – Материаловедение.**

На отзыв представлены том рукописи диссертации на 209 листах и автореферат на 20 страницах.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения и списка литературы, включающего 185 наименований.

Рассмотрение и анализ представленных материалов, а также опубликованных работ по теме диссертации позволили сформулировать следующий отзыв на диссертацию.

Актуальность темы диссертации

В современных условиях дальнейшее развитие космического машиностроения сочетает в себе разработку и внедрение новых конструкционных материалов, в частности алюминиевых сплавов (например, системы Al-Mg-Sc), а также повышение эксплуатационных и технологических характеристик широко применяемых алюминиевых сплавов и деталей из них за счет оптимизации традиционных режимов их обработки.

Следует отметить, что на ракетостроительных предприятиях космической отрасли сформировалась необходимость решения ряда важных технологических задач:

1) Повышения качества отливок из сплава системы Al-Si-Mg (АК9) за счет предотвращения образования наследуемых из исходных материалов хрупких пластин железосодержащей фазы, а также исключения в структуре раковин, скопления раковин и недопустимой пористости;

2) Исключения случаев разрушения в зонах термического влияния сварки штуцеров, используемых при заправке и герметизации тепловых труб термостабилизирующих систем космических аппаратов;

3) Внедрения ускоренного режима старения штамповок из сплава АК6 с обеспечением повышения стойкости к расслаивающей коррозии;

4) Улучшения микроструктуры и свойств промышленных полуфабрикатов из сплавов системы Al-Mg-Sc, изготовленных в различных условиях деформирования;

5) Решения комплекса технологических проблем практического освоения сварки трением с перемешиванием (СТП) сплавов системы Al-Mg-Sc, включая дефектообразование и контроль качества сварных соединений и методами неразрушающего контроля (НК).

В связи с этим **тема диссертационной работы** Казакова М.С., посвященная совершенствованию режимов технологических воздействий в процессах получения отливок, сварки, деформирования и термической обработки деталей с целью улучшения структуры и свойств алюминиевых сплавов для изделий перспективной ракетно-космической техники, **является** своевременной и **актуальной**. Диссертационная работа Казакова М.С. имеет как научную, так и практическую значимость в этом направлении. Задачи, решаемые автором

защищаемой диссертации, непосредственно направлены на повышение эксплуатационно-технологических характеристик алюминиевых сплавов для изделий из них и заслуживают внимания в условиях современного развития науки и техники, как с теоретической, так и с практической точек зрения.

Общая характеристика работы

Содержание работы построено в соответствии с решением поставленных задач. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и одного приложения.

Во введении автор обосновывает актуальность темы работы, определяет ее цель и задачи, формулирует идею работы, раскрывает научную новизну работы и практическую ценность ее результатов.

В первой главе диссертации проведен анализ современного состояния научных исследований и технологических разработках в области алюминиевых сплавов для ракетно-космической техники, на основе которого определены цель и задачи исследования.

Проведен обзор научных идей и тенденций в области технологических воздействий при изготовлении ракетно-космической техники с применением алюминиевых сплавов, выявлены актуальные наукоемкие проблемы, требующие проведения исследований с целью их решения.

Выполнен анализ возможностей микролегирования редкоземельными металлами алюминиевых деформируемых сплавов, рассмотрена перспектива их применения в изделиях РКТ. Рассмотрены особенности технологии сварки трением с перемешиванием (СТП), её преимущества перед традиционными видами сварки и перспективы применения в изделиях РКТ, проведён анализ актуальных задач, связанных с неразрушающим контролем сварных соединений, полученных СТП.

Во второй главе приведено описание оборудования, исследуемых сплавов и методик проведения экспериментов. Использованный автором классический подход в изучении связей между составом, строением и свойствами исследуемых сплавов, закономерностей их изменений вследствие физико-механических, технологических и других видов воздействий, предопределил методы исследования, современное оборудование и методики проведения экспериментов.

Детальные исследования микроструктуры проводились с помощью оптического металлографического микроскопа CarlZeiss AxiovertA1. Исследования тонкой структуры сплавов и фрактографический анализ выполнены с помощью сканирующего электронного микроскопа JED-2300 AnalysisStation с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа.

СТП продольных сварных швов выполнялась на установке производства ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель» нерегулируемым инструментом типа «Pin».

В третьей главе приведены результаты исследования по улучшению структуры и свойств алюминиевых сплавов для изделий перспективной ракетно-космической техники совершенствованием режимов технологических воздействий. С учетом многоплановости объектов исследований необходимо отметить следующее.

