

На правах рукописи



РАСТОПЧИН РУСЛАН НИКОЛАЕВИЧ

**ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ ПРИСАДОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ
СКАНДИЕМ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВА
1565ЧМ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКОЙ**

Научная специальность
2.6.17. Материаловедение (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре «Материаловедение» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет»

Научный руководитель: - доктор технических наук, профессор
Овчинников Виктор Васильевич

Официальные оппоненты: – **Арышенский Евгений Владимирович**,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Сибирский государственный индустриальный
университет», профессор

– **Холопов Андрей Андреевич**,
кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО
«Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана (национальный
исследовательский университет)», доцент

Ведущая организация: – ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный
авиационный технический университет имени
П.А. Соловьева»

Защита диссертации состоится «25» июня 2026 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.04 (Д 212.125.15) в ФГАОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 121552, г. Москва, ул. Оршанская, д. 3. ауд. 307Б. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Скворцовой Светлане Владимировне и по электронной почте skvortsovasv@mai.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте:
https://mai.ru/upload/iblock/f6e/txu0k0d3cdrzlb1fhu7s8lnmn2bfjjci/Rastopchin-R.N._Dissertatsiya_26.03.2026.pdf

Автореферат разослан «___» _____ 202__ г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета



Скворцова С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы и темы исследования

Для автомобильных перевозок топлива (бензин, керосин, дизельное топливо) и сухого цемента используются специальные автомобили со сварными цистернами из алюминиевых сплавов. Наиболее широкое применение до настоящего времени при изготовлении сварных цистерн находили листы сплава АМг5М.

Для изготовления цистерны используются листы сплава АМг5М толщиной 6–7 мм, сварка которых в конструкции осуществляется с применением плазменной сварки неплавящимся электродом и полуавтоматической сварки плавящимся электродом в инертном газе (аргон).

Основными технологическими операциями при изготовлении сварных цистерн из алюминиевых сплавов являются: плазменная сварка полотнища из листовых заготовок; гибка сварного полотнища для получения обечайки; полуавтоматическая сварка плавящимся электродом продольного шва обечайки; изготовление днищ, перегородок и опорного узла цистерны; варка в обечайку перегородок и других арматурных узлов; приварка к обечайке днищ; общая сборка цистерны с применением полуавтоматической сварки плавящимся электродом; зачистка швов и проверка качества сварки; грунтовка и покраска цистерны.

Плазменная сварка применяется для сварки продольных швов заготовок при сборке полотнища, из которого затем осуществляется формование обечайки цистерны гибкой на трехвалковых гибочных станах. При сварке кольцевых швов, а также при монтаже люков и другого навесного оборудования применяется аргодуговая сварка плавящимся электродом.

К сварным соединениям предъявляются высокие требования по прочности при нормальной и пониженной температуре, герметичности, хорошей формруемости при гибке днища и перегородок цистерны.

При изготовлении сварных автоцистерн из алюминиевых сплавов большое внимание производителями уделяется снижению массы цистерны. Для решения этой задачи перспективным направлением является применение для изготовления сварной цистерны алюминиевого сплава, обладающего более высокой прочностью при сохранении высокого значения относительного удлинения по сравнению с применяемым сплавом АМг5М.

Перспективным материалом для изготовления автоцистерн, обладающим более высокими механическими свойствами по сравнению со сплавом АМг5М, является сплав 1565чМ, поставляемый компанией «Самарский металлургический завод».

В этой связи актуальным становится исследование свойств и структуры сварных соединений листов сплава 1565чМ при плазменной сварке и определение рационального состава присадочной проволоки.

Степень разработанности темы. Большой вклад в решение проблемы повышения комплекса свойств сварных соединений алюминиевых сплавов при сварке плавлением внесли ученые Штрикман М.М., Лукин В.И., Арбузов Ю.П.,

Дриц А.М., Филатов Ю.А., Рязанцев В.И., Овчинников В.В., Рабкин Д.М., Третьяк И.Г., Ищенко А.Я., Никитина Е.В., Покляцкий А.Г., Stano S., Kohei Ono, Gabor R., Toshlyuki Hasegwa и др.

Целью диссертационной работы является определение зависимости свойств и структурно-фазового состояния сварных соединений от параметров режима и содержания скандия в присадочной проволоке при плазменной сварке листов алюминиевого сплава 1565чМ системы Al–Mg.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Исследовать показатели свариваемости листов алюминиевого сплава 1565чМ в условиях сварки плавлением.

2. Установить влияние основных параметров режима плазменной сварки и состава присадочной проволоки на механические свойства и структуру сварных соединений листов сплава 1565чМ.

3. Определить влияние содержания скандия в присадочной проволоке на механические свойства и структуру металла шва сплава 1565чМ при плазменной сварке.

4. Исследовать возможность применения скальпирования присадочной проволоки и лазерной зачистки свариваемых кромок листов сплава 1565чМ при плазменной сварке для получения бездефектных соединений, а также кинетику изменения состава и толщины поверхностной оксидной пленки со временем после обработки.

5. Определить влияние лазерной зачистки поверхности листов сплава 1565чМ перед сваркой на структуру оксидной пленки и интенсивность порообразования в процессе плазменной сварки.

6. Изучить механические свойства стыковых соединений листов сплава 1565чМ, полученных плазменной сваркой с присадочной проволокой с легированием и без легирования скандием, при нормальной, повышенной и пониженной температуре.

Научная новизна

1. Установлено, что введение скандия в присадочную проволоку в количестве 0,15 – 0,20 масс. % полностью подавляет образование трещин при сварке плавлением листов из сплава 1565чМ.

2. Показано, что в процессе сварки листов из сплава 565чМ присадочной проволокой Св1575, легированной скандием, формируется мелкозернистая литая структура с равномерным распределением упрочняющих фаз (типа Al_3Sc), как по границам, так и в объеме зерен.

3. Установлено, что скальпирование алюминиевой проволоки Св1575 приводит к образованию на поверхности тонкого слоя, состоящего из оксида алюминия Al_2O_3 с небольшим количеством оксида магния MgO , формированию сжимающих напряжений и снижению в нем концентрации магния с 5,9% до 2 масс. %.

4. Показано, что лазерная очистка листов из сплава 1565чМ приводит к изменению цвета поверхности с темно-серого до светло-серебристого, что

обусловлено формированием пленки, состоящей из оксидов алюминия Al_2O_3 и магния MgO , и снижением ее толщины с 345 – 415 мкм до 10 – 26 мкм.

