

На правах рукописи



**Соловьева Ирина Валерьевна**

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОХЛАЖДЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ  
ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА  
СОЕДИНЕНИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

Специальность: 2.6.17. «Материаловедение» (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва, 2022 г.

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский политехнический университет» («Московский Политех») на кафедре «Материаловедение»

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

Официальные оппоненты: **Белов Николай Александрович**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС»,  
профессор

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

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Рыбинский государственный  
авиационный технический университет имени  
П.А. Соловьева", г. Рыбинск

Защита диссертации состоится «15» декабря 2022 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.04 (Д212.125.15) в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) 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 skvorcovasv@mati.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте: <https://mai.ru/upload/iblock/f74/ch8y2kjgy6eid0i29t987g6zyz61uhyb/Soloveva-I.V.-Dissertatsiya-05.09.2022.pdf>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Скворцова С.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Возрастающие требования, предъявляемые к прочностным, технологическим и эксплуатационным свойствам алюминиевых деформируемых сплавов, применяющихся в авиационной технике, обусловлены увеличением нагрузок, расширением интервалов рабочих температур на элементах конструкции перспективных самолетов, а также стремлением применять в производстве более технологичные сплавы с возможностью применения обработки давлением, сварки и т.д.

Для замены традиционно применяемых алюминиевых деформируемых сплавов со свойствами, не удовлетворяющими современным требованиям при разработке новых образцов летательных аппаратов, необходимо применять более совершенные конструкционные алюминиевые сплавы с повышенными механическими, эксплуатационными и технологическими свойствами.

Зачастую при использовании традиционных методов сварки, основанных на плавлении металла, для соединения термически упрочняемых жаропрочных алюминиевых сплавов в результате воздействия высоких температур на материал сварного соединения существенно изменяется структурно-фазовое состояние и снижаются прочностные свойства металла, что ограничивает применение таких материалов для создания легких и надежных конструкций с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

В 1991 г. был предложен новый способ создания неразъемных соединений в твердой фазе – сварка трением с перемешиванием (СТП). Данный способ в настоящее время получает все большее распространение в мировой промышленности при производстве узлов и деталей авиакосмической, железнодорожной и автомобильной техники, поскольку позволяет формировать неразъемные соединения, прочностные и усталостные характеристики которых приближаются к характеристикам основного металла.

Несмотря на достоинства сварки трением с перемешиванием, есть ряд факторов, ограничивающих ее применение для изготовления конструкций из высокопрочных термообрабатываемых алюминиевых сплавов. В первую очередь, это сложность подбора технологического режима. Еще одной проблемой при сварке трением с перемешиванием является возможность возникновения различных сварочных дефектов, вызванных физико-механическими свойствами термически упрочняемых алюминиевых сплавов.

Анализ литературных источников показал, что для повышения уровня свойств сварных соединений алюминиевых сплавов эффективным является дополнительное воздействие на металл шва в процессе сварки. Одним из таких внешних воздействий может служить ультразвуковое воздействие. Технология сварки трением с перемешиванием с ультразвуковым воздействием является

новой, за последние пять лет наблюдается резкий рост публикационной активности по данной тематике.

Помимо ультразвукового воздействия на металл шва эффективным методом управления структурой и свойствами соединений алюминиевых сплавов при сварке трением с перемешиванием является дополнительное охлаждение металла шва. Дополнительное охлаждение металла шва и околошовной зоны при сварке оказывается весьма важным при сварке алюминиевых сплавов, склонных к перегреву, таких как сплавы системы Al–Cu–Mg.

В связи с изложенным весьма актуальным становится исследование влияния технологии охлаждения на структуру и свойства сварных соединений сплавов систем легирования Al–Cu–Mg и Al–Mg–Mn при сварке трением с перемешиванием.

**Степень разработанности темы.** Большой вклад в решение проблемы повышения комплекса свойств сварных соединений при сварке трением с перемешиванием 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** явилось изучение влияния технологии охлаждения в процессе сварки трением на структуру и свойства соединений алюминиевых сплавов систем легирования Al–Cu–Mg и Al–Mg–Mn.

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

1. Установить влияние основных параметров режима сварки трением с перемешиванием на структуру и механические свойства листов алюминиевых сплавов.

2. Провести анализ влияния скорости охлаждения сварного соединения при сварке трением с перемешиванием на средний размер зерна в зоне перемешивания сплавов систем легирования Al–Cu–Mg и Al–Mg–Mn.

3. Выявить влияние технологии охлаждения соединения на механические свойства соединений систем легирования Al–Cu–Mg и Al–Mg–Mn при нормальной и повышенной температурах.

4. Изучить влияние технологии охлаждения на коррозионную стойкость сварных соединений листов сплавов систем легирования Al–Cu–Mg и Al–Mg–Mn, выполненных сваркой трением с перемешиванием.

5. Разработать технологические рекомендации по выполнению сварки трением с перемешиванием соединений листов алюминиевых сплавов систем легирования Al–Cu–Mg и Al–Mg–Mn.

### **Научная новизна работы заключается в следующем:**

1. Установлено, что при рациональном выборе основных параметров режима сварки трением с перемешиванием исследуемых алюминиевых сплавов в зоне перемешивания формируется полностью рекристаллизованная структура со средним размером зерна в интервале 4–7 мкм. Доля большеугловых границ в рекристаллизованной структуре составила около 72% от общего числа межзеренных границ.

2. Выявлено, что формирование в структуре ядра шва алюминиевых сплавов систем легирования Al–Cu–Mg и Al–Mg–Mn при сварке трением с перемешиванием высокодисперсной структуры происходит в результате завершения процесса динамической рекристаллизации.