Для выяснения причин снижения качества отливок из сплава АК9 были выполнены исследования их структурно-фазового состояния. Показано, что хрупкие пластины фазы переменного состава $Al_xSi_yFe_zMn_q$, содержащиеся в чушках с немодифицированной структурой, используемых для приготовления шихты, наследуются в отливках, что оказывает негативное влияние на качество отливок. На основании этого сделаны соответствующие рекомендации для организации литейной технологии.

Также приведены результаты исследования причин разрушения штуцеров из сплава АД31Т, используемых при заправке и герметизации тепловых труб термостабилизирующих систем КА, в процессе их обжатия после окончания заправки. Показано, что причиной разрушения является снижение пластичности и деформируемости металла в зоне термического влияния (ЗТВ), вызванное трансформацией зонносостаренного состояния в состояние с присутствием выделений фазового типа. Сделан вывод о необходимости охлаждения ЗТВ за счет применения накладных медных теплосъемных колец, что позволяет исключить образование выделений фазового типа и предотвратить появление трещин при сплющивании образцов и обжатии штуцеров.

Выполнены исследования по сокращению времени цикла старения штампованных заготовок и поковок из сплава АК6 (система Al-Mg-Si-Cu). Полученные результаты показали, что режим ускоренного старения (плюс 175 °С, 3 часа) (вместо применяемого: плюс 160 °С, 12 часов) горячедеформированных заготовок из сплава АК6 после закалки, обеспечивает механические свойства, соответствующие требованиям ОСТ 1.90073-85. При этом показано, что детали, состаренные по ускоренному режиму, демонстрируют повышенную стойкость к расслаивающей коррозии (РК) и межкристаллитной коррозии (МКК).

Выполнены исследования по оптимизации цикла технологических переходов между операциями термической обработки и холодной деформации заготовок из сплавов Д1 и Д16. На основании известных физических основ процесса старения сплавов Д1 и Д16 обоснована возможность сохранения свежезакаленного состояния листовых заготовок путем выдержки при отрицательных температурах. С учетом производственных условий показано, что выдержка заготовок сразу после закалки при температуре (минус 10°С) в течение не более 48 часов, обеспечивает свежезакаленное состояние. После перемещения заготовок в цеховые условия операции холодной деформации можно проводить в течение 3-х и 2-х часов для сплава Д1 и Д16 соответственно.

В четвертой главе представлены результаты исследований микроструктуры, механических свойств сплава системы Al-Mg-Sc в интервале температур от -196°С до 200 °С и их сохраняемости в процессе ускоренных климатических испытаний.

Показано, что катаные полуфабрикаты из сплава системы Al-Mg-Sc обладают высоким уровнем механических свойств во всем диапазоне температур (от -196°С до 200 °С). В частности, σ_b плит при $T = 20$ °С в поперечном направлении равен 450 МПа и 440 МПа в продольном направлении. При температуре -196°С - 610 МПа и 550 МПа соответственно.

Механические свойства поковок существенно ниже, чем у катаных полуфабрикатов. При температуре 20 °С $\sigma_b = 370$ МПа, $\sigma_{0,2} = 210$ МПа, а $\delta = 15\%$. При температуре -196 °С $\sigma_b = 470$ МПа, $\sigma_{0,2} = 260$ МПа, а $\delta = 15\%$.

Для исследуемого сплава с понижением температуры наблюдается одновременное увеличение, как прочности, так и пластичности, что является уникальным сочетанием свойств. Подобный эффект наблюдается в исследуемом сплаве после различных условий деформации и объясняется относительно низкой плотностью дислокаций в сплаве после деформации, что увеличивает ресурс пластичности в исследуемом интервале температур.

Результаты исследований коррозионной стойкости сплава показали, что листы из исследуемого сплава обладают достаточной стойкостью против ОК, коррозии под напряжением, МКК и РК. Для плит выявлена стойкость против ОК, коррозии под напряжением и РК, при этом выявлена склонность к МКК, что связано с напряженным состоянием плит, вызванным нагартовкой при изготовлении полуфабриката.

В пятой главе рассмотрено влияние сварки трением с перемешиванием (СТП) на структурные изменения сплава Al-Mg-Sc. Оценены механические свойства в диапазоне температур от минус 196°С до плюс 200°С и их сохраняемость при УКИ. Изучено влияние режимов сварки на качество соединений и проведена классификация внутренних дефектов с определением их потенциальной опасности. Рассмотрены вопросы особенностей неразрушающего контроля сварных соединений, выполненных СТП.