Теоретическая и практическая значимость

На основании полученных результатов исследований разработана производственная инструкция по плазменной сварке листов алюминиевого сплава 1565чМ. Также получены следующие результаты, имеющие важное практическое значение:

1. Определены диапазоны содержания скандия в присадочной проволоке, обеспечивающие измельчение зерна в металле шва и повышение его деформационной способности при калибровке обечайки автоцистерны.

2. Разработан технологический процесс плазменной сварки с полым катодом, позволяющий существенно сократить количество дефектных участков швов, подлежащих исправлению подваркой. Разработанный процесс был внедрен на машиностроительном заводе «БЕЦЕМА» при изготовлении сварных автоцистерн бензовозов и цементовозов, что подтверждено соответствующим актом.

3. Разработан технологический процесс плазменной сварки конструкций с полым анодом, сочетающий процесс лазерной очистки поверхности свариваемых кромок листов из сплава 1565чМ со скальпированием поверхности присадочной проволоки, что позволили исключить использование химических методов подготовки материалов к сварке.

4. Результаты работы были использованы в учебно-образовательный процессе Московского политехнического университета при подготовке курса лекций по дисциплине «Оборудование и технологии обработки материалов концентрированными потоками энергии» по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов», что подтверждено соответствующим актом.

Методы исследования и достоверность полученных результатов

Методологической основой исследования послужили работы ведущих российских и зарубежных ученых, государственные стандарты РФ. Результаты экспериментальных исследований получены с использованием современных методов исследования структуры и свойств материалов, а также сертифицированного испытательного оборудования. Показана хорошая воспроизводимость результатов.

Положения, выносимые на защиту

1. Совокупность экспериментальных данных о критериях выбора параметров режима плазменной сварки листов алюминиевого сплава 1565чМ, обеспечивающих формирование стыковых соединений без внутренних дефектов;

2. Экспериментальные результаты по влиянию скальпирования присадочной проволоки и лазерной зачистки поверхности свариваемых заготовок на качество сварных соединений листов сплава 1565чМ.

3. Совокупность экспериментальных данных по влиянию легирования присадочной проволоки скандием на средний размер зерна в металле шва и его деформационную способность при нормальной и повышенной температуре.

4. Результаты исследований механических свойств стыковых соединений алюминиевого сплава 1565чМ при нормальной, пониженной и повышенной температурах испытаний.

Степень достоверности результатов.

Все результаты получены на современном оборудовании с использованием лицензионного программного обеспечения. Стандартные испытания и исследования проводились в соответствии с требованиями научно-технической документации, действующей на территории Российской Федерации (ГОСТ и ISO). Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации подтверждены теоретическими решениями и экспериментальными данными.

Апробация работы.

Результаты работы доложены и обсуждены на пяти научно-практических конференциях, в том числе: 6-ой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (г. Курск, 2021 г.); Международной научно-технической конференции «СМиС-2023. Инновационные технологии в управлении качеством» (Россия, Москва, 17–19 мая 2023 г.); Международной научно-практической конференции «Алюминий - 21/СВАРКА И ПАЙКА» (Россия, Санкт-Петербург, 20–22 ноября 2021 г.); Международной научно-технической конференции «СМиС-2024. Технологии управления качеством», (Россия, Москва, 22–24 мая 2024 г.); Международной научно-технической конференции «СМиС-2025. Технологии управления качеством», (Россия, Москва, 21–23 мая 2025 г.);

Личный вклад автора состоит в его непосредственном и активном участии в формировании цели и задач исследования, в проведении теоретических и экспериментальных исследований, анализе и обработке полученных результатов, их обобщении, формулировке рекомендаций и выводов по диссертации, а также написании публикаций в журналах и докладов на научных конференциях.

Публикации: основное содержание диссертации отражено в 14 научных работах в рецензируемых научных журналах, сборниках и трудах конференций, из них 10 статей опубликовано в рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК РФ, из которых переведены в журналах, включенных в международные системы цитирования Scopus и/или Web of Science – 2.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 181 наименования, 2-х приложений, всего 231 страница машинописного текста, в том числе 95 рисунков и 45 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность и степень разработанности темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, обозначена научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, описаны методология исследования, сформулированы

положения, выносимые на защиту, представлена общая структура диссертации.

В главе 1 представлен обзор конструкций специальные автомобили со сварными цистернами из алюминиевых сплавов для автомобильных перевозок топлива (бензин, керосин, солярка) и сухого цемента. Наиболее широкое применение до настоящего времени при изготовлении сварных цистерн находили листы сплава АМг5М толщиной 6–7 мм.

Основными технологическими операциями при изготовлении сварных цистерн из алюминиевых сплавов являются: плазменная сварка полотнища из листовых заготовок; гибка сварного полотнища для получения обечайки; полуавтоматическая сварка плавящимся электродом продольного шва обечайки; изготовление днищ, перегородок и опорного узла цистерны; варка в обечайку перегородок и других арматурных узлов; приварка к обечайки днищ; общая сборка цистерны с применением полуавтоматической сварки плавящимся электродом; зачистка швов и проверка качества сварки; грунтовка и покраска цистерны.

К сварным соединениям предъявляются высокие требования по прочности при нормальной и пониженной температуре, герметичности, хорошей деформируемости при холодной гибке днища и перегородок цистерны.

Снижение массы цистерны обеспечивает применение более прочных алюминиевых сплавов по сравнению со сплавом АМг5М. Сплав 1565ч, будучи достаточно простым в металлургическом производстве, обеспечивает получение прочностных свойств на 20–30% выше, чем сплавы АМг5 и АМг6 при сохранении высокой пластичности. Замена сплава АМг5М на сплав 1565чМ в конструкции цистерны бензовоза позволит сократить толщину стенки с 7 до 6 мм. Это дает выигрыш в массе не снаряженной цистерны примерно на 550 кг.

Подготовка поверхности под дуговую сварку является решающим фактором, определяющим возможность получения высококачественных соединений, особенно для алюминиевых сплавов. При дуговой сварке алюминиевых сплавов число дефектов, связанных с подготовкой поверхности, сильно зависит от марки сплава и составляет от 25 до 50% от общего их числа. Это связано с тем, что состояние поверхности свариваемых деталей оказывает значительное влияние на газовыделение, загрязненность оксидными пленками шва, а в отдельных случаях и на сам процесс формирования сварного соединения. Однако, несмотря на важность, вопросы подготовки поверхности под дуговую сварку недостаточно освещены в технической литературе. Процессы химической подготовки поверхности алюминиевых сплавов под дуговую сварку отличаются сложностью и многообразием переменных факторов. В зависимости от природы сплава, состава ванн травления и пассивирования могут протекать различные реакции.