3. Показано, что временное сопротивление сварных соединений сплава системы легирования Al–Cu–Mg, выполненных аргонодуговой сваркой составила 0,67–0,74 от прочности сплава в термоупрочненном состоянии, в то время как для СТП этот показатель выше – 0,78–0,80. При этом временное сопротивление металла шва превосходит временное сопротивление сварного соединения в целом.

4. Показано, что дополнительное охлаждение струей воды соединений сплавов систем легирования Al–Cu–Mg и Al–Mg–Mn в процессе сварки трением с перемешиванием сопровождается снижением среднего размера зерна зоны перемешивания с 7–10 мкм до 2–4 мкм.

5. Установлено, что структура сварных соединений листов сплава системы легирования Al–Cu–Mg обладает достаточно высокой термической стабильностью при нагреве до 200 °С с выдержкой до 8 часов. При этом в соединениях указанного сплава при нагреве не установлено существенного роста зерна.

6. Выявлено, что дополнительное охлаждение водой при сварке трением сплавов систем легирования Al–Cu–Mg и Al–Mg–Mn приводит существенному (1,4–2 раза) снижению склонности различных зон соединения к межкристаллитной коррозии и является весьма эффективным методом повышения коррозионной стойкости.

### **Теоретическая и практическая значимость:**

1. Разработан процесс выполнения соединений сплавов систем легирования Al–Cu–Mg и Al–Mg–Mn сваркой трением с перемешиванием с дополнительным охлаждением металла зоны перемешивания струей воды. Предложено оборудование для реализации разработанной технологии в условиях производства.

2. Разработанный технологический процесс сварки трением с перемешиванием с дополнительным охлаждением сварного соединения, который способствует повышению механических свойств соединений при

статическом и динамическом нагружении, а также повышению коррозионной стойкости соединений сплавов систем легирования Al–Cu–Mg и Al–Mg–Mn.

3. Результаты работы положены в основу разработки режимов получения высокопрочных сварных соединений алюминиевых сплавов сваркой трением с перемешиванием на предприятии «ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель», г. Чебоксары, Чувашия.

4. Результаты работы были внедрены в учебно-образовательный процесс подготовки бакалавров и магистров по направлениям 22.03.01 и 22.04.01 "Материаловедение и технологии материалов".

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Совокупность экспериментальных данных о формировании при сварке трением с перемешиванием слоистой мелкозернистой структуры металла шва сплавов систем легирования Al–Cu–Mg и Al–Mg–Mn с размером зерен, меньшим среднего размера зерна исходной структуры сплава в 3–6 раз.

2. Результаты исследования воздействия дополнительного охлаждения на средний размер зерна, кинетику выделения частиц вторичных фаз из пересыщенного твердого раствора на стадии остывания после сварки трением с перемешиванием и коррозионную стойкость сварных соединений сплавов систем легирования Al–Cu–Mg и Al–Mg–Mn в результате эффекта ускоренного охлаждения.

3. Обоснование причин формирования слоистой структуры при сварке трением с перемешиванием исследуемых сплавов на основе конкуренции процессов деформационного упрочнения и разупрочнения вследствие нагрева.

4. Совокупность экспериментальных данных, доказывающих деформационное растворение частиц стабильных вторичных фаз термически упрочняемого алюминиевого сплава систем легирования Al–Cu–Mg при сварке трением с перемешиванием с их повторным выделением в процессе последующего старения.

#### **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 воспроизводимость результатов.

#### **Реализация результатов работы.**

Результаты диссертационной работы использованы при разработке технологических процессов сварки трением с перемешиванием изделий из деформированных алюминиевых сплавов.

Результаты работы были внедрены в учебно-образовательный процесс подготовки бакалавров и магистров по направлениям 22.03.01 и 22.04.01 "Материаловедение и технологии материалов".

#### **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 четырех научно-практических конференциях, в том числе: Международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» (г. Томск, 2015); Международной конференции с элементами научной школы для молодежи «Физическое материаловедение» (г. Тольятти, 2016); Международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» (г. Томск, 2017).

**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 8 научных работах в рецензируемых научных журналах, сборниках и трудах конференций, из них 7 статей, входящих в перечень журналов из списка ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 154 наименований, 2-х приложений, всего 177 страниц машинописного текста, в том числе 63 рисунка и 50 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 результатов, описаны методология и методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, представлена структура диссертации.

**В главе 1** представлен аналитический обзор научной литературы по теме диссертации. Рассмотрены особенности структуры и свойств сварных соединений алюминиевых сплавов, выполненных сваркой трением с перемешиванием. Представлен обзор текущего состояния исследований по влиянию основных параметров режима сварки трением с перемешиванием на средний размер зерен в ядре шва. На основании проведенного анализа сформулирована цель работы и поставлены задачи исследования.

**В главе 2** представлены характеристика объектов и методы исследования. В качестве объектов исследования служили листы толщиной 5 мм из сплавов систем легирования Al–Cu–Mg и Al–Mg–Mn. Стыковые сварные соединения из листовых полуфабрикатов получали на установках ЗАО "Чебоксарское предприятие "Сеспель" и на опытной установке, созданной на базе фрезерного станка с числовым программным управлением. Химический состав исследуемых сплавов представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав исследуемых алюминиевых сплавов

Массовая доля элементов, %									
Al	Mg	Mn	Be	Ti	Cu	Zn	Cr	Fe + Si	Сумма прочих примесей
Сплав системы Al–Cu–Mg									
Осн.	2,05	0,50	0,002	0,08	5,46	0,01	0,01	0,18	0,15
Сплав системы Al–Mg–Mn									
Осн.	5,62	0,74	0,002	0,03	0,07	0,65	0,07	0,10	0,13

При этом часть образцов сваривались на воздухе, а другая часть – при погружении заготовок и рабочего инструмента в ванну с водой. Режимы сварки образцов на воздухе и в воде представлены в таблице 2. Кроме того, были сварены образцы с охлаждением сварного соединения путем распыления водовоздушной смеси из специальных сопел.

