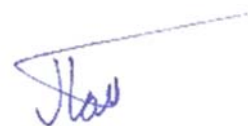


На правах рукописи



Поляков Денис Алексеевич

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ
СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С
ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ, НА ИХ ДЕФОРМАЦИОННУЮ СПОСОБНОСТЬ**

Научная специальность

2.6.17. Материаловедение (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2025

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: – **Шиганов Игорь Николаевич**,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана (национальный
исследовательский университет)», профессор

– **Белов Николай Александрович**,
доктор технических наук, профессор, ФГАОУ
ВО «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСИС»,
главный научный сотрудник

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

Защита диссертации состоится «08» июля 2025 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.04 (Д 212.125.15) в ФГБОУ 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 Сковрцовой Светлане Владимировне и по электронной почте skvortsovasv@mai.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте: https://mai.ru/upload/iblock/eed/t0yw25jmr9by9xi8d6o7p326fv3lopa5/Polyakov-D.A._Dissertatsiya.pdf

Автореферат разослан «___» _____ 202__ г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета



Сковрцова С.В

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы и темы исследования

Алюминиевые сплавы находят широкое применение в конструкции различных узлов и изделий коммерческого транспорта. К таким изделиям можно отнести цистерны автомобилей бензовозов и цементовозов, воздушные баллоны (лейнеры), котлы и днища железнодорожных цистерн для перевозки светлых нефтепродуктов, грузовые железнодорожные вагоны для перевозки зерна и кузовные навесные детали кузова автомобиля и электромобиля.

При изготовлении упомянутых конструкций применяются листы, профили и плиты из алюминиевых сплавов систем легирования Al–Mg (серия 5xxx) и Al–Mg–Si (серия 6xxx). Зачастую при получении отдельных деталей, таких как днища цистерн и воздушные баллоны используются процессы холодного и горячего деформирования сварных заготовок.

При соединении холоднокатанных листов сплавов системы Al–Mg, таких как AMg5, AMg6 и 1565ч, с использованием сварки плавлением в сварном шве формируется литая дендритная структура, что приводит к существенному увеличению размера зерен, а также имеет место укрупнение наночастиц вторых фаз. В зоне термического влияния под действием сварочного тепла наблюдается снятие упрочнения за счет пластической деформации листового полуфабриката.

При холодной деформации сварных заготовок из сплавов системы Al–Mg, выполненных сваркой плавлением, даже в соединениях без внутренних дефектов зачастую наблюдается образование трещин по зоне сплавления и по металлу шва в процессе деформирования.

Кроме того, как при холодном, так и при горячем деформировании сварных заготовок, полученных сваркой плавлением, требуется удаление механическим путем выпуклости шва с лицевой и корневой сторон соединения.

Для повышения деформационной способности сварных заготовок сплавов системы Al–Mg стремятся измельчить структуру металла шва. С этой целью в присадочный металл вводят скандий в количествах до 0,5%. Введение скандия позволяет уменьшить средний размер зерна в шве и частично решить проблему с холодным деформированием сварных заготовок из алюминиевых сплавов.

Использование сварки трением с перемешиванием (СТП), в основе которой лежат процессы интенсивной пластической деформации (ИПД) при повышенной температуре, позволяет решить эту проблему. Максимальная температура нагрева заготовок в процессе СТП не превышает 500–520°C, а время воздействия исчисляется минутами. При определенных режимах влияние СТП на частицы вторых фаз может быть минимизировано, что позволяет сохранить высокие прочностные свойства в сварных соединениях.

В сварном шве формируется мелкозернистая или ультра мелкозернистая структура (УМЗ), которая обеспечивает высокие механические свойства. В зависимости от режима СТП прочность шва в термически неупрочняемых сплавах может не только достигать прочности основного материала в отожженном состоянии, но и превосходить его.

В тоже время как показали результаты опробования процесса осадки сварной обечайки (заготовки лейнера), полученной сваркой трением с перемешиванием, в нагретую до 480–500 °С форму для оформления днищ баллона, наблюдается вытекание металла шва из-за проявления сверхпластичности с формированием дефектных деталей. При этом такие дефектные детали уже не подлежат ремонту.

В этой связи актуальным становится изучение особенностей процесса холодного и горячего деформирования сварных заготовок алюминиевых сплавов системы Al–Mg, полученных сваркой трением с перемешиванием, в зависимости от характера зеренной структуры основного металла и металла шва.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда №22–19–00121 «Закономерности структурно-фазовых превращений в алюминиево-кальциевых сплавах, легированных цинком и магнием, в условиях сварки» и проекта FZRR-2023-0005 «Разработка основополагающих технологических принципов применения концентрированных потоков энергии для получения новых импортозамещающих композиционных материалов специального назначения на основе систем несмешивающихся компонентов».

Степень разработанности темы. Большой вклад в решение проблемы повышения комплекса свойств сварных соединений при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов внесли ученые Штрикман М.М., Лукин В.И., Колубаев А.Е., Дриц А.М., Бакшаев В.А., Фролов В.А., Бойцов А.Г., Тарасов С.Ю., Миронов С.Ю., Павлова В.И., W.M. Thomas, C.J. Dawes, R.S. Mishra, Y.S. Sato, E. Cerri и др.

Целью диссертационной работы состояла определении деформационной способности сварных заготовок из алюминиевого сплава 1565чМ в зависимости от размера зерна в шве в горячем и холодном состояниях и разработке технологии формообразования деталей из сварных заготовок.

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

1. Установить влияние основных параметров режима односторонней сварки трением с перемешиванием на средний размер зерна в шве;
2. Определить зависимость среднего размера зерна в металле шва от среднего размера зерна в структуре листов сплава 1565чМ;
3. Изучить влияние схемы выполнения сварки трением с перемешиванием на средний размер зерна в шве;
4. Исследовать механические свойства основного металла из сплава 1565чМ и металла шва при отрицательных, комнатной и повышенной температуре испытаний;
5. Определить соотношение среднего размера зерна в шве и среднего размера основного металла, при котором они обладают одинаковой деформационной способностью в нагретом состоянии;

6. Установить эффективные технологические пути регулирования среднего размера зерна в шве при сварке трением с перемешиванием алюминиевого сплава 1565чМ.

Научная новизна

1. Установлено, что при сварке трением с перемешиванием листов сплава 1565чМ толщиной 7 мм на частоте вращения рабочего инструмента 850 об/мин и величине подачи в диапазоне 0,17–0,53 мм/об в зоне перемешивания формируется ультрамелкозернистая рекристаллизованная структура со средним размером зерна 5,5–9,5 мкм, который не зависит от исходного размера зерна.