Плазменную сварку стыковых соединений из алюминиевых сплавов толщиной до 8 мм выполняют без разделки кромок с зазором до 1,5 мм за один проход на стальной подкладке. При плазменной сварке получаются швы с высокими механическими свойствами как при выполнении швов на переменном токе, так и на постоянном токе обратной полярности.

Из выполненного литературного обзора можно заключить, что проблема

получения прочных и высокопластичных сварных соединений из алюминиевых сплавов системы Al–Mg при плазменной сварке требует дальнейшего развития как в части представлений о механизме формирования мелкозернистой структуры металла шва, так и выборе критериев технологических параметров процесса.

В связи с перспективностью применения для изготовления сварных цистерн алюминиевого сплава 1565чМ то видится актуальным исследование влияния легирования присадочной проволоки на структуру и свойства сварных соединений указанного сплава при плазменной и аргонодуговой сварке.

Для подготовки поверхности присадочной проволоки перспективно применение метода скальпирования ее поверхности путем протягивания в алмазную фильеру. Подготовку поверхности свариваемых кромок заготовок из алюминиевых сплавов целесообразно осуществлять с помощью поверхностной зачистки сканирующим лазерным излучением.

Рассмотрены перспективы использования процесса плазменной сварки с полым катодом для получения стыковых соединений заготовок из листов алюминиевого сплава 1565чМ. На основании проведенного анализа сформулирована цель работы и поставлены задачи исследования.

В главе 2 представлены характеристика объектов и методов осуществления исследования. В качестве объекта исследования был выбран алюминиевый сплав 1565чМ в виде листового полуфабриката толщиной 8 мм после отжига. Сварные стыковые соединения из листов исследуемого сплава получали на оборудовании для плазменной сварки на машиностроительном заводе «БЕЦЕМА».

На части образцов для получения стыковых соединений листов сплава 1565чМ применялся способ сварки сжатой дугой с полым анодом. При данном способе сварки возбуждают две дуги постоянного тока: одну – прямой полярности – между вольфрамовым электродом и соплом (дежурная дуга), другую – обратной полярности – между соплом и обрабатываемым изделием. Вторая дуга называется основной. Основная дуга сжимается электрическим путем: в результате выдувания плазмы дежурной дуги создается электрический проводник, который стягивает на себя поток основной дуги, и тем самым обеспечивается сжимающий и стабилизирующий эффект. Возможно стабильное горение основной дуги при ее длине до 10 мм.

Подготовка свариваемых кромок под сварку осуществляли тремя способами: химическая подготовка (травление в щелочи KOH с последующим осветлением в 15%-ном растворе HNO₃); механическая зачистка свариваемых кромок вращающейся механической щеткой; зачистка свариваемых кромок лазерным излучением (применялась система LightCLEAN).

Для исследования влияния химического состава присадочной проволоки на механические свойства сварных соединений листов сплава 1565чМ были использованы проволоки AMg5, AMg61, AMg63, ML5183 и 1575. Все присадочные проволоки перед сваркой прошли операцию скальпирования поверхности.

Для исследования показателей свариваемости исследуемого сплава

1565чМ были использованы технологические пробы («рыбий скелет» и крестовая) и методика оценки трещиностойкости МГТУ им. Н.Э. Баумана, критерием которой является величина критической скорости деформации растяжения ($A_{кр}$) металла шва в процессе кристаллизации, при которой в нем не образуется трещин.

Испытания сварных соединений на статическое растяжение и статический изгиб проводили на испытательной машине УТС 110М–100 при комнатной и повышенной температуре. Образцы для испытаний, вырезанные поперек сварного соединения с расположением сварного шва по середине рабочей части образцов, соответствовали требованиям ГОСТ 6996–66.

Испытания на статический изгиб проводились на универсальной испытательной машине УТС 110М–100. Образцы для испытаний соответствовали ГОСТ 6996–66, тип XXVI. Испытания включали определение угла изгиба и наличия трещин при статическом изгибе.

Микротвердость сварных соединений измеряли на микротвердомере Duramin 5 по методу Виккерса в соответствии с ГОСТ 9450–76 с шагом 0,5 мм при нагрузке 490,6 мН и времени выдержки 10 с. Твердость различных зон сварных соединений листов сплава 1565чМ изучали посредством твердомера Бринелля ГОСТ 9012–59 (в редакции 1990 г.).

Металлографические исследования проводились на полированных травленых шлифах. После вырезания образцы монтировались в винтовые зажимы и шлифовались на шлифовальных бумагах с корундовым абразивом зернистостью от 400 до 2000. Начиная с зернистости 1000, производилось мокрое шлифование. Использовался оптический металлографический микроскоп Olympus GX51 при увеличениях 100–1000.

Тонкую структуру сварных соединений и элементный анализ определяли с помощью сканирующего электронного микроскопа Philips SEM515 с энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором «Genesis».

Для проведения исследований посредством ориентационной микроскопии использовались растровые электронные микроскопы FEI Quanta 200 3D и FEI Quanta 600, оснащенные системами анализа структуры кристаллических материалов методом дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD).

ПЭМ–исследования микроструктуры, анализ фазового и элементного составов проводились при помощи просвечивающего электронного микроскопа JEOL JEM-2100 при ускоряющем напряжении 200 кВ и увеличениях до $\times 200000$ к. Объекты для ПЭМ исследований в виде тонких фольг приготавливались с помощью системы пробоподготовки JEOL EM-09100IS методом ионного утонения.

Измерение внутренних напряжений проводилось методом $\sin^2\psi$ [135] с использованием рентгеновского дифрактометра PROTO-LXRD. Для генерации излучения с длиной волны 1,79026 ангстрем применялось ускоряющее напряжение 25 кВ и кобальтовый монохроматор.

Испытания образцов из алюминиевых деформируемых сплавов на склонность к межкристаллитной коррозии проводились в растворе, содержащем: 3%-ный раствор хлористого натрия плюс 1%-ный раствор соляной кислоты

(30 г/л хлористого натрия плюс 10 мл/л соляной кислоты плотностью 1,19 г/см³), температура раствора 18–25 °С, продолжительностью 24 ч.

Первичный контроль сварных соединений выполняли с помощью рентгеновского источника типа ICM CP 120 и цифрового приемника Teledyne Dalsa 6К. Для радиографического анализа дефектов сварного шва использовали рентгеновский телевизор ФИЛИН 1010 производства компании «Тестрон», г. С.Петербург. Для регистрации рентгеновского излучения использовался плоскопанельный цифровой детектор Teledyne DALSA с размером входного окна 100x100 мм и разрешением 2048x2048 пикселей.

В главе 3 представлены результаты исследования склонности сплава 1565чМ к трещинообразованию при сварке плавлением, а также влияния химического состава присадочной проволоки на свойства стыковых соединений.