Структурные исследования сварных соединений были направлены на выявление и объяснение закономерностей процесса структурообразования, которые реализуются при сварке трением с перемешиванием, а также на выявление внутренних дефектов соединений и механизма их разрушения при испытаниях.

Таблица 2 – Параметры режима сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов

Среда СТП	Частота вращения инструмента, об/мин	Скорость сварки, мм/мин	Угол наклона инструмента в плоскости стыка (против часовой стрелки), град	Усилие прижатия буртика инструмента к поверхности деталей, кН
Воздух	550–750	175–275	3	1,5–1,8
Вода	750–850	120–220	3	1,5–1,8



Качественный и количественный анализ микроструктуры производили на металлографическом инвертированном микроскопе Axio Observer. Исследование структуры методом EBSD-анализа проводили на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO-50 с вольфрамовым термокатодом, оснащенный детектором обратно рассеянных электронов Nordlys (Oxford Instruments), при ускоряющем напряжении 30 кВ.

Тонкую структуру сварных соединений и элементный анализ определяли с помощью сканирующего электронного микроскопа Philips SEM 515 с энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором «Genesis». Фрактографические исследования поверхности разрушения образцов после испытаний на растяжение выполнены на электронном сканирующем микроскопе MiniSEM (Ю.Корея). Съемка производилась в режиме вторичных электронов при увеличениях  $\times 50$ ,  $\times 100$ ,  $\times 200$  и  $\times 500$ .

Испытания сварных соединений на статическое растяжение и статический изгиб проводили на испытательной машине LFM-400 при комнатной температуре. Образцы для испытаний, вырезанные поперек сварного соединения с расположением сварного шва по середине рабочей части образцов, соответствовали требованиям ГОСТ 6996–66.

Распределение микротвердости в различных зонах сварных соединений определяли с помощью микротвердомера ПМТ-3М.

**В третьей главе** приведены результаты изучения особенностей структурных превращений деформируемых алюминиевых сплавов легирования Al–Cu–Mg и Al–Mg–Mn, происходящих в металле шва в процессе сварки трением с перемешиванием. Установлено, что при сварке пластин алюминиевого сплава системы Al–Mg–Mn в ядре шва формируется слоистая мелкозернистая структура с размером зерен 4,5–6,2 мкм (рисунок 1). Границы зерен в разной степени декорированы выделениями твердых частиц  $Al_3Mg_2$ .

Для сплава системы Al–Cu–Mg в зоне перемешивания формируется мелкозернистая структура со средним размером зерна  $9,5 \pm 1,6$  мкм. Наблюдается формирование мелких равноосных рекристаллизованных зерен. При этом происходит уменьшение среднего размера частиц стабильных вторичных фаз с 1,98 до 0,94 мкм. В тоже время доля частиц стабильных вторичных фаз в зоне перемешивания составляет 7,13% против 3,44% для основного металла.

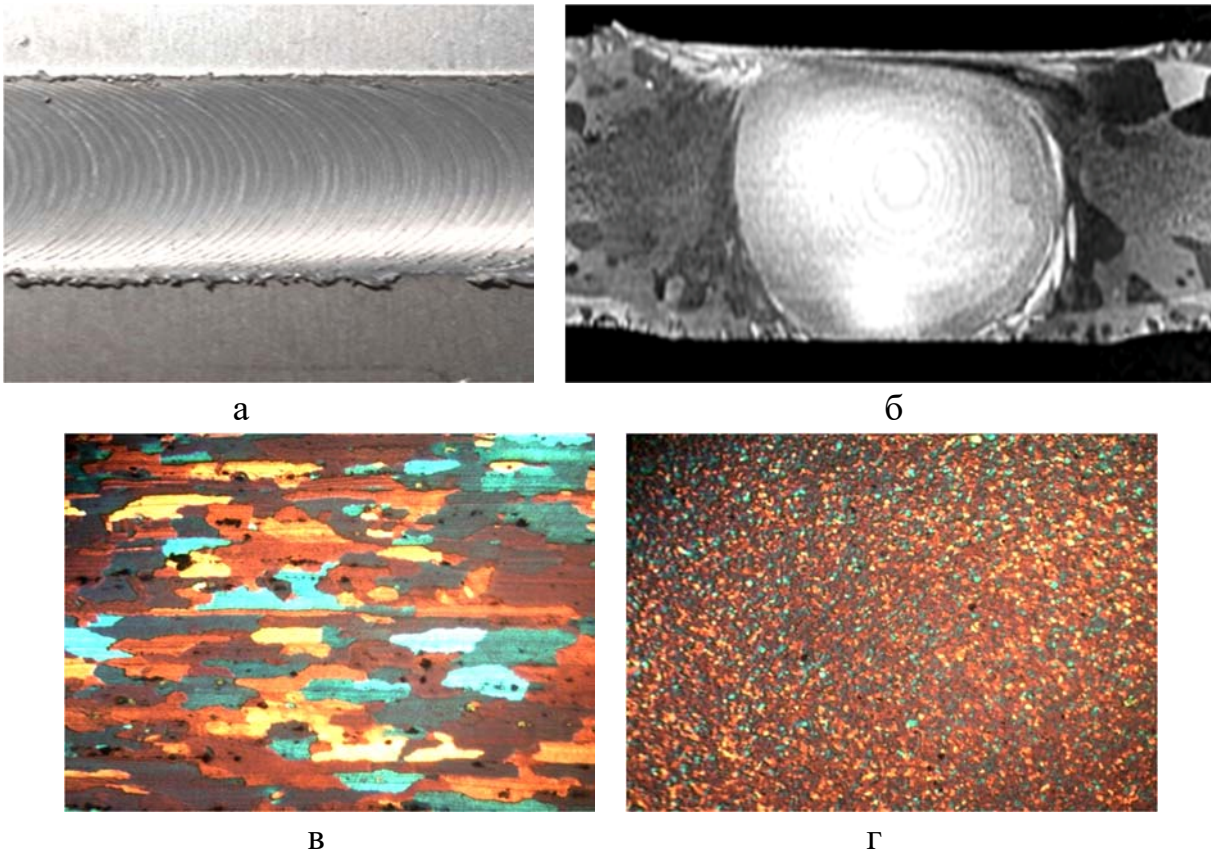
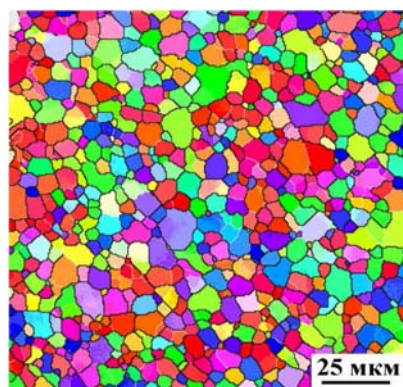