2. Показано, что средний размер зерна в шве зависит от толщины исходного листа алюминиевого сплава 1565чМ и от величины подачи инструмента на один оборот. С увеличением толщины листа сплава 1565чМ с 3 до 7 мм средний размер зерна в зоне перемешивания с 4,3 мкм до 9,5 мкм с 4,3 мкм до 9,5 мкм при подаче инструмента 0,17 мм/об. Увеличение подачи инструмента на один оборот с 0,17 мм/об до 0,53 мм/об вызывает снижение среднего размера зерна в зоне перемешивания с 9,5 мкм до 5,5 мкм.

3. Установлено, что в процессе нагрева одинаковая деформационная способность сварного шва и основного металла в сплаве 1565чМ достигается при среднем размере зерна шва 0,42–0,48 от среднего размера зерна основного металла.

4. Показано, что дополнительный сопутствующий подогрев свариваемых заготовок в процессе сварки трением с перемешиванием до 180–200°C способствует увеличению среднего размера зерна в сварном шве с 5,5 до 12,5–16,7 мкм.

5. Установлено, что высокотемпературный нагрев сварных соединений сплава 1565чМ толщиной 7 мм до температур выше 520°C вызывает аномальный рост зерен до 120–150 мкм. Холодная прокатка сварных соединений на 12–15% обжатия, предваряющая их высокотемпературный нагрев, позволяет подавить аномальный рост зерен.

Теоретическая и практическая значимость

1. Разработаны технологические режимы сварки трением с перемешиванием листов из сплава 1565чМ толщиной 6–7 мм: частота вращения инструмента 850 об/мин и скорость сварки 150–450 мм/мин приводят к формированию рекристаллизованной ультрамелкозернистой структуры в зоне перемешивания со средним размером зерна 5,5–9,5 мкм, что обеспечивает временное сопротивление металла шва (зоны перемешивания) 355–365 МПа, которое на 5–10 МПа выше, чем основного металла, при сохранении высокого уровня пластичности, что позволило получить методом холодной деформации качественные днища котлов цистерн из сварных заготовок, а также проведению калибровки раскаткой сварных заготовок воздушных баллонов, что подтверждено соответствующим актом.

2. Оценена работоспособность сварных соединений листов сплава 1565чМ, выполненных сваркой трением с перемешиванием, при циклическом нагружении на базе 10^7 циклов. Усталостная прочность сварных соединений составила 0,94–0,97 от значения усталостной прочности основного металла (150 МПа).

3. Разработаны технологические рекомендации по изготовлению сварных узлов и сборок из сплава 1565чМ конструкций коммерческого транспорта с применением сварки трением с перемешиванием, что подтверждено соответствующим актом.

4. Результаты диссертационной работы были внедрены в учебно-образовательный процесс подготовки бакалавров и магистров по направлениям 22.03.01 и 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов» при преподавании дисциплин «Оборудование и технологии обработки материалов концентрированными потоками энергии» и «Инновационные технологии обработки функциональных 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 сварки трением с перемешиванием листов алюминиевого сплава 1565чМ, обеспечивающих формирование стыковых соединений без внутренних дефектов и с требуемым размером зерна шва;

2. Результаты исследования воздействия температуры испытаний на механические свойства стыковых соединений листов алюминиевого сплава 1565чМ, выполненных сваркой трением с перемешиванием по различным технологическим схемам;

3. Совокупность экспериментальных данных о влиянии сопутствующего подогрева на средний размер зерна в шве сплава 1565чМ при односторонней сварке трением с перемешиванием;

4. Результаты исследований механических свойств стыковых соединений сплава 1565чМ при пониженных, нормальной и повышенных температурах испытаний в зависимости от размера зерна в шве.

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 научно-практических конференциях, в том числе: Межвузовский Международный конгресс «Высшая школа: Научные исследования» (10.07.2021, Москва); Международная научно-техническая конференция «СМИС-2023. Инновационные технологии в управлении качеством» (15-17 мая 2023 г., Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы научного и технологического обеспечения инновационного развития» (9 августа 2023 г. г. Таганрог, РФ Москва); Международная научно-техническая конференция «СМИС-2024. Инновационные технологии в управлении качеством» (22-24 мая 2024 г., Москва);

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 17 научных работах в рецензируемых научных журналах, сборниках и трудах конференций, из них 11 статей, входящих в перечень журналов из списка ВАК РФ, 5 статей – в изданиях Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 174 наименований, 2-х приложений, всего 214 страниц машинописного текста, в том числе 87 рисунков и 34 таблицы.

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 отечественных и зарубежных научных публикаций о состоянии и перспективах развития процессов сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов. Показано, что в зоне перемешивания

формируется рекристаллизованная равноосная структура с ультрамелким зерном в диапазоне 1,9–8,5 мкм. Описано влияние основных параметров режима сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов на структуру зоны перемешивания и механические свойства как соединения в целом, так и металла шва. Проанализированы особенности холодного деформирования сварных заготовок алюминиевых сплавов, выполненных сваркой трением с перемешиванием. Показана высокая эффективность получения деталей из сварных заготовок алюминиевых сплавов путем холодного деформирования.

Проанализированы результаты нагрева сварных заготовок, выполненных СТП. Показано, что нагрев до температуры свыше 500 °С приводит к спонтанному росту зерна в зоне перемешивания. При этом существенно снижаются механические свойства сварных соединений, что приводит к появлению трещин при горячем деформировании сварных заготовок.

Горячее деформирование сварных заготовок при нагреве формы в диапазоне температур 450–480 °С сопровождается вытеканием металла сварного шва вследствие проявления эффекта сверхпластичности зоны перемешивания. В этом случае наблюдается различная деформационная способность шва и основного металла в нагретом состоянии.

Рассмотрены перспективы использования процесса сварки трением с перемешиванием для получения стыковых соединений заготовок из листов алюминиевых сплавов системы Al–Mg. 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 1565ч в виде листового полуфабриката толщиной 8 мм после отжига. Сварные стыковые соединения из листов исследуемого сплава получали на оборудовании для СТП, разработанном ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель» и на опытной установке, созданной на базе фрезерного станка с числовым программным управлением.

В таблице 1 приведены ориентировочные режимы сварки трением с перемешиванием листовых заготовок алюминиевого сплава 1565чМ толщиной 7 мм, которые были взяты за основу при отработке режимов сварки.