Коэффициент трещинообразования листов из сплава 1565чМ находится на уровне значений, свойственных для промышленных сплавов системы Al–Mg (AMг5М и AMг6М). Так по пробе «рыбий скелет» коэффициент трещинообразования исследуемого сплава находится на уровне 15%. Применение присадочной проволоки практически полностью исключает образование кристаллизационных трещин.

В таблице 1 представлены механические свойства стыковых соединений листов сплава 1565чМ, выполненные плазменной сваркой с различными присадочными проволоками.

Таблица 1 – Влияние присадочной проволоки на свойства сварных соединений листов сплава 1565чМ

Марка проволоки	σв, МПа		σ _{0,2} , МПа	δ, %	Угол изгиба α, град	КСУ, Дж/см ²	
	Сварное соединение	Металл шва				Шов	Зона сплавления
AMг5	340	295	125	17,8	180	16,7	18,1
AMг61	352	316	158	17,3	180	19,2	20,5
AMг63	355	322	171	16,5	180	19,2	19,7
ML 5183	318	258	115	16,9	180	13,7	16,2

Примечание: Приведены средние данные по результатам испытаний 5 образцов. Угол загиба определялся по ГОСТ 6696–66 на оправке диаметром равным 3 толщине листа.

На образцах сплава 1565чМ, выполненных автоматической плазменной сваркой (поперечное сечение), значения микротвердости в сварном шве варьируется в пределах 700...880 Н/мм². Микротвердость основного металла составляет в среднем 950...1050 Н/мм². В околошовной зоне наблюдается снижение твердости до 850...880 Н/мм².

Для исследования влияния скандия на стойкость против образования горячих трещин алюминиевого сплава 1565чМ были изготовлены листы из исследуемого сплава, которые дополнительно были легированы скандием в

количестве 0,2–0,8 масс. %. Из экспериментальных листов были подготовлены образцы размером 50x50 мм толщиной 3,0 мм. Оценку стойкости против образования горячих трещин при сварке проводили на установке ЛТП1-6. Увеличение содержания скандия в сплаве 1565чМ с 0,2 до 0,8 масс.% позволяет повысить критическую скорость деформирования с 8 до 17,8 мм/мин.

В тоже время следует отметить, легирование алюминиевого сплава 1565чМ дополнительно скандием существенно увеличивает стоимость сплава. С этой точки зрения рационально дополнительное легирование сплава 1565чМ скандием, при введении последнего в количестве 0,1–0,4 мас. %.

На рисунке 1 представлена макроструктура сварного соединения листа сплава 1565чМ толщиной 3 мм, выполненного плазменной сваркой с присадочной проволокой СвАМг63 без легирования и с легированием скандием.

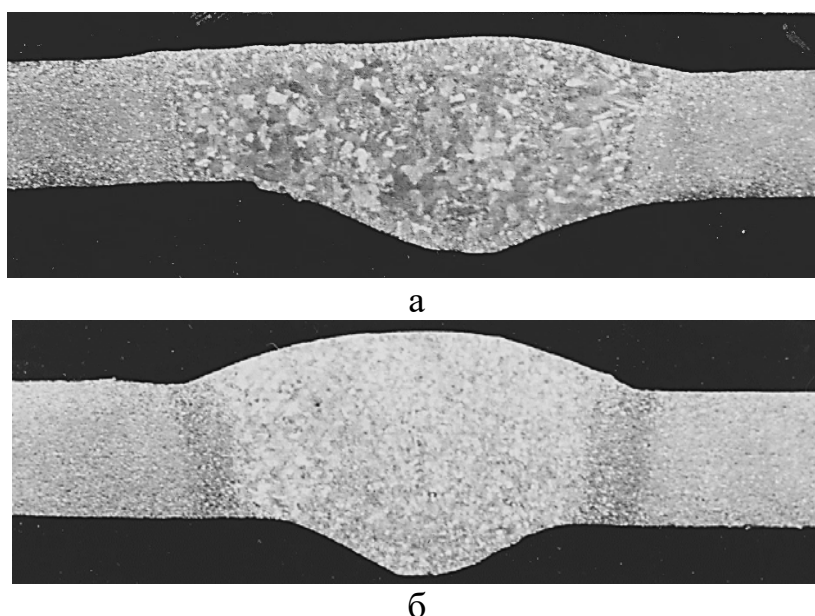


Рисунок 1 – Макроструктура стыковых сварных соединений листов сплава 1565чМ толщиной 3 мм при механизированной однопроводной плазменной сварке с различными присадками: а – СвАМг63; б – СвАМг63+Sc;

Результаты испытаний при комнатной и пониженной температурах сварных соединений сплава 1565чМ представлены в таблице 2.

Характер и темп низкотемпературного упрочнения наплавленного металла для СвАМг5 и СвАМг63 по показателям временного сопротивления составляет 17–20% при температуре –196 °С. Металл, наплавленный проволокой марки Св1575, имеет временное сопротивление на 10–15%, а условный предел текучести на 25–30% выше, чем металл, наплавленный проволоками СвАМг5 и СвАМг63, в диапазоне температур 20...–196 °С.

Таблица 2 – Результаты испытаний на статическое растяжение гладких цилиндрических образцов наплавленного металла

Марка присадочной проволоки	Способ сварки	Температура испытания, °С	Механические свойства		
			σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
СВАМг5	АрДС	20	<u>285–308</u> 293	<u>150–153</u> 152	<u>11,6–19,6</u> 15,1
		–70	<u>290–309</u> 296	<u>151–157</u> 154	<u>14,5–22,4</u> 18,7
		–165	<u>353–364</u> 357	<u>169–171</u> 170	<u>12,6–16,2</u> 14,4
		–196	<u>342–388</u> 366	<u>176–180</u> 177	<u>9,5–14,1</u> 12,5
СВАМг63	АрДС	20	<u>316–327</u> 318	<u>162–167</u> 165	<u>9,5–17,7</u> 13,5
		–70	<u>301–305</u> 302	<u>162–166</u> 164	<u>8,4–10,7</u> 9,7
		–165	<u>356–362</u> 359	<u>177–182</u> 180	<u>9,3–14,8</u> 11,9
		–196	<u>365–399</u> 388	<u>186–192</u> 190	<u>5,3–6,7</u> 6,1
Св1575	АрДС	20	<u>314–367</u> 343	<u>223–234</u> 229	<u>5,3–10,6</u> 7,1
		–70	<u>352–400</u> 375	<u>227–268</u> 249	<u>8,5–9,9</u> 9,1
		–165	<u>352–404</u> 378	<u>247–279</u> 258	<u>3,3–4,9</u> 4,2
		–196	<u>361–398</u> 381	<u>244–309</u> 279	<u>3,6–5,4</u> 4,4

Для процесса порообразования при сварке плавлением алюминиевых сплавов большое значение имеет состояние поверхности присадочной проволоки. Поверхностные загрязнения на присадочной проволоке и дефекты являются зародышами газовых пузырьков. Поэтому важно строение и состояние поверхности присадочной проволоки до и после скальпирования.