Рисунок 1 – Структура сварного соединения сплава системы Al–Mg–Mn, полученного способом сварки трением с перемешиванием: а – общий вид сварного шва; б – макроструктура соединения (x8); в – микроструктура исходного металла (x200); г – микроструктура ядра сварного шва (x200)

Для определения угла разориентировки зерен в этой зоне сварного шва применили метод EBSD анализа (рисунок 2). Из обратной полюсной фигуры с нанесенными большеугловыми и малоугловыми границами видно, что преобладают большеугловые границы, что характерно для рекристаллизованных структур (рисунок 2, а). Распределение границ по углам разориентации (рисунок 2, б) свидетельствует о том, что характер распределения близок к случайному распределению углов разориентировки границ.

Это также характерно для структур, в которых прошла рекристаллизация. Формирование такой структуры можно объяснить интенсивным термомеханическим воздействием при трении вращающегося рабочего инструмента и реализацией при этих условиях динамической рекристаллизации.



а



Рисунок 2 – Обратная полюсная фигура с нанесенными большеугловыми и малоугловыми границами (а), распределение по углам разориентировки (б)

Совокупность полученных данных позволяет сделать вывод о том, что в процессе сварки трением с перемешиванием имеет место динамическая рекристаллизация исходной структуры, заключающаяся в стадийном переходе от крупнозернистой структуры к мелкозернистой с постепенным увеличением угла разориентировки границ субзерен и превращением их в ядре сварного шва в равноосные зерна с большеугловыми границами.

Для выявления оптимального режима сварки было проведено исследование влияния параметров СТП на результирующий термический цикл. Измерения температуры в зоне перемешивания сплава системы Al–Mg–Mn проводились с помощью термопары. Расчётная толщина слоя материала пластины между пином и термопарой составляла не более 100 мкм. Такое положение позволяло измерять температуру максимально близко к зоне перемешивания без опасности разрушения термопары.

Было установлено, что повышение частоты вращения инструмента сопровождалось ростом температуры. Так при скорости сварки 225 мм/мин увеличение частоты вращения рабочего инструмента приводило к повышению температуры нагрева металла в зоне перемешивания с 340 до 430 °С. При этом длительность пребывания металла выше температуры 150 °С для всех исследованных частот вращения инструмента в диапазоне 550–750 об/мин составляла 22–24 с.

С другой стороны, было также установлено, что длительность термического цикла СТП сокращалась с ростом скорости сварки. Например, увеличение скорости сварки со 175 до 275 мм/мин при частоте вращения рабочего инструмента 750 об/мин приводило к снижению максимальной температуры нагрева металла в зоне перемешивания с 375 до 260 °С соответственно. Длительность пребывания металла шва выше температуры 150 °С уменьшалась с 18–20 с (скорость сварки 175 мм/мин) до 6–7 с (скорость сварки 275 мм/мин). Исходя из этого было предположено, что данный эффект будет способствовать подавлению процесса роста зерен в зоне перемешивания.

Была определена взаимосвязь между механическими свойствами сварных соединений сплавов систем Al–Mg–Mn и Al–Cu–Mg и основными параметрами режима сварки трением с перемешиванием (таблица 3).

Таблица 3 – Влияние основных параметров режима сварки трением с перемешиванием на механические свойства сплавов систем Al–Mg–Mn и Al–Cu–Mg

Сплав	Параметры режима СТП		Средний размер зерна в шве $d$ , мкм	Временное сопротивление соединения $\sigma_b$ , МПа	Коэффициент прочности $K$	Временное сопротивление металла шва $\sigma_b$ , МПа	Угол изгиба $\alpha$ , град.
	$\omega$ , об/мин	$V_{св}$ , мм/мин					
Al–Cu–Mg	550	175	9,5±1,1	351	0,76	368	100
	750	275	7,7±1,3	378	0,81	392	115
Al–Mg–Mn	550	175	6,2±1,5	342	0,95	360	180
	750	275	4,5±0,9	355	0,99	378	180

Результаты экспериментов показали, что использование режимов сварки трением с перемешиванием, характеризующихся наибольшей частотой вращения инструмента и наибольшей скоростью сварки, позволяют получить в зоне перемешивания исследуемых сплавов наименьший средний размер зерна и наиболее высокие механические свойства соединений. Следует отметить, что при испытаниях сварных соединений их разрушение происходило по зоне термомеханического воздействия со стороны отхода инструмента.