СТП осуществляли инструментом в виде державки со сменным наконечником, состоящим из буртика и стержня, на поверхности которого выполнена винтообразная канавка глубиной 0,8 мм. Стержень диаметром 5,5 мм имел высоту 6,8 мм для гарантированного соединения свариваемых листов по всей их толщине. Инструмент был изготовлен из инструментальной стали Р18.

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.

Таблица 1 – Режимы односторонней сварки трением с перемешиванием листов сплава 1565чМ

Марка сплава	Частота вращения инструмента ω , об/мин	Скорость подачи инструмента (скорость сварки) $V_{св}$, мм/мин	Угол наклона инструмента в плоскости свариваемых кромок α , град.	Усилие прижатия инструмента, Р, кг
1565чМ	500–1100	100–450	3	2000–2100

Испытания сварных соединений на статическое растяжение и статический трехточечный 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.

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.

Для выявления особенности зеренной структуры неразъемных соединений проводились металлографические исследования при помощи средств световой микроскопии. 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). Для получения и анализа EBSD данных использовалось программное обеспечение TSL OIM. В качестве критерия мало- и большеугловых границ (МУГ и БУГ, соответственно) использовалась разориентировка 15°.

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.

Для определения геометрических параметров структурных элементов и изучения рельефа поверхности использовали метод АСМ “Grand Analysis”.

Для определения температуры нагрева металла в зоне формирования шва при сварке трением с перемешиванием было проведено исследование зависимости термического цикла от основных параметров режима сварки. Расчётная толщина слоя материала пластины между стержнем и термопарой составляла не более 100–150 мкм. Такое положение позволяло измерять температуру максимально близко к зоне перемешивания без опасности разрушения термопары. Инструментальная погрешность измерений составляла не более ± 2 °С.

Испытания образцов сварных соединений алюминиевого сплава 1565чМ 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.

В главе 3 представлены результаты исследования особенностей формирования структуры сварных соединений листов сплава 1565чМ при сварке трением с перемешиванием.

Анализ зависимости максимальной температуры нагрева металла в зоне перемешивания от основных параметров режима сварки трением с перемешиванием – частоты вращения рабочего инструмента и скорости его линейного перемещения – показал, что можно выделить два экстремальных типа термических условий в ходе СТП: с низким тепловложением (сочетающим в себе низкую пиковую температуру и высокую скорость охлаждения) и высоким тепловложением (сочетающим высокую пиковую температуру и низкую скорость охлаждения). СТП с низким тепловложением обеспечивается сочетанием низкой скорости вращения инструмента и большой скорости сварки. СТП с высоким тепловложением обеспечивается сочетанием высокой скорости вращения инструмента и низкой скорости сварки.

Типичные профили распределения микротвердости для СТП соединений сплава 1565чМ, полученных в условиях низкого и высокого тепловложений, приведены на рисунке 1.

Можно отметить, что применение режимов СТП с высоким тепловложением способствует существенному разупрочнению сплава. Размеры зоны разупрочнения превосходят геометрические размеры рабочего инструмента.

Карты EBSD, которые отражают микроструктуры зоны перемешивания, сформированные в условиях низкого и высоко тепловложения при СТП листов сплава 1565чМ, приведены на рисунке 2.

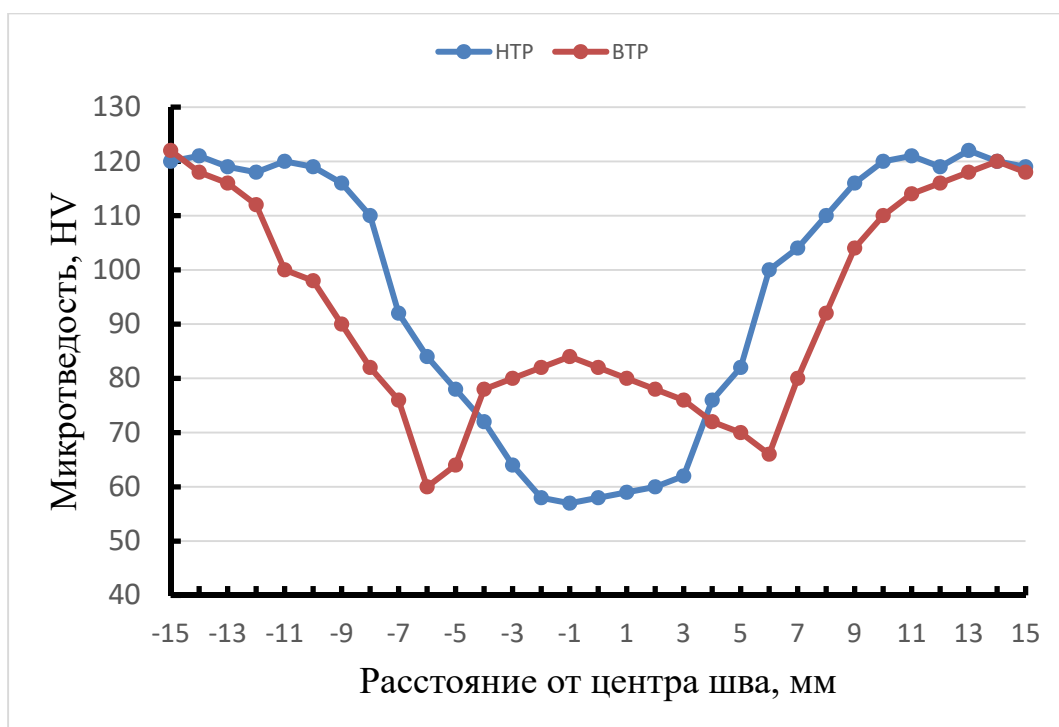


Рисунок 1 – Профили распределения микротвердости в поперечном сечении сварных соединений сплава 1565чМ, выполненных в условиях низкого (НТР) и высокого (ВТР) тепловложения (СО – сторона отвода инструмента; СН – сторона набегания инструмента)