На рисунке 3 показана поверхность алюминиевой проволоки до и после скальпирования. Установлено, что при скальпировании алюминиевой проволоки Св1575 в поверхностном слое формируются сжимающие напряжения и наблюдается упрочнение поверхностного слоя в целом.

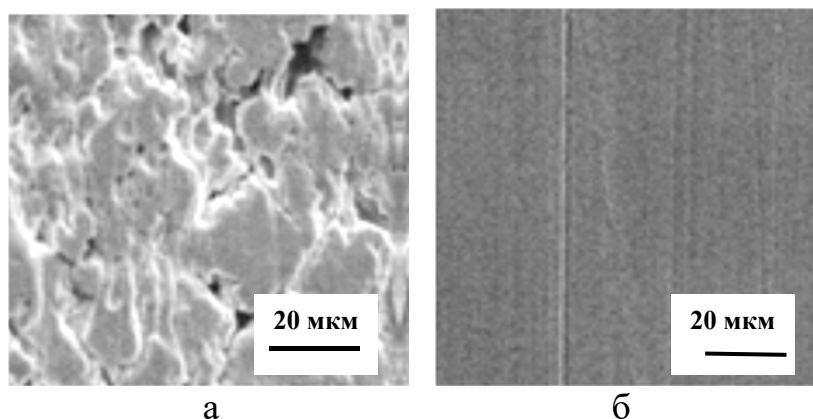


Рисунок 3 – Фото электронной микроскопии проволоки СвАМг63 до скальпирования (а) и после скальпирования (б)

Сжимающие напряжения в поверхностном слое могут вызывать миграцию легирующих элементов и, в первую очередь, магния в поверхностном слое присадочной проволоки. Установлено, что после скальпирования в поверхностном слое присадочной проволоки толщиной 35–40 мкм содержание магния составляет 2,2–3,1 масс. % при его содержании в глубинных слоях на уровне 5,7–5,8 масс. %. После скальпирования на поверхности алюминиевой проволоки Св1575 формируется тонкий слой Al_2O_3 с вкраплениями MgO. Суммарная толщина этого слоя составила 0,005–0,014 мм. Можно сказать, что в этом случае оксидная пленка состоит практически из Al_2O_3 .

Показано, что применение скальпирования поверхности присадочной проволоки позволяет получать безпористые сварные соединения вплоть до 60 суток вылеживания проволоки в цеховых условиях после обработки поверхности.

Установлено, что при сварке листов сплава 1565чМ плазменной струей обеспечивается коэффициент прочности сварных соединений на уровне 0,96...0,98. Разрушение всех образцов (с усилением и проплавом) при испытаниях на растяжение произошло по зоне сплавления.

В главе 4 приведены результаты исследования структуры и свойств стыковых соединений листов сплава 1565чМ толщиной 5 мм, выполненных плазменной сваркой с присадочной проволокой.

Показано, что при плазменной сварке с полым анодом часть поверхности, входящей в околошовную зону, подвергается катодной очистке. Участок катодной очистки имеет также место на торцевой поверхности свариваемых кромок впереди сварочной ванны. Влияние параметров режима плазменной сварки с дежурной дугой на прямой полярности на геометрические размеры зон катодной очистки исследовали с применением метода многофакторного анализа. При этом были получены следующие математические модели:

$$\begin{aligned}
 Y_1^{Ar} &= 7,025 + 1,505X_1 + 0,165X_2 - 0,27X_3; \\
 Y_2^{Ar} &= 2,575 + 0,395X_1 + 0,565X_3; \\
 Y_1^{He} &= 7,455 + 1,825X_1 - 0,115X_2 - 0,25X_3; \\
 Y_2^{He} &= 3,5475 + 1,1025X_1 - 0,0475X_2 + 0,0575X_3.
 \end{aligned}$$

где Y_1^{Ar} , Y_2^{Ar} , Y_1^{He} , Y_2^{He} – параметры оптимизации, соответствующие $S_{к1}$ и $S_{к2}$ при сварке в среде аргона и гелия; X_1 , X_2 , X_3 – параметры режима: сварочный ток, длина дуги и величина зазора соответственно. Не оценивали влияние скорости сварки, что обусловлено стабильностью этого параметра, в то время как сварочный ток, длина дуги и величина зазора подвержены случайным изменениям в процессе сварки.

Анализ полученной математической модели процесса показывает, что наибольшее влияние на размеры зоны катодной очистки оказывает сварочный ток. Увеличение длины основной дуги при сварке в гелии незначительно уменьшает размеры очищаемых зон, а величина зазора в стыке оказывает только влияние на $S_{к2}$ при сварке в аргоне. В случае плазменной сварки в аргоне с применением присадочной проволоки размер зоны $S_{к2}$ при увеличении зазора более 0,5 мм резко уменьшается, а при зазоре между свариваемыми кромками 1 мм и более следы катодной очистки на торцевой поверхности свариваемых кромок отсутствуют.

Результаты анализа структуры оксидной пленки на поверхности листа сплава 1565чМ после лазерной очистки приведены в таблице 3. Можно отметить, что лазерная очистка поверхности листов сплава 1565чМ способствует уменьшению толщины оксидной пленки и устранению в ее структуре гидратированной влаги. В комплексе это должно привести к предотвращению образования пористости в металле шва.

Таблица 3 – Толщина и фазовый состав оксидной пленки на листах сплава 1565чМ до и после лазерной очистки

Параметр	Исходное состояние	После лазерной очистки
Толщина оксидной пленки, мкм	345–415	10–26
Фазовый состав оксидной пленки	MgO + Mg(OH) ₂ + Al ₂ O ₃ • MgO	Al ₂ O ₃ + MgO

Для оценки влияния способа очистки поверхности перед сваркой на пористость металла швов сплава 1565чМ были сварены плазменной сваркой образцы толщиной 6 мм после различных способов очистки поверхности. Определение плотности и пористости сварных швов производился гидростатическим методом, регламентированным ГОСТ 5180–84. Взвешивание производили на аналитических весах OHAUS AR-2140 с погрешностью измерений $\pm 0,0001$ г. Результаты исследования по оценке влияния способа подготовки поверхности на пористость сварного шва сплава 1565чМ приведены в таблице 4.