Следует особенно отметить, что временное сопротивление металла зоны перемешивания (металла шва) превосходит временное сопротивление основного металла для обоих исследуемых сплавов. Такой результат может быть объяснен только с позиций влияния сформированной при сварке в этой части шва однородной бездефектной структуры с малым размером зерна.

Результаты сравнительных испытаний сварных соединений сплавов систем Al–Mg–Mn и Al–Cu–Mg, выполненных автоматической аргодуговой сваркой и сваркой трением с перемешиванием приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Механические свойства сварных соединений сплавов систем Al–Mg–Mn и Al–Cu–Mg, выполненных автоматической аргодуговой сваркой и сваркой трением с перемешиванием

Сплав	Вид сварки	Временное сопротивление соединения $\sigma_b$ , МПа	Коэффициент прочности K	Временное сопротивление металла шва $\sigma_b$ , МПа	Угол изгиба $\alpha$ , град.	Зона разрушения
Al–Cu–Mg	ААрДС	355	0,76	287	24	ЗТВ
	СТП	378	0,81	392	115	ЗТМВ
Al–Mg–Mn	ААрДС	349	0,94	275	155	ЗТВ
	СТП	355	0,99	378	180	ЗТМВ

В результате проведенных испытаний можно отметить, что для исследуемых сплавов сварные соединения, полученные сваркой трением с перемешиванием, превосходят по значениям механических характеристик соединения, выполненные автоматической аргодуговой сваркой.

В главе 4 приведены результаты исследования влияния технологии охлаждения сварного соединения в процессе сварки на средний размер зерна в зоне перемешивания и значения механических свойств. Для повышения скорости охлаждения сварного соединения рабочий инструмент и приспособление со свариваемыми заготовками погружались в ванну с проточной водой (рисунок 3, а). В процессе сварки из-за разогрева металла в зоне формирования шва и рабочего инструмента до 380–430 °С над зоной формирования соединения возникает паровой купол (рисунок 3, б). Для интенсификации охлаждения соединения в зону купола направлялись струи холодной воды под повышенным давлением.

Необходимо отметить, что при одинаковом значении скорости сварки при сварке с погружением заготовок в воду частоту вращения рабочего инструмента увеличивали до 900 об/мин. Внешний вид швов сплава Al–Cu–Mg, полученных при сварке на воздухе и в воде приведены на рисунке 4.



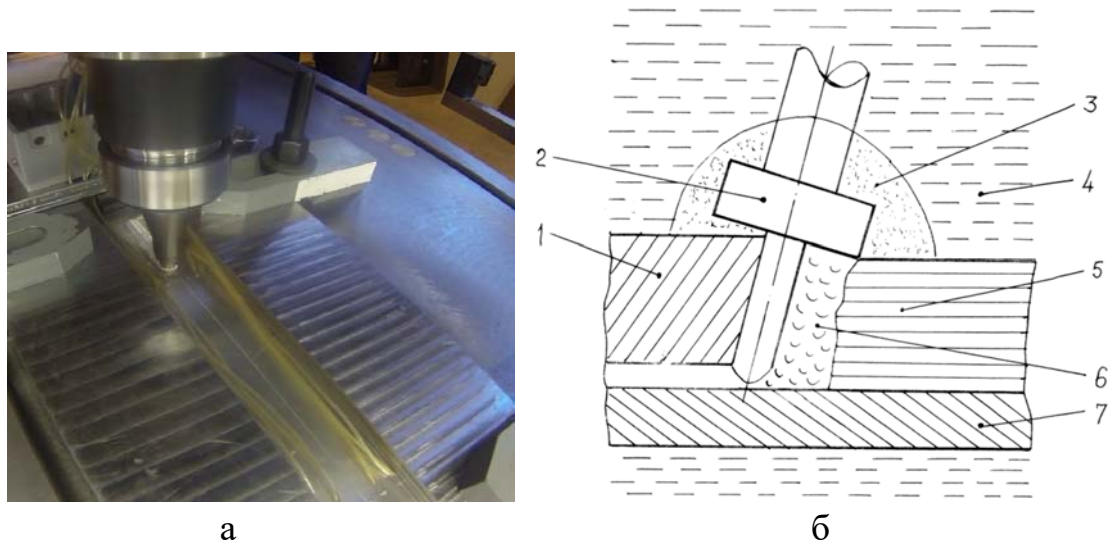


Рисунок 3 – СТП алюминиевых сплавов систем Al–Mg–Mn и Al–Cu–Mg при погружении заготовок и инструмента в ванну с водой (а) и схема формирования соединения (б):

1 – свариваемые заготовки; 2 – рабочий инструмент; 3 – паровой купол; 4 – вода; 5 – сварной шов; 6 – пластифицированный металл; 7 – подкладка

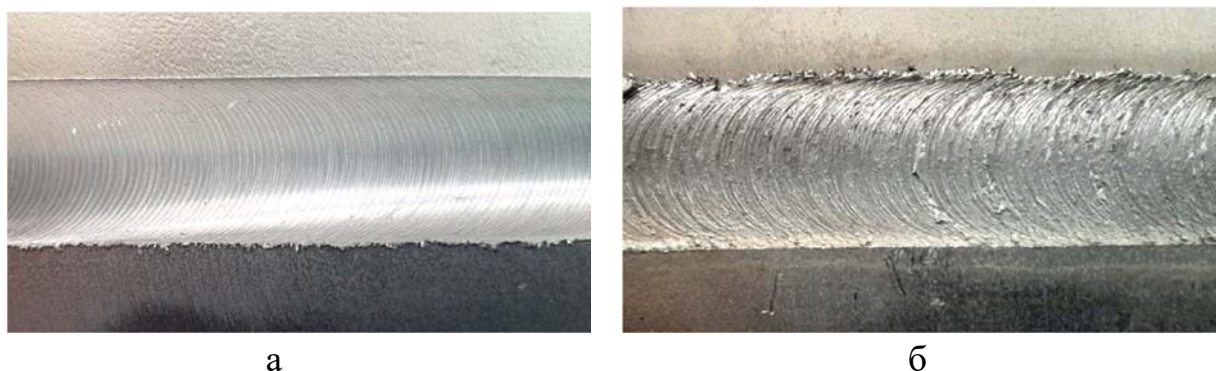


Рисунок 4 – Внешний вид швов сплава Al–Cu–Mg, выполненных СТП на воздухе (а) и в воде (б)