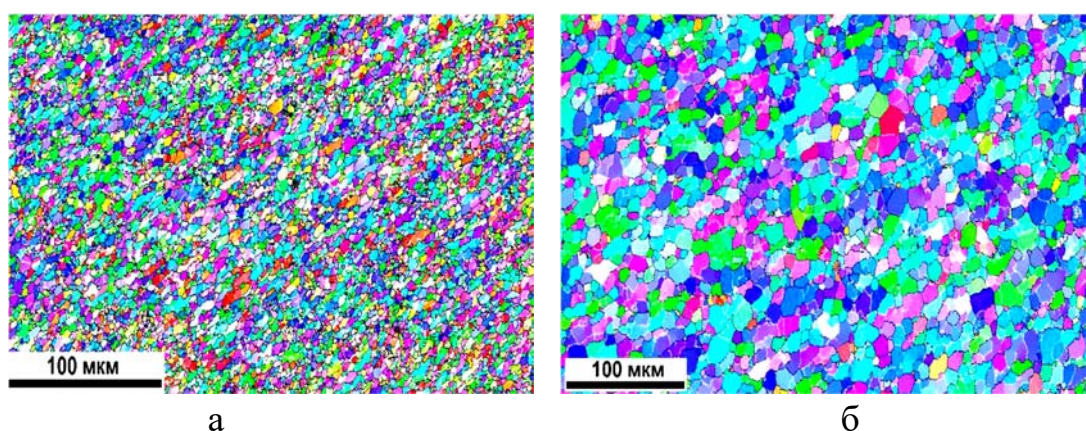


Рисунок 2 – EBSD карты зоны перемешивания сварного соединения сплава 1565чМ, выполненного на режимах с низким (а) и высоким (б) тепловложением. Малоугловые границы зерен обозначены белыми линиями, а большеугловые границы – темными линиями

При этом для режимов, характеризующихся высоким тепловложением, наблюдается образование в зоне перемешивания зеренной структуры со средним размером зерна в диапазоне 8,3–10,5 мкм. В случае сварки на режимах с низким тепловложением отмечается снижение среднего размера зерна до 5,5–6,4 мкм. На рисунке 3 представлена зависимость среднего размера зерна от обобщенного параметра режима сварки, представляющего собой отношение

скорости сварки к частоте вращения рабочего инструмента, т.е. величину подачи рабочего инструмента на один его оборот.

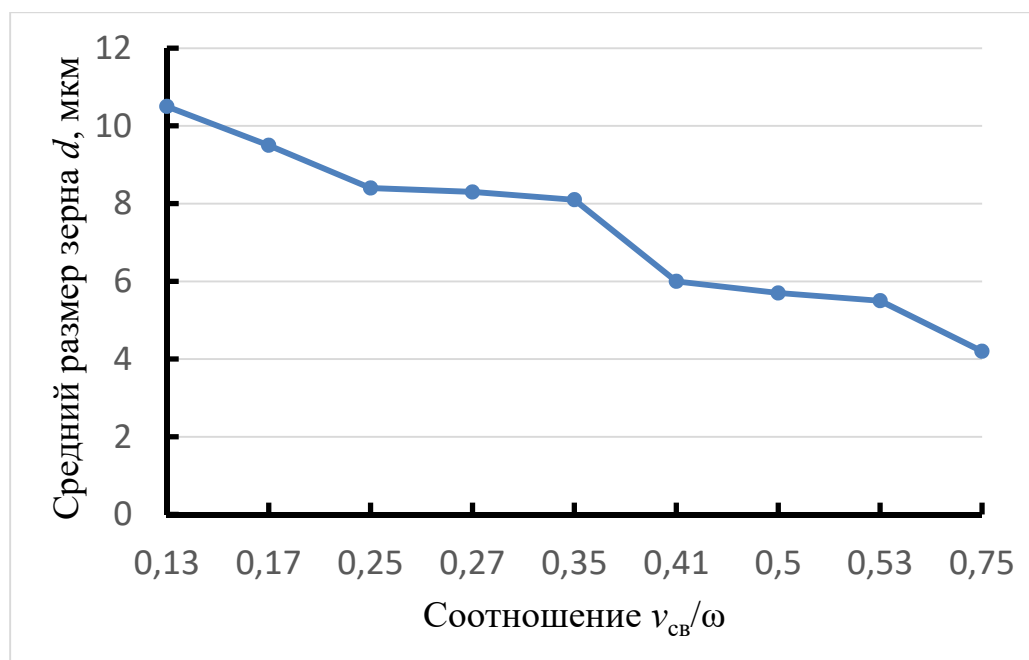


Рисунок 3 – Зависимость среднего размера зерна d в металле зоны перемешивания сплава 1565чМ от обобщенного показателя режима сварки

Влияние тепловложения режима СТП на механические свойства соединений листов сплава 1565чМ приведено в таблице 2.

Таблица 2 – Влияние параметров режима СТП на механические свойства соединений листов сплава 1565чМ

Параметры режима СТП		Временное сопротивление σ_b , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Удлинение до разрушения, %	Область разрушения сварного соединения
Частота вращения инструмента ω , об/мин	Скорость сварки $v_{св}$, мм/мин				
600	150	278	77,7	8,7	Центр ЗП
600	300	324	85,8	9,0	Центр ЗП
600	450	330	79,5	5,9	ЗТВ
850	150	265	84,7	8,3	ЗТМВ
850	300	344	92,3	8,7	ЗТМВ
850	450	350	80,1	7,5	ЗТВ
1100	150	251	81,8	5,4	ЗТВ
1100	300	315	87,5	8,7	ЗТВ
1100	450	327	91,7	9,0	ЗТВ
Основной металл		335	175	15	–
Примечание: ЗП – зона перемешивания; ЗТВ – зона термического влияния; ЗТМВ – зона термомеханического воздействия					

Как следует из таблицы 2 соединения, полученные в условиях низкого тепловложения при сварке, разрушались по зоне перемешивания, что связано с наличием дефектов в виде локальных несплавлений в металла шва. Увеличение тепловложения за счет повышения частоты вращения рабочего инструмента сопровождается смещением области разрушения в сторону зоны термомеханического воздействия и зоны термического влияния.

Исследование поверхности излома образцов сварных соединений с низким и высоким тепловложением при СТП после испытаний свидетельствовало о вязком механизме разрушения в обоих случаях. В случае низкого тепловложения поверхность излома являлась более развитой, чем в случае высокого тепловложения.

В таблице 3 приведены механические свойства соединений в зависимости от скорости сварки.

Таблица 3 – Результаты механических испытаний основного металла и соединений СТП листов сплава 1565чМ (толщина 7 мм)

Тип образца	Режим СТП		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	α , град.	Металл шва		
	ω , об/мин	$v_{св}$, мм/мин					σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Основной металл	–	–	350	165	25	105	–	–	–
Сварное соединение	850	150	341	155	13	160	355	200	28
Сварное соединение	850	450	345	158	12	175	364	209	25

Разрушение сварных соединений, сваренных на обоих режимах СТП, происходило по основному металлу на расстоянии 5–7 мм от границы шва с лицевой стороны соединения. Временное сопротивление металла шва превосходило по значениям временное сопротивление как основного металла, так и сварного соединения в целом. При нормальной температуре высокие пластические свойства металла шва подтверждаются значением угла изгиба сварного соединения на уровне 160–175°.