Из таблицы 4 видно, что применение лазерной зачистки поверхности позволяет снизить количество и средний диаметр пор по сравнению с зачисткой механической щеткой примерно в 2 раза. По этому показателю лазерная зачистка поверхности листов сплава 1565чМ практически равноценна химическому травлению.

Таблица 4 – Пористость швов сплава 1565чМ при плазменной сварке в зависимости от способа подготовки поверхности перед сваркой

Способ подготовки поверхности	Количество пор диаметром 0,1–0,2 на 100 мм шва	Количество пор диаметром 0,2–0,5 на 100 мм шва	Общее количество пор на 100 мм шва	Средний диаметр пор, мм
Без подготовки	82	90	172	0,25
Зачистка металлической щеткой	70	27	97	0,21
Химическое травление в щелочи с осветлением в 30%-ном растворе азотной кислоты	35	16	51	0,11
Лазерная очистка поверхности	20	26	46	0,15

В качестве дополнительных мер по снижению пористости швов листов сплава 1565чМ можно отметить импульсное питание дежурной дуги и импульсное изменение состава плазмообразующего газа.

Установлено, что процессы дегазации металла шва в значительной степени зависят от нарастания значений тока импульса. При токе импульса 510 А средний объем пустот с увеличением крутизны нарастания ток импульса с $0,5 \cdot 10^5 \text{ Ас}^{-1}$ до $2,5 \cdot 10^5 \text{ Ас}^{-1}$ уменьшается с 0,37 до 0,12 %, что близко к их содержанию в основном металле. Более интенсивное перемешивание сварочной ванны с увеличением крутизны тока импульса способствует раздроблению и выносу окисных пленок на поверхность, где они разрушаются катодным распылением.

При импульсном изменении состава плазмообразующего газа наблюдается пульсация напряжения основной дуги при постоянной силе тока. Для сварки исследуемых образцов были применены следующие режимы сварки: ток основной дуги 60...115 А; частота подачи плазмообразующих газов $f = 1 \text{ Гц}$; $t_B : t_H = 1:1$; расход плазмообразующего газа $\Delta G = 2...4 \text{ л/мин}$; диаметр канала в плазмообразующем сопле 3 мм.

Сравнение вольтамперной характеристики плазменной дуги при сварке, как в различных газах, так и с импульсной их подачей показало, что при сварке с импульсной подачей газов напряжение на дуге выше, чем при сварке в аргоне, но ниже, чем при сварке в гелии (рисунок 4).

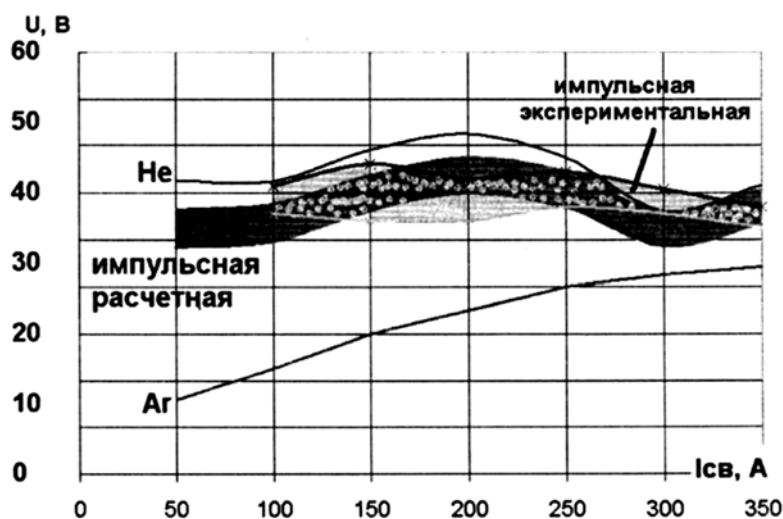


Рисунок 4 – Вольтамперная характеристика плазменной дуги при непрерывной подаче плазмообразующего газа (аргон, гелий) и импульсной попеременной подаче указанных газов

Следует отметить, что снижение пористости больше при импульсном питании дежурной дуги по сравнению с импульсным попеременной подачей плазмообразующих газов (аргон и гелий).

Металлографические исследования металла шва, выполненного присадочными материалами СвАМг5, СвАМг61 и СвАМг63, не выявили заметных отличий микроструктуры. Металл характеризуется типичной для алюминиево-магниевых сплавов литой кристаллической структурой дендритного строения с выделениями упрочняющей фазы различной степени дисперсности. Металлу шва, выполненному со сварочной проволокой марки Св1575, присуща литая мелкозернистая структура с равномерным распределением выделений упрочняющих фаз (типа Al_3Sc), как по границам, так и внутри зерен, что предполагает возможность достижения более высоких прочностных свойств сварных соединений.

Значения твердости металла шва, выполненного плазменной сваркой с полым анодом присадочной проволокой СвАМг5 и СвАМг61, находятся в пределах 85–89 и 91–95 НV. Разброс значений внутри шва не превышал 3–5%. Твердость металла шва, выполненного проволокой Св1575, на 20% выше твердости металла, сваренного с присадочной проволокой СвАМг5, и на 15% – металла, выполненного с присадочной проволокой СвАМг61. В таблице 5 представлены механические свойства металла шва, выполненные плазменной сваркой с полым анодом различными присадками при комнатной и пониженной температурах.

С понижением температуры испытаний относительное удлинение (показатель пластичности) монотонно снижается и при температуре $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет 40–75% от значений, соответствующих комнатной температуре, в зависимости от состава присадочного материала. При изучении изломов образцов, испытанных при комнатной и при криогенной температуре, зафиксирован микрорельеф ямочного вида, что характерно при вязком

разрушении пластичных металлов по механизму образования и слияния пор.