Можно отметить, что при сварке в воде наблюдается более шероховатая поверхность шва. Измерение шероховатости поверхности шва на профилометре показали, что при сварке сплава Al–Cu–Mg на воздухе величина Rz составила 33–45 мкм. В тоже время при сварке с погружением заготовок и рабочего инструмента в воду наблюдалось возрастание величины Rz до 70–140 мкм.

В таблице 5 приведены результаты механических испытаний сварных соединений сплава Al–Cu–Mg, выполненных СТП. Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что временное сопротивление сварного соединения сплава при использовании принудительного охлаждения в воде остается примерно на уровне соединений, полученных СТП на воздухе. Это также подтверждается значением коэффициента прочности соединения, который находится на уровне 0,79–0,81.

Таблица 5 – Механические свойства сварных соединений листов сплава Al–Cu–Mg, полученных СТП (испытания сварных соединений 55–60 дней после сварки)

Вариант выполнения СТП	Механические свойства сварных соединений				Зона разрушения соединения при испытаниях
	Временное сопротивление соединения $\sigma_b$ , МПа	Коэффициент прочности К	Временное сопротивление металла шва $\sigma_b$ , МПа	Угол изгиба $\alpha$ , град.	
На воздухе	<u>335–384</u> 358	0,78–0,79	<u>368–382</u> 377	<u>100–115</u> 106	По ЗТМВ со стороны отхода инструмента (при испытании сварного соединения)
В воде	<u>351–378</u> 365	0,80–0,81	<u>378–388</u> 384	<u>90–105</u> 96	

Примечание: диаметр оправки для определения угла изгиба равен двум толщинам образца, т.е. 10 мм.

Сварка с охлаждением шва в воде позволила несколько повысить временное сопротивление металла шва, хотя при этом значение угла изгиба снизились со 106 до 96°. Разрушение сварных соединений при испытаниях на растяжение как в случае сварки в воде, так и в случае сварки на воздухе проходило по зоне термомеханического воздействия со стороны отхода рабочего инструмента.

В таблице 6 приведены результаты замеров микротвердости в различных структурных зонах сварного соединения.

Таблица 6 – Значения микротвердости в различных структурных зонах соединения листов сплава Al–Cu–Mg

Характеристика	СТП на воздухе				СТП в воде			
	Основной металл	ЗТВ	ЗТМВ	ЗП	Основной металл	ЗТВ	ЗТМВ	ЗП
Микротвердость (при Р = 0,5 Н)	85–87	74–75	84–86	105–109	85–87	78–80	96–100	120–124
Ширина структурных зон, мм	–	2,5–3,2	1,2–1,6	5,5–5,8	–	1,2–1,5	1,1–1,3	5,5–6,1

Сравнение данных приведенных в таблице 6 показывает, что при сварке в воде твердость во всех зонах сварного шва выше чем при сварке на воздухе.

Наиболее высокие значения микротвердости получены в зоне перемешивания (ЗП), при этом следует отметить, что при сварке в воде

значения микротвердости составляют 120–124 единицы, что примерно на 12–13% превышает значение микротвердости ЗП шва при СТП на воздухе. Для обоих вариантов сварки повышенная твердость металла ЗП обусловлена формированием дисперсной равноосной рекристаллизованной зеренной структуры.

Снижение твердости в ЗТВ является следствием процессов фазовых превращений при нагреве сплава Al–Cu–Mg. Изменение условий охлаждения сварного соединения при переходе от СТП на воздухе к сварке в воде практически не сказывается на ширине зоны перемешивания и ЗТМВ, а вот ширина зоны термического влияния сокращается практически в 2 раза.

В таблице 7 приведены данные по размеру зерна в различных зонах сварного соединения при ТП в воде и на воздухе. Размер зерна в основном металле составляет  $28 \pm 5$  мкм. В ЗТВ в обоих случаях сохраняется почти неизменная зеренная структура основного металла.

Таблица 7 – Средние размеры зерна при СТП образцов сплава Al–Cu–Mg на воздухе и в воде (мкм)

Образец	ОМ	ЗТВ	ЗТМВ	ЗП
СТП на воздухе	$28 \pm 5$	$31,7 \pm 4,2$	$6,8 \pm 2,1$	$9,5 \pm 1,6$
СТП в воде	$28 \pm 5$	$30,5 \pm 3,6$	$5,0 \pm 1,3$	$3,2 \pm 1,7$

Переход от основного металла к зоне перемешивания (ЗП) характеризуется сильно деформированной структурой в зоне термомеханического воздействия (ЗТМВ). Удлиненные зерна металла образуют зону течения вокруг мелкозернистой зоны шва (ЗП). Несмотря на элементы пластической деформации в зоне термомеханического воздействия рекристаллизация не происходит. Кроме того, угол деформации вытянутых зерен вблизи граничной области после сварки с принудительным охлаждением выше, чем в остальных случаях: зерна расположены почти вертикально к поверхности сварки.

Анализ микроструктуры металла шва (ЗП) показал, что как при сварке на воздухе, так и при сварке в воде наблюдается формирование мелких равноосных рекристаллизованных зерен (рисунок 5). Применение принудительного охлаждения водой при сварке трением с перемешиванием листов сплавов Al–Mg–Mn и Al–Cu–Mg способствует фиксации более мелкого размера зерен в зоне перемешивания по сравнению со сваркой на воздухе. Для сплава Al–Cu–Mg достигается уменьшение размера зерна с 9,5 до 3,2 мкм.