Оценена работоспособность сварных соединений листов сплава 1565чМ, выполненных сваркой трением с перемешиванием, при циклическом нагружении на базе 10^7 циклов. Усталостная прочность сварных соединений составила 0,94–0,97 от значения усталостной прочности основного металла (150 МПа).

Высокие пластические свойства сварных соединений листов сплава 1565чМ листов сплава 1565чМ позволили получить холодным деформированием сварных заготовок детали в виде днищ цистерн автобензовоза и днища котла железнодорожной цистерны (рисунок 4).

В главе 4 приведены результаты деформирования сварных СТП заготовок сплава 1565чМ в нагретом состоянии. В процессе экспериментов установлено, при осадке сварной обечайки с нагревом 450–500 °С в специальную форму наблюдается вытекание металла шва и формирование гофров на основном металле со стороны формы (рисунок 5).

Для определения уровня свойств основного металла и металла шва были проведены испытания на одноосное растяжение специальных образцов при повышенных температурах (таблица 4).



Рисунок 4 – Сварные заготовки (а) и днища котла бензовоза (б) после холодной деформации сварной заготовки из сплава 1565чМ толщиной 7 мм



Рисунок 5 – Возникновение дефекта из-за склонности металла шва к сверхпластичности при осадке обечайки в нагретую форму

Таблица 4 – Значения механических свойств основного металла и сварного шва сплава 1565чМ при комнатной и повышенной температуре испытаний

Температура испытания, °С	Основной металл			Металл шва		
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
20	352	164	24	372	208	27
350	44	33	76	71	68	92
400	22	13	92	38	36	138
450	11	9	164	21	21	273

При температуре испытаний 500 °С определить значения механических свойств как металла шва, так и основного металла уже не представилось возможным из-за выхода образца за пределы нагревательной камеры испытательной машины.

Установлено, что выполнение соединений на режимах с низким тепловложением способствует замедлению роста зерна в зоне перемешивания при нагреве соединений после сварки до температуры выше 500 °С.

Для подавления аномального роста зерна в зоне перемешивания после нагрева соединений выше 500 °С соединения перед нагревом подвергали холодной прокатке. В частности, после 10% деформации наименьший размер зерен был получен после прокатки вдоль направления сварки, в то время как изменение направления прокатки способствовало существенному огрублению зёрненной структуры. С другой стороны увеличение степени обжатия более 15% способствует полному нивелированию влияния направления прокатки.

Результаты испытаний при повышенных температурах основного металла из сплава 1565чМ с различной величиной зерна, полученной в результате РКУП показали, что близкие значения механических характеристик сплава 1565чМ при повышенных температурах испытаний сохраняются при среднем размере зерна в образце на уровне 14–16 мкм. Это соответствует примерно 0,42–0,48 от среднего размера зерна в исходном сплаве.

В работе исследованы технологические пути обеспечения необходимого соотношения между средним размером зерна в зоне перемешивания и основным металле. Одним из направлений является измельчение структуры основного металла. Это направление может быть реализовано за счет получения ультрамелкозернистой структуры в основном металле (размер зерна 8–12 мкм). Технология изготовления листов с УМЗ структурой включала горячую прокатку, отжиг при температуре ниже сольвуса сплава, холодную прокатку с регламентированной степенью деформации, отжиг. Однако, в настоящее время имеющееся оборудование позволяет получать листы сплава 1565чМ с ультрамелкозернистой структурой толщиной не более 3–3,5 мм.

Другим путем обеспечения мелкозернистости основного металла является обработка параллельными швами с наложением участка сварной обечайки, которая затем подвергается осадке в нагретую форму. Такую обработку выполняют на режимах СТП продольного шва трубчатой заготовки смежными проходами. С помощью наложения смежных проходов фрикционной обработкой был обработан торцевой участок сварной трубной заготовки из сплава 1565чМ протяженностью 100 мм от торца трубы. Для обработки деформируемого торца сварной трубной заготовки пришлось выполнить около 95 смежных проходов фрикционной обработки на что было затрачено 7,5–8 часов рабочего времени. Это делает данную технологию слишком дорогостоящей с точки зрения затрат рабочего и машинного времени.

Другим направлением регулирования среднего размера зерна в металле шва в сторону его увеличения при СТП трубчатых заготовок из сплава 1565чМ является варьирование температуры нагрева металла шва, использование

сопутствующего подогрева заготовки в процессе СТП, а также применение схемы сварки Bobbin Tul.

Температуру сопутствующего подогрева основания приспособления и свариваемого образца при постоянном режиме СТП задавали дискретно от 20 до 200 °С при шаге 25 °С. Установлено, что при температуре сопутствующего подогрева в диапазоне 125–180 °С происходит увеличение значения среднего размера зерна в шве с 8,6 до 10,2 мкм. При сопутствующем подогреве до температуры 200 °С наблюдается увеличение среднего размера зерна в металле шва до 17,8 мкм, что составляет 0,53 от размера зерна в основном металле и удовлетворяет условиям равномерной деформации в нагретом состоянии. Дальнейшее увеличение температуры сопутствующего подогрева существенно ухудшает условия работы персонала на операции сварке продольного шва трубной заготовки.

Сварка бобинным инструментом (Боббин Тул) отличается от традиционного процесса односторонней сварки трением с перемешиванием тем, что тепло трения подводится с обеих сторон, так как Боббинный инструмент состоит из двух заплечиков, соединенных стержнем.

На рисунке 6 приведена сравнительная гистограмма температур нагрева свариваемых заготовок со стороны набегания и отхода инструмента при сварке трением с перемешиванием инструментом Боббин Тул.