Важная часть пятой главы диссертационной работы – анализ режимов СТП плит толщиной 25 мм из сплава Al-Mg-Sc в нагартованном состоянии. Результаты анализа – рекомендованные режимы сварки с заметно низкой скоростью вращения инструмента (до 170 об/мин), низкой скоростью сварки (до 50 мм/мин) и высоким усилием давления на инструмент (до 70 кН).

Как следует из текста работы, с использованием этих режимов СТП, формы и геометрических размеров инструмента удалось получить недостаточно высокую прочность сварных швов сплава Al-Mg-Sc толщиной 25 мм – 90% от исходного состояния плит (видимо в отожженном состоянии) и 85% - для нагартованных плит. Тем не менее даже этот уровень прочности сварных швов выше, чем для сварки плавлением методом АрДЭС.

Показано, что сварные соединения сплавов системы Al-Mg-Sc, полученные методом СТП, обладают высокой коррозионной стойкостью и механическими свойствами, которые не зависят от направления волокна и способа получения полуфабриката в условиях комбинированной обработки. Выявлены внутренние специфические дефекты СТП, которые можно разделить на 4 типа: канал, твердое включение, непровар, «Kissing Bond», а также проанализированы условия их образования.

В выводах представлены основные научные результаты работы.

В приложении приведен Акт о внедрении результатов диссертационного исследования.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна

На основе анализа современного состояния научных исследований и технологических разработок в области технологических воздействий на заготовки и детали из алюминиевых сплавов для ракетно-космической техники автор обоснованно и корректно сформулировал цель и задачи исследований.

Исследования проводились с использованием современных методов анализа структуры материалов (оптическая металлография, сканирующая электронная микроскопия, микрорентгеноспектральный анализ), апробированных стандартных методов механических испытаний, а также коррозионных испытаний и ускоренных климатических испытаний. Данный выбор является обоснованным и методически правильным.

В процессе исследований автором были получены следующие **научные результаты**:

1. Установлено влияние структурно-фазового состояния исходных шихтовых материалов на формирование структуры, свойств и дефектов в отливках сплава системы Al-Si-Mg;
2. На основании анализа кинетики старения сплавов системы Al-Cu-Mg при реализации 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;
3. На основании микроструктурных изменений в сварных соединениях установлена

причина снижения пластических свойств и разрушения в ЗТВ сварных герметизирующих деталей термостабилизирующих систем космических аппаратов, изготавливаемых из сплава системы Al-Mg-Si;

4. Выявлены закономерности влияния температуры на механические свойства экономно-легированного сплава Al-Mg-Sc в отожженном и нагартованном состоянии деформированных полуфабрикатов (плиты, листы, поковки); выполнена оценка коррозионной стойкости и изменения механических свойств во времени;

5. Установлено влияние режимов сварки трением с перемешиванием на структуру и свойства сварных соединений катаных полуфабрикатов из сплава системы Al-Mg-Sc в диапазоне температур от -196°C до 200°C ;

6. Исследованы характерные внутренние дефекты сварных соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием, определена степень их влияния на эксплуатационные свойства, а также оценены возможности выявления дефектов методами неразрушающего контроля

Достоверность и обоснованность полученных результатов базируется на фундаментальных положениях, сопоставленных с общепризнанными отраслевыми знаниями и данными, полученными другими авторами и исследовательскими группами. В работе использовалось современное оборудование и методы, аттестованные методики и поверенные средства измерений. Полученные данные подвергались статистической обработке с определением значений доверительного интервала и дисперсии, что подтверждало их достоверность. Выдвинутые в ходе исследований гипотезы и положения подтверждены натурными экспериментами.

Научная новизна результатов диссертации заключается в следующем:

1. Установлено влияние структурно-фазового состояния исходных шихтовых материалов на формирование структуры, свойств и дефектов в отливках сплава системы Al-Si-Mg.

2. Установлено, что выдержка заготовок из сплавов Д1 и Д16 при отрицательной температуре (-10°C) в течение не более 48 часов сразу после закалки сохраняет их свежезакаленное состояние, а инкубационный период до начала процессов интенсивного упрочнения составляет от 2 до 3 часов.

3. Установлена причина изменения микроструктуры, снижения пластичности и разрушения в ЗТВ сварных соединений герметизирующих деталей термостабилизирующих систем КА, изготавливаемых из сплава системы Al-Mg-Si.

4. Выявлены закономерности влияния температуры на механические свойства экономно-легированного сплава Al-Mg-Sc в отожженном и нагартованном состоянии деформированных полуфабрикатов (плиты, листы, поковки); выполнена оценка коррозионной стойкости и изменения механических свойств во времени.