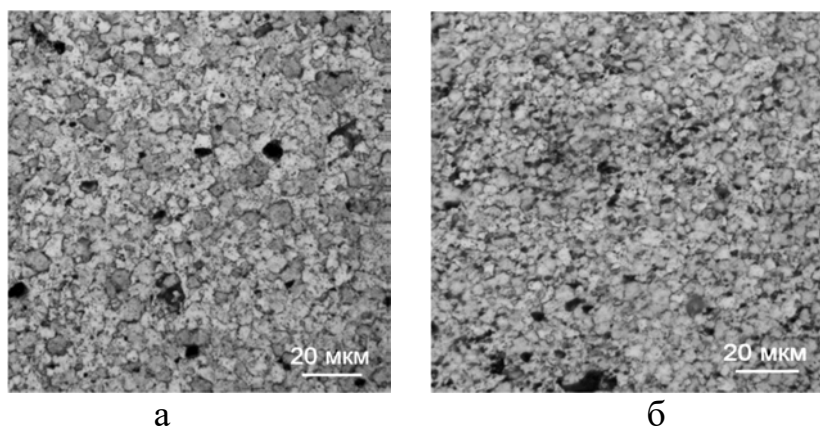


Рисунок 5 –Микроструктура зоны перемешивания при сварке сплава системы Al–Cu–Mg на воздухе (а) и в воде (б)

Скорость охлаждения металла сварного шва при СТП может быть существенно повышена в том случае, если устранить влияние парогазового купола вокруг зоны перемешивания при погружении деталей и инструмента в ванну с водой. Это достигается использованием охлаждения шва направленными воздушно-водяными струями, как показано на рисунке 6.

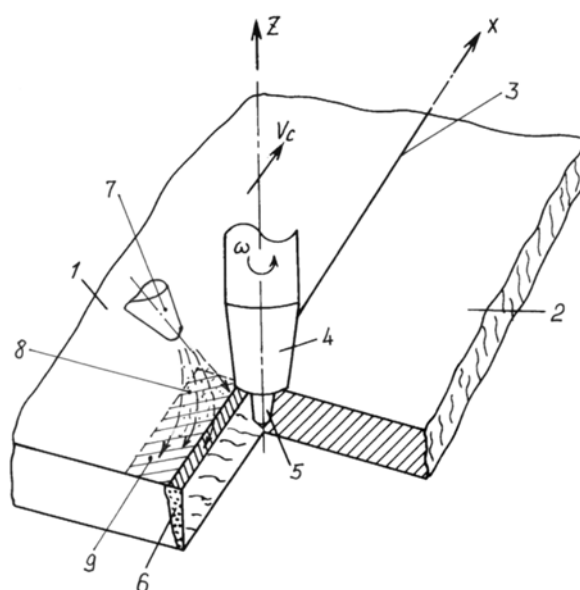


Рисунок 6 – Схема СТП алюминиевых сплавов с охлаждением металла шва направленными воздушно-водяными струями:

1, 2 – свариваемые заготовки; 3 – стык заготовок; 4 – рабочий инструмент; 5 – стержень инструмента; 6 – сварной шов; 7 – сопло; 8 – воздушно-водяная струя; 9 – область охлаждения шва

В рамках проведенных исследований помимо изучения влияния технологии охлаждения на средний размер зерна в металле шва, было проанализировано влияние сопутствующего подогрева на изучаемую характеристику структуры шва. Сопутствующий подогрев свариваемой заготовки обеспечивался за счет подогрева фиксирующей заготовки

приспособления от вмонтированного термоэлектрического нагревателя. На рисунке 7 приведено влияние сопутствующего подогрева и охлаждения на средний размер зерна в металле шва.