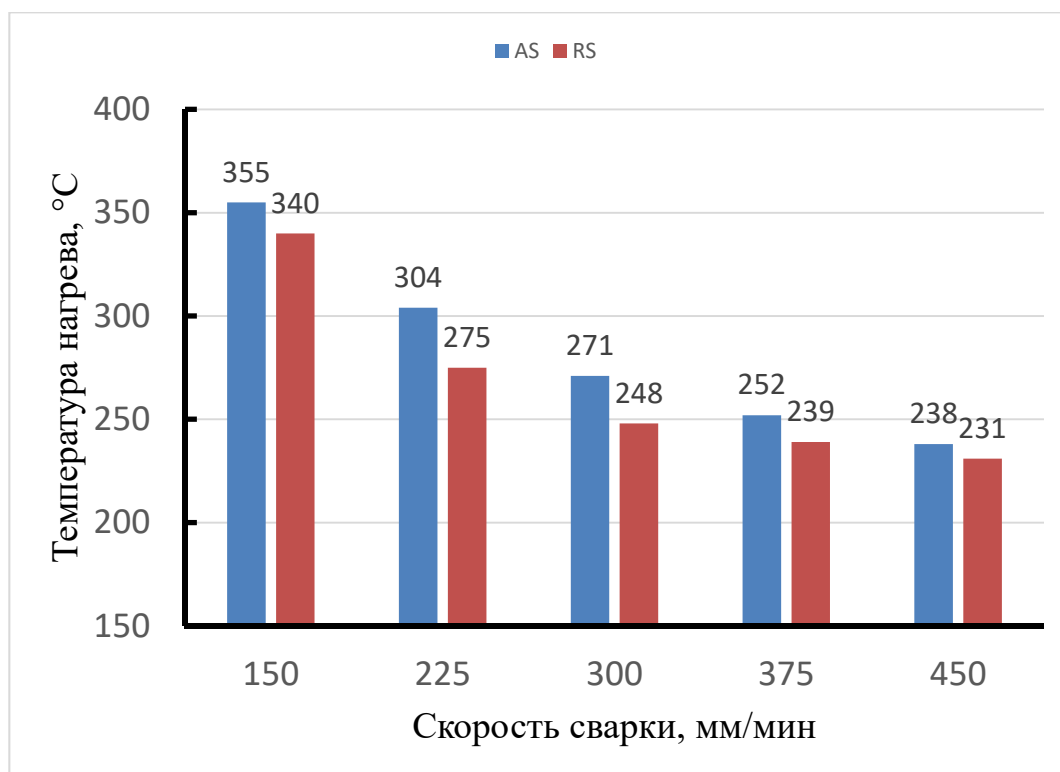


Рисунок 6 – Максимальные температуры нагрева сплава 1565ЧМ толщиной 8 мм при СТП инструментом Боббин Тул с частотой вращения инструмента 850 об/мин: AS – сторона набегания инструмента; RS – сторона отхода инструмента

На рисунке 7 приведены сравнительные данные по среднему размеру зерна в зоне перемешивания при сварке СТП односторонней и инструментом Боббин Тул при частоте вращения рабочего инструмента 850 об/мин. Можно видеть, что во всем исследованном диапазоне значений скорости сварки средний размер зерна в зоне перемешивания инструментом Боббин Тул превосходит размер зерна, полученного при односторонней СТП. С увеличением скорости сварки отмечается снижение среднего размера зерна для обоих вариантов сварки в связи с уменьшением тепловложения в зону перемешивания.

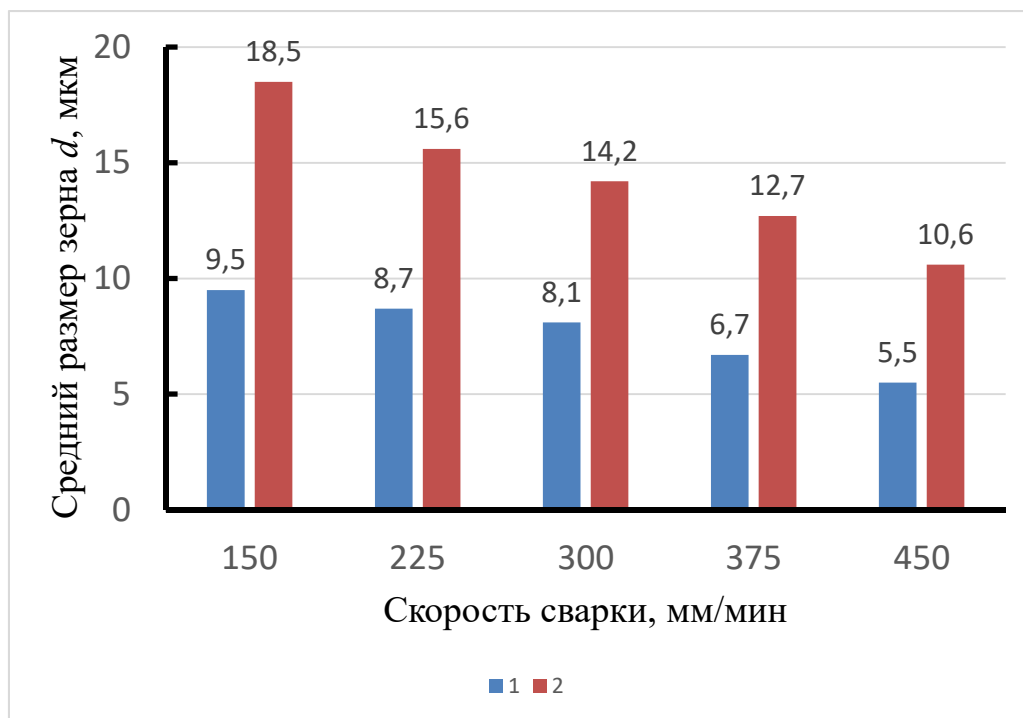


Рисунок 7 – Влияние скорости сварки на средний размер зерна в зоне перемешивания при односторонней СТП (а) и СТП инструментом Боббин Тул (2). Частота вращения инструмента 850 об/мин

Эксперименты показали, что при сварке бобинным инструментом на частоте его вращения 850 об/мин средний размер зерна в шве изменяется в диапазоне 14,2–18,5 мкм в зависимости от скорости сварки.

В главе 5 представлены результаты исследования по выбору диапазона рациональных значений параметров режима сварки трением с перемешиванием заготовок листов сплава 1565ЧМ по схеме Боббин Тул. Обобщены требования к точности сборки соединяемых заготовок к сварке. Установлено, что при величине зазора в стыке до 0,3 мм шов формируется без видимых дефектов с характерной волнообразной структурой под воздействием заплечика рабочего инструмента.

Увеличение исходной величины зазора в стыке до 0,4–0,5 мм вызывает периодическое формирование отдельных несплавов протяженностью до 15

мм. При зазоре в стыке более 0,6 мм отмечается формирование сплошного дефекта в виде несплавления на всю длину шва.