Таблица 5 – Результаты испытаний на статическое растяжение образцов из металла шва

Марка присадочной проволоки	Температура испытаний, °С	Механические свойства, мин. – макс. сред.		
		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
СВАМГ5	20	<u>286–309</u> 294	<u>151–154</u> 152	<u>11,8–19,8</u> 14,9
	–70	<u>292–309</u> 295	<u>150–156</u> 154	<u>14,0–22,7</u> 18,3
	–165	<u>355–363</u> 358	<u>169–171</u> 170	<u>12,8–16,4</u> 14,6
	–196	<u>340–389</u> 365	<u>176–180</u> 177	<u>9,7–14,6</u> 12,1
СВАМГ61	20	<u>314–321</u> 315	<u>161–165</u> 163	<u>9,3–17,5</u> 13,2
	–70	<u>300–303</u> 301	<u>160–164</u> 162	<u>8,0–10,2</u> 9,1
	–165	<u>355–360</u> 357	<u>176–180</u> 178	<u>9,0–14,6</u> 11,5
	–196	<u>360–392</u> 384	<u>185–189</u> 188	<u>5,1–6,5</u> 5,8
СВАМГ63	20	<u>329–330</u> 329	<u>167–174</u> 170	<u>13,3–15,7</u> 14,5
	–165	<u>350–362</u> 356	<u>196–198</u> 197	<u>8,9–10,8</u> 9,8
СВ1575	20	<u>312–365</u> 340	<u>221–230</u> 224	<u>5,0–10,2</u> 6,8
	–70	<u>350–393</u> 370	<u>225–265</u> 247	<u>8,3–9,7</u> 9,0
	–165	<u>349–400</u> 374	<u>243–271</u> 253	<u>3,2–4,8</u> 4,1
	–196	<u>359–395</u> 378	<u>240–307</u> 273	<u>3,5–5,1</u> 4,1

В главе 5 представлены результаты разработки технологии изготовления сварной цистерны бензовоза из листов алюминиевого сплава 1565чМ. Данная технология включала в себя следующие технологические операции: плазменная сварка полотнища для получения обечайки цистерны, гибка обечайки цистерны бензовоза (цементовоза) из сварного полотнища, сварка усилителей и элементов жесткости, приварка опор люков, опор и элементов тягового устройства.

По завершении всех сборочных и контрольных операций были получены

опытные цистерны бензовоза и цементовоза из листов алюминиевого сплава 1565чМ толщиной 6 мм (рисунок 5).

Замена сплава АМг5М (толщина 7 мм) сплавом 1565чМ (толщина 6 мм) позволит снизить массу цистерны цементовоза на 320 кг. Аналогичная замена сплавов при изготовлении цистерны бензовоза объемом 32,5 м³ позволила снизить массу цистерны на 530 кг.

Опытные конструкции бензовоза и цементовоза прошли в течение 4 лет опытную эксплуатацию при выполнении перевозок в Европейской части Российской Федерации. При опытной эксплуатации цистерны подвергались осмотру на предмет наличия трещин в зоне сварных швов.

Установлено, что за все время опытной эксплуатации экспериментальных цистерн бензовоза и цементовоза из сплава 1565чМ трещин в зоне сварных швов или нарушения их герметичности не установлено.



а



б

Рисунок 5 – Сварные цистерны бензовоза (а) и цементовоза (б) из листов сплава 1565чМ после сборки без покраски

Применение плазменной сварки с полым анодом сплава 1565чМ по сравнению со сплавом АМг5М не вызывает усложнения технологического процесса. Применение лазерной очистки поверхности свариваемых кромок обеспечивает в сочетании со скальпированием присадочной проволоки Св1575 отказаться от химической подготовки основного и присадочного металла. Указанную проволоку следует применять для частично механизированной дуговой сварки плавящимся электродом в аргоне.

В заключении обобщены основные результаты диссертационной работы.

В приложении приведены акты о практическом использовании результатов работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЫ

На основе результатов экспериментальных исследований, осуществленных в рамках диссертационной работы, можно констатировать следующее:

1. Установлено, что листы сплава 1565чМ при сварке плавлением превосходят по значению коэффициента трещинообразования (8–11%) листы алюминиевого сплава АМг5М (12–18% соответственно). Склонность к порообразованию при сварке плавлением у обоих сплавов примерно одинаковая.

2. Введение скандия в присадочную проволоку в количестве 0,15–0,20 мас. % полностью подавляет образование трещин при сварке плавлением листов сплава 1565чМ.

3. Металлу шва, выполненному со сварочной проволокой марки Св1575 (легированная скандием), присуща литая мелкозернистая структура с равномерным распределением выделений упрочняющих фаз (типа Al_3Sc), как по границам, так и внутри зерен, что предполагает возможность достижения более высоких прочностных свойств сварных соединений.

4. Установлено, что при сварке листов сплава 1565чМ плазменной дугой обеспечивается коэффициент прочности сварных соединений на уровне 0,96...0,98 от значения временного сопротивления основного материала. Разрушение всех образцов (с усилением и проплавом) при испытаниях на растяжение произошло по зоне сплавления.

5. Установлено, что характер и темп низкотемпературного упрочнения наплавленного металла присадочными проволоками СвАМг5 и СвАМг63 по показателям временного сопротивления составляет 17–20% при температуре –196 °С. Металл, наплавленный проволокой марки Св1575, имеет временное сопротивление на 10–15%, а условный передел текучести на 25–30% выше, чем металл, наплавленный проволоками СвАМг5 и СвАМг63, в диапазоне температур 20...–196 °С.

6. Для присадочной проволоки Св1575 после химического травления и 10 суток вылеживания оксидная пленка представляла собой слоистую структуру. Верхний слой представляет собой рыхлый оксид магния MgO. Толщина этого слоя составляет 0,003–0,01 мм. Непосредственно под ним располагается слой шпинели на основе $MgO + Al_2O_3$ (толщина данного подслоя 0,01–0,025 мм). Под слоем шпинели располагается слой оксида Al_2O_3 . Суммарная толщина оксидной пленки на поверхности проволоки Св1575 после химического травления составила 0,013–0,038 мм.

6. После скальпирования на поверхности присадочной проволоки Св1575 формируется тонкий слой Al_2O_3 с вкраплениями MgO. Суммарная толщина этого слоя составила 0,005–0,014 мм. Можно сказать, что в этом случае оксидная пленка состоит практически из Al_2O_3 .

7. При скальпировании алюминиевой присадочной проволоки Св1575 в поверхностном слое формируются сжимающие напряжения и наблюдается

упрочнение поверхностного слоя в целом. Анализ содержания магния показал, что после скальпирования на поверхности проволоки формируется слой с обедненным содержанием магния (на уровне 2 мас. %) по сравнению с ее глубинными слоями.

8. На основе полученных экспериментальных результатов можно отметить, что применение скальпирования поверхности присадочной проволоки марки Св1575 позволяет получать безпористые сварные соединения вплоть до 60 суток вылеживания проволоки в цеховых условиях после обработки поверхности.

9. Изучена структура оксидной пленки на поверхности листов из сплава 1565чМ. По данным исследования оксидная пленка состоит из нескольких последовательно расположенных слоев: внешний слой – сформирован оксидами и гидроксидом магния. При этом по мере углубления в металл содержание магния в оксидной пленке падает. Процесс окисления поверхности листа полностью прекращается при образовании слоя оксида Al_2O_3 , под которым располагается слой сплава с меньшим содержанием легирующих элементов. Суммарная толщина оксидной пленки зависит от температуры нагрева под горячую прокатку и продолжительности выдержки при данной температуре, а также от температуры отжига листов после холодной прокатки.