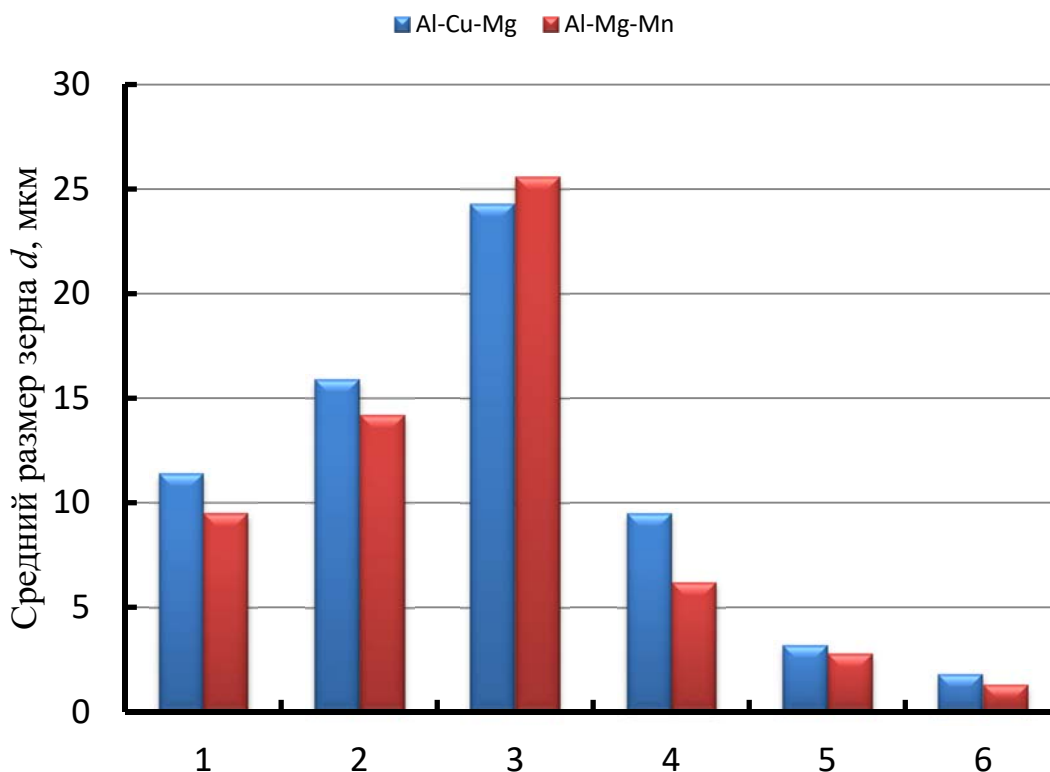


Рисунок 7 – Влияние сопутствующего подогрева и технологии охлаждения металла шва на средний размер зерна  $d$  в зоне перемешивания:  
1 – сопутствующий подогрев до 100 °С; 2 – сопутствующий подогрев до 150 °С; 3 – 1 – сопутствующий подогрев до 200 °С; 4 – СТП на воздухе; 5 – СТП в ванне с водой; 6 – СТП с охлаждением шва воздушно-водяными струями

Из анализа полученных результатов можно заключить, что применение сопутствующего подогрева вызывает интенсивный рост среднего размера зерна в шве за счет более продолжительного времени пребывания металла шва в области температур, при которых проходит процесс рекристаллизации. Наименьший средний размер зерен в шве достигается при СТП в ванне с водой, а также при охлаждении шва направленными воздушно-водяными струями. При этом разница в размере зерна в шве между исследуемыми сплавами систем Al–Mg–Mn и Al–Cu–Mg практически полностью исчезает.

**В пятой главе** приведены результаты исследований влияния технологии охлаждения шва при СТП на коррозионную стойкость сварных соединений исследуемых сплавов.

Скорость охлаждения различных зон сварного соединения алюминиевых сплавов, помимо механических свойств, оказывает существенное влияние на сопротивление сварных соединений коррозии. Результаты исследования

влияния принудительного охлаждения сварного соединения на склонность сварных соединений к межкристаллитной коррозии представлены на рисунке 8.

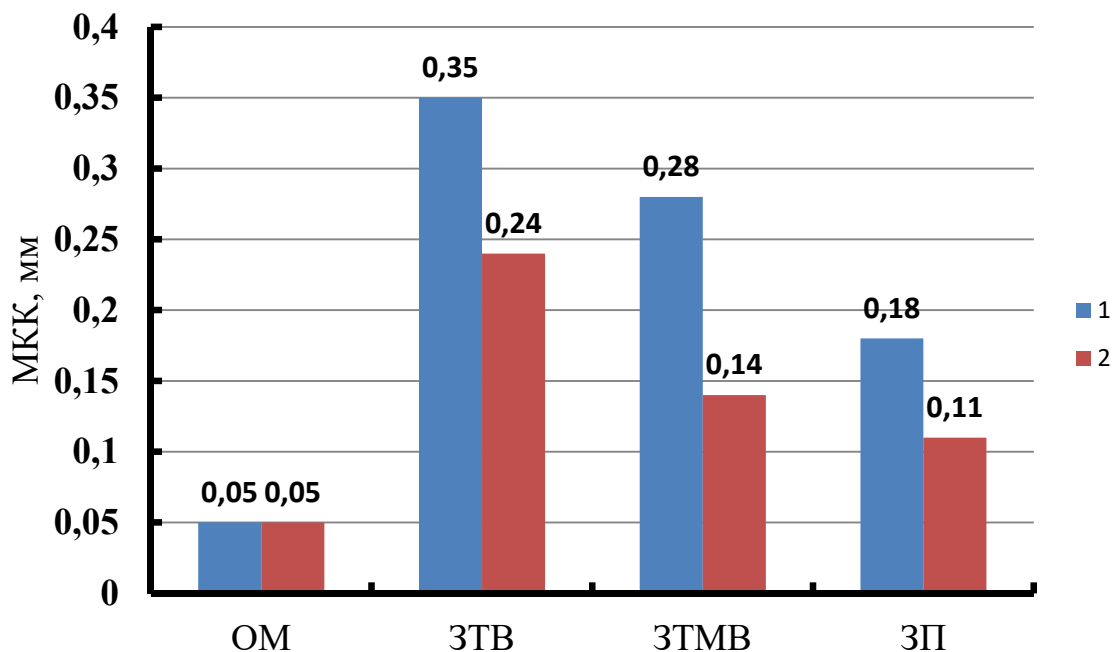


Рисунок 8 – Глубина межкристаллитной коррозии (МКК) по различным зонам сварного соединения сплава Al–Cu–Mg:

1 – СТП на воздухе; 2 – СТП с охлаждением шва воздушно-водяными струями

Благодаря более высокой скорости охлаждения при охлаждении шва воздушно-водяными струями стойкость против межкристаллитной коррозии всех зон сварного соединения (кроме основного металла) возрастает примерно в 1,4–2 раза в зависимости от структурной зоны. Наибольший прирост коррозионной стойкости наблюдался для зоны термомеханического воздействия.

На рисунке 9 показано коррозионное поражение сварного соединения при испытаниях на стойкость против МКК, располагающееся на стыке между ЗТВ и ЗТМВ. Из полученных результатов следует, что принудительное охлаждение обеспечивает более высокие скорости охлаждения на центральной зоне (ЗП) соединения. В результате в этой области формируется более мелкое зерно и достигается более высокая прочность. Помимо этого, общее увеличение скорости охлаждения сварного соединения в целом благоприятно влияет на стойкость против межкристаллитной коррозии.