Таким образом, для выполнения бездефектных соединений сваркой трением с перемешиванием продольных швов обечаек с применением инструмента Боббин Тул перед сваркой необходимо проводить чистовое фрезерование кромок при их разведении на диаметр фрезы.

Экспериментально установлено, что при фиксированной частоте вращения рабочего инструмента 850 об/мин рекомендуемый диапазон скоростей сварки сплава 1565чМ толщиной 7 мм ограничен 115–130 мм/мин.

Для отработки технологии осадки сварной заготовки из сплава 1565чМ были изготовлены 10 опытных трубчатых заготовок. Сварка продольного шва обечайки осуществлялась на приведенных выше параметрах режима инструментом Боббин Тул.

Анализ сечений сварного соединения трубчатой заготовки из сплава 1565чМ показывает, что по мере ее осадки в нагретую до 480–500 °С форму наблюдается деформация как металла зоны перемешивания (металла шва), так и основного металла без вытекания металла зоны перемешивания (рисунок 8).

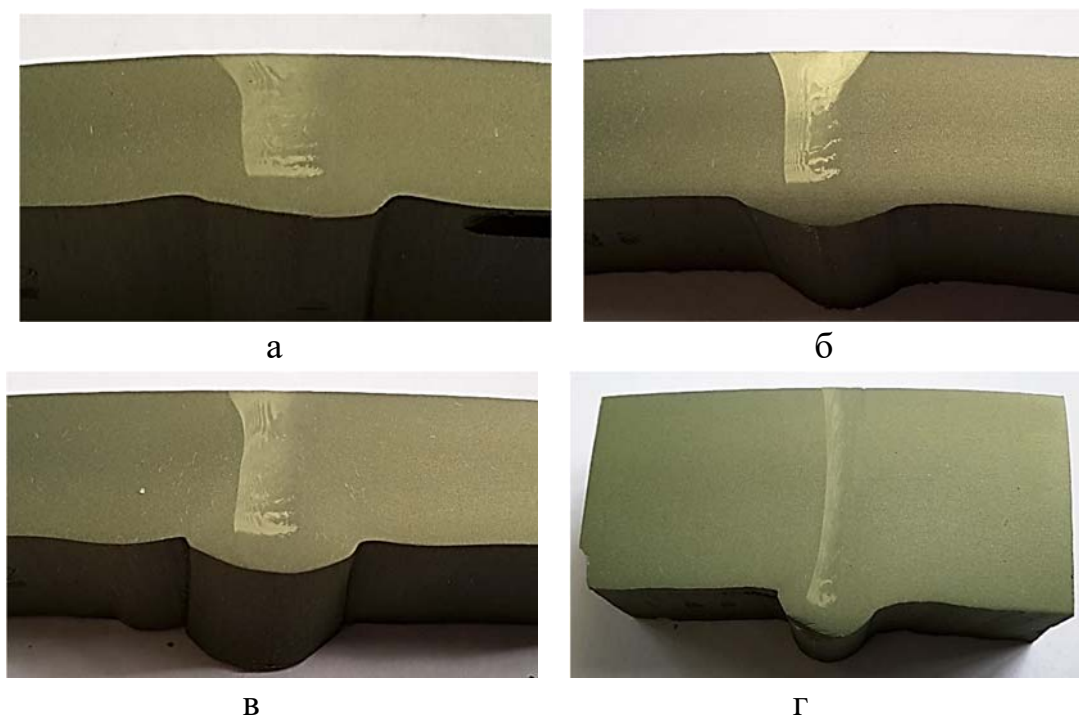


Рисунок 8 – Изменение формы сечения сварного соединения по мере осадки сварной трубчатой заготовки из плава 1565чМ в нагретую форму

Таким образом, можно считать цель исследований, которая заключалась в обеспечении равномерной деформационной способности металла зоны перемешивания и основного металла сплава 1565чМ при горячем деформировании сварных заготовок достигнутой. В результате проведенных исследований получены заготовки воздушных баллонов, сформированные посредством осадки в нагретую форму сварных трубчатых заготовок.

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 все режимы сварки трением с перемешиванием (СТП) алюминиевого сплава 1565чМ можно условно разделить на режимы с высоким и режимы с низким тепловложением. Максимальная температура нагрева металла в зоне перемешивания увеличивается с увеличением частоты вращения рабочего инструмента и уменьшается с увеличением скорости сварки.

2. Показано, что при сварке трением с перемешиванием алюминиевого сплава 1565чМ вне зависимости от исходного размера зерна в основном металле в зоне перемешивания образуется рекристаллизованная структура с размером зерна 5,5–9,5 мкм. Доля большеугловых границ для указанной структуры составляет 70–73%.

3. Установлено, что на режимах сварки с низким тепловложением в зоне перемешивания формируется ультрамелкозернистая равноосная структура со средним размером зерна 5,5–7,1 мкм. В тоже время для режимов с высоким тепловложением отмечается образование структуры со средним размером зерна 8,5–9,5 мкм. В обоих случаях средний размер зерна в зоне перемешивания в 3–7 раз меньше среднего размера зерна в листе сплава 1565чМ.

4. Разрушение бездефектных соединений СТП на режимах с высоким и низким тепловложением происходит по зоне термического влияния на расстоянии 3–5 от шва. Коэффициент прочности сварного соединения сплава 1565чМ для режимов с высоким тепловложением составил 0,91–0,95, а для режимов с низким тепловложением – 0,96–0,98.

5. Временное сопротивление металла шва (зона перемешивания) соединений СТП листов сплава 1565чМ превосходит по значению (355–365 МПа) временное сопротивление основного металла (350 МПа), что объясняется упрочнением за счет формирования ультрамелкозернистой структуры. Металл шва в зависимости от режима сварки проявляет высокую пластичность. Для режимов с высоким тепловложением угол изгиба составил 160 градусов, а для режимов с низким тепловложением – 175 градусов.

6. Высокая пластичность металла шва соединений СТП сплава 1565чМ способствовала получению методом холодной деформации качественных днищ котлов цистерн из сварных заготовок, а также проведению калибровки раскаткой сварных заготовок воздушных баллонов.

7. Оценена работоспособность сварных соединений листов сплава 1565чМ, выполненных сваркой трением с перемешиванием, при циклическом нагружении на базе 10^7 циклов. Усталостная прочность сварных соединений

составила 0,94–0,97 от значения усталостной прочности основного металла (150 МПа).