5. Установлено влияние режимов сварки трением с перемешиванием на свойства сварных соединений катаных полуфабрикатов из сплава системы Al-Mg-Sc в диапазоне температур от -196°C до 200°C .

Практическая значимость выполненной диссертационной работы заключается в том, что полученные результаты легли в основу конкретных практических рекомендаций, направленных на совершенствование режимов технологических воздействий в процессах получения отливок, сварки, деформирования и термической обработки с целью улучшения структуры и свойств алюминиевых сплавов для изделий перспективной ракетно-космической техники.

Указанные результаты и рекомендации прошли апробацию в действующем производстве и внедрены в технологические процессы и операции контроля качества в АО РКЦ «Прогресс».

Вместе с тем, исходя из анализа содержания текста диссертации и автореферата, диссертационная работа содержит ряд **недостатков и замечаний**:

1. Не совсем понятно утверждение автора (см. с. 88) о повышении концентрации магния на поверхности излома после проведения обжата штупера в результате процесса распада твердого раствора в зоне термического влияния сварки. Для рентгеноспектрального микроанализа не важно в каких фазах находится магний.

2. Не проанализирована возможность обжата штупера в зоне конца участка 1 и в зоне участка 2, которые лежат вне зоны термического влияния и, следовательно, сохранили свою исходную пластичность, что могло бы обеспечить отсутствие трещинообразования при обжате.

3. Несмотря на обстоятельное описание механизма структурообразования в зоне СТП, автор не привел анализ публикаций по этому вопросу. Это, вероятно, не позволило автору учесть и другие процессы, например, вихревое течение металла на стороне отставания в зоне контакта с основным металлом, образование «луковичной» структуры и др.

4. Видимо в связи со сложностью и дороговизной постановки экспериментов по оптимизации «геометрии» инструмента и режимов СТП автору не удалось обнаружить оптимальные значения параметров сварки сплава Al-Mg-Sc толщиной 25 мм, позволяющие выйти на прочность шва близкой к прочности основного металла.

5. Не исследовано влияния размеров дефектов (в частности непровара и «kissing bond») на прочностные свойства сварных соединений СТП плит из сплава Al-Mg-Sc, что могло бы стать основанием для назначения норм браковки при НК их качества.

6. При рассмотрении особенностей НК сварных соединений автор не рассмотрел метод вихретокового контроля, который позволяет выявлять опасные дефекты типа «слипание» («kissing bond») и которые не выявляются предлагаемыми в диссертации методами НК.

7. В тексте имеют место неточности, затрудняющие понимание описываемых результатов исследования, например на с. 86, последний абзац.

Приведенные выше недостатки и замечания не оказывают существенного влияния на общую положительную оценку диссертационной работы.

Результаты исследований достаточно полно опубликованы в 9 печатных работах, из них 3 печатных работы в изданиях, рекомендуемых ВАК. В совместных работах вклад соискателя является определяющим. Достижения других авторов использованы корректно с указанием ссылок на конкретные публикации.

Содержание автореферата достаточно полно отражает содержание диссертации и позволяет составить целостное представление о проделанной работе. Материалы диссертации изложены достаточно грамотно, логически последовательно и представлены в лаконичной форме.

Заключение

Диссертация Казакова М.С. является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научно-технической задачи, заключающейся в совершенствовании режимов технологических воздействий в процессах получения отливок, сварки, деформирования и термической обработки заготовок и деталей из алюминиевых сплавов при производстве изделий ракетно-космической техники. И в конечном счете направленной на повышение качества продукции

Считаю, что диссертационная работа Казакова Михаила Сергеевича полностью соответствует критериям п.9 Положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 01.10.2018),

предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 – Материаловедение.

Даю согласие на обработку моих персональных данных.

Официальный оппонент
Доктор технических наук, профессор,
директор научно-исследовательского
центра технологий контроля качества ракетно-космической техники,
профессор факультета систем управления и робототехники ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский университет «ИТМО»

«28» ноября 2023 года

Прохорович Владимир Евгеньевич

Шифр научной специальности: _____
атация и восстановление вооружения, военной и
специальной техники, техника

Подпись Прохоровича Вла. _____
виза заверяю:

НАЧАЛЬНИК ОМДО
ШИНИК В.А. *Шиник*



Почтовый адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49,

Телефон: +7(812) 595-41-48

Адрес электронной почты: veprokhorovich@itmo.ru

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49

+7 (812) 232-23-07

od@mail.ifmo.ru