10. После лазерной очистки наблюдается существенное изменение цвета поверхности листа сплава 1565чМ с темно-серого (для исходного состояния) до светлого матово-серебристого после лазерной очистки. Лазерная очистка снижает толщину оксидной пленки на сплаве 1565чМ с 345–415 мкм до 10–26 мкм. При этом оксидная пленка после обработки состоит из $Al_2O_3 + MgO$.

11. Установлено, что применение лазерной зачистки поверхности позволяет снизить количество и средний диаметр пор по сравнению с зачисткой механической щеткой примерно в 2 раза. По этому показателю лазерная очистка поверхности листов сплава 1565чМ практически равноценна химическому травлению.

12. Импульсное питание плазменной дуги при сварке с полым анодом способствовало дополнительному снижению среднего объема пор на 100 мм длины шва с 0,36 до 0,12%. При этом протяженность оксидных включений на 1 м длины шва сократилось примерно в 3,2–3,5 раза.

13. Анализ пористости в металле шва показал, что при переходе от сварки на постоянном токе обратной полярности к импульсным процессам (сварка с импульсным питанием дежурной дуги и сварка с периодической импульсной подачей плазмообразующих газов) наблюдается ее интенсивное уменьшение. Так суммарная площадь пор на 100 мм длины шва снижается с 24,9 мм² до 9,7 мм² для плазменной сварки с импульсным питанием дежурной дуги и 13,9 мм² для варианта импульсной подачи плазмообразующих газов.

14. Разработан технологический процесс изготовления сварных цистерн бензовоза и цементовоза из листов алюминиевого сплава 1565чМ толщиной 6 мм. Основными новыми операциями технологического процесса являются плазменная сварка с полым анодом полотнища обечайки цистерны, лазерная очистка свариваемых кромок листов перед сваркой и применение при сварке присадочной проволоки марки Св1575 легированной скандием со

скальпированной поверхностью.

15. Замена сплава АМг5М (толщина 7 мм) сплавом 1565чМ (толщина 6 мм) позволила снизить массу цистерны цементовоза на 320 кг. Аналогичная замена сплавов при изготовлении цистерны бензовоза объемом 32,5 м³ позволила снизить массу цистерны на 530 кг.

16. Установлено, что за все время опытной эксплуатации в течение 4 лет экспериментальных цистерн бензовоза и цементовоза из сплава 1565чМ трещин в зоне сварных швов или нарушения их герметичности не установлено.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Овчинников В.В. Особенности электронно-лучевой сварки пресованных полос высокопрочного алюминиевого сплава системы Al–Zn–Mg–Cu. /В.В. Овчинников, В.С. Магнитов, Е.Н. Йода, Р.Н. Растопчин, М.А. Гуреева. // Заготовительные производства в машиностроении. 2009. – №11. – С.9–13. (Белый список, К4, ВАК).

2. Дриц А.М. Технологические свойства листов из свариваемого алюминиевого сплава 1565ч для производства цистерн. /А.М. Дриц, В.В. Овчинников, Р.Н. Растопчин. // Технология легких сплавов. – 2012. – №3.–С.20–29. (ВАК).

3. Дриц А.М. Исследование свойств сварных соединений сплава 1565ч применительно к изготовлению сварных цистерн. / А.М. Дриц, В.В. Овчинников, Р.Н. Растопчин. // Цветные металлы – 2012. – №12. – С.85– 89. (Белый список, К2, ВАК).

4. Овчинников В.В. Особенности сварки листов алюминиевого сплава 1565чМ при производстве цистерн бензовозов. / В.В. Овчинников, А.М. Дриц, Р.Н. Растопчин. // Машиностроение и инженерное образование. – 2013. – №4. – С.24–36. (Белый список, К4, ВАК).

5. Овчинников В.В. Влияние регулируемого перемещения дуги по поверхности сварочной ванны на качество шва при аргонодуговой сварке алюминиевого сплава 1565чМ. / В.В. Овчинников, А.М. Дриц, И.А. Курбатова, Р.Н. Растопчин. // Электротехнология. 2015. – №12. – С.17-26. (Белый список, К3, ВАК).

6. Овчинников В.В. Технологические особенности аргонодуговой сварки алюминиевых сплавов вращающимся электродом. / В.В. Овчинников, А.М. Дриц, М.А. Гуреева, Р.Н. Растопчин. // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. – №1. – С.10-16. (Белый список, К4, ВАК).

7. Овчинников В.В. Механические свойства сварных соединений листов сплава 1565ч при низких температурах. / В.В. Овчинников, А.М. Дриц, М.А. Гуреева, Д.В. Малов, Р.Н. Растопчин. // Электротехнология. 2016. – №6. – С.2-9. (Белый список, К3, ВАК).

Ovchinnikov V.V. Mechanical Properties of the Welded Joints of 1565ch Alloy Sheets at Low Temperatures. / V.V. Ovchinnikov, A.M. Drits, M.A. Gureeva, D.V. Malov, R.N. Rastopchin // Russian Metallurgy (Metally), Vol. 2017, No. 6, pp. 483–

488. DOI 10/1134/S0036029517060167. (Scopus, Web of Science, Q3).

8. Овчинников В.В. Плазменная сварка высокопрочных алюминиевых сплавов. / В.В. Овчинников, Р.Н. Растопчин. // Научные технологии в машиностроении. 2020. – №7. – С.3–11. (Белый список, К2, ВАК).

9. Овчинников В.В. Влияние легирования скандием присадочной проволоки на свойства сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов. / В.В. Овчинников, Р.Н. Растопчин, Л.П. Андреева. // Заготовительные производства в машиностроении. 2021. – (19). – №6. – С.248-257. DOI: 10.36652/1684-1107-2021-19-6-248-257. (Белый список, К4, ВАК).

10. Овчинников В.В. Влияние присадочной проволоки на структуру и свойства соединений листов сплава 1565чМ, выполненных плазменной сваркой. / В.В. Овчинников, А.М. Дриц, Р.Н. Растопчин. // Заготовительные производства в машиностроении. 2023. – (21) – №1. – С.12–18. DOI: 10.36652/1684-1107-2023-21-1-12-18. (Белый список, К4, ВАК).

Ovchinnikov V.V. Effect of a Filler Wire on the Structure and Properties of the Plasma-Welded Joints of 1565ChM Alloy Sheets / Ovchinnikov V. V, Drits A.M., Rastopchin R.N. // Russian Metallurgy (Metally), Vol. 2024, No. 6, pp. 1278–1284. DOI: 10.1134/S0036029524702343. (Scopus, Web of Science, Q3).