8. Установлено, при осадке сварной обечайки с нагревом 450–490 °С в специальную форму наблюдается вытекание металла шва и формирование гофров на основном металле со стороны формы. Это явление напрямую связано с различием в деформационной способности основного металла и металла зоны перемешивания, которые обусловлены различиями в среднем размере зерна в структуре.

8. Показано, что близкие значения механических характеристик сплава 1565чМ при повышенных температурах испытаний сохраняются при среднем размере зерна в образце на уровне 14–16 мкм. Это соответствует примерно 0,42–0,48 от среднего размера зерна в исходном сплаве.

9. Показано, что дополнительный сопутствующий подогрев свариваемых заготовок в процессе сварки трением с перемешиванием до 180–200 °С способствует увеличению среднего размера зерна в сварном шве с 5,5 до 12,5–17,8 мкм, что составляет 0,44–0,53 от размера зерна в основном металле и удовлетворяет условиям равномерной деформации в нагретом состоянии.

10. Экспериментально доказано, что осуществление процесса сварки трением с перемешиванием инструментом Боббин Тул при частоте вращения инструмента 850 об/мин в диапазоне скоростей сварки 150–300 мм/мин позволяет сформировать в шве рекристаллизованную структуру со средним размером зерна 14,2–18,5 мкм. Такой средний размер зерна в шве позволяет прогнозировать равномерную деформируемость в нагретом состоянии металла зоны перемешивания и основного металла.

11. Определена область рациональных режимов сварки трением с перемешиванием инструментом Боббин Тул прямолинейных швов трубчатых заготовок из алюминиевого сплава 1565чМ толщиной 8 мм. Установлен комплекс механических свойств сварных соединений, выполненных СТП инструментом Боббин Тул. Разрушение образца при испытании на статическое растяжение происходило у границы металла шва по зоне термического влияния. Коэффициент прочности сварного соединения составил 0,92.

12. Предложена технологическая схема сварки трением с перемешиванием кольцевых швов трубных заготовок малого диаметра, основанная на смещении инструмента в плоскости стыка. Получены качественные кольцевые сварные соединения на опытной партии баллонов для хранения сжиженных газов.

13. Разработаны технологические рекомендации на процесс односторонней сварки трением с перемешиванием и СТП с применением инструмента Боббин Тул заготовок алюминиевых сплавов, которые используются при изготовлении сварных конструкций с использованием деталей, претерпевающих деформирование в холодном и нагретом состояниях.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Дриц А.М., Овчинников В.В., Поляков Д.А. Свойства при повышенных температурах основного металла и сварных соединений сплава 1565ч, выполненных сваркой трением с перемешиванием. // Технология легких сплавов. 2021. – №4. – С.38–49.
2. Дриц А.М. Структура и свойства соединений листов и плит сплава 1565чН2, выполненных сваркой трением с перемешиванием. / А.М. Дриц, В.В. Овчинников, Д.А. Поляков, В.А. Бакшаев. // Цветные металлы. – 2022– №4. – С.51–59. DOI: 10.17580/tsm.2022.04.07.
3. Овчинников В.В., Поляков Д.А., Тер-Ваганянц Ю.С. Свойства сварных соединений алюминиевого сплава 1915Т, выполненных лазерной сваркой. // Заготовительные производства в машиностроении. 2022. – (20). – №9. – С.391–397. DOI: 10.36652/1684-1107-2022-20-9-391-397.
4. Овчинников В.В., Сбитнев А.Г., Поляков Д.А. Влияние размеров литого ядра на свойства точечных соединений алюминиевых сплавов. // Заготовительные производства в машиностроении. 2023. – (21) – №4. – 151–157. DOI: 10.36652/1684-1107-2023-21-4-151-157.
5. Овчинников В.В. Показатели свариваемости при сварке плавлением перспективных алюминиевых сплавов на основе системы Al–Ca–Zn–Mg. / В.В. Овчинников, Т.К. Акопян, Е.О. Проценко, Д.А. Поляков. // Научные технологии в машиностроении. 2023. – №4. – С.11–23. doi.org/ 10.30987/2223-4608-2023-11-23
6. Овчинников В.В., Сбитнев А.Г., Поляков Д.А. Влияние технологии сварки плавлением на свойства соединений алюминиевого сплава 1915Т. // Электротехнология. 2023. – 0. – №6. – С.30–39. DOI: 10.31044/1684-5781-2023-0-6-30-39.
7. Овчинников В.В., Сбитнев А.Г., Поляков Д.А. Влияние размеров литого ядра на свойства точечных соединений алюминиевых сплавов. // Технология металлов – 2023. – №10. – С.20–27. DOI: 10.31044/1684-2499-2023-0-10-20-27.
8. Дриц А.М., Овчинников В.В., Поляков Д.А. Комплекс свойств сварных соединений плит из алюминиевого сплава 1565чМ. // Цветные металлы. 2024. – №1. – С.72–79. DOI: 10.17580/tsm.2024.01.08.
9. Овчинников В.В., Поляков Д.А. Горячее деформирование сварных заготовок листов алюминиевого сплава 1565чМ. // Научные технологии в машиностроении. 2024. – №1 (151). – С.7–15. DOI: doi.org/10.30987/2223-4608-2024-7-15.
10. Овчинников В.В. Свариваемость алюминиевых сплавов на основе системы Al–Ca–Zn–Mg. / В.В. Овчинников, Т.К. Акопян, А.Г. Сбитнев, Д.А. Поляков. // Металлург. 2024. – №2. – С.51–58. DOI: 10.52351/00260827-2024-2-51.

11. Дриц А.М. Структура и свойства стыковых соединений отоженных листов из сплава 1580, выполненных односторонней сваркой трением с перемешиванием. / А.М. Дриц, В.В. Овчинников, Р.Б. Резцов, Д.А. Поляков. // Технология легких сплавов. 2024 – №4. – С.16–27. DOI: 10.24412/0321-4664-2024-4-16-27.

Статьи в зарубежных изданиях

12. Ovchinnikov V.V. Effect of Fusion Welding on the Properties of 1915T Aluminum Alloy Joints. / V.V. Ovchinnikov, A.G. Sbitnev, D.A. Polyakov. // Russian Metallurgy (Metally), Vol. 2023, No. 6, pp. 736–742. DOI: 10.1134/S0036029523060344.

13. Ovchinnikov V.V. Weldability of aluminum alloys based upon the Al–Ca–Zn–Mg system./ V.V. Ovchinnikov, T.K. Akopyan, A.G. Sbitnev, D.A. Polyakov. // Metallurgist, 2024. Online First DOI: 10.1007/s11015-024-01718-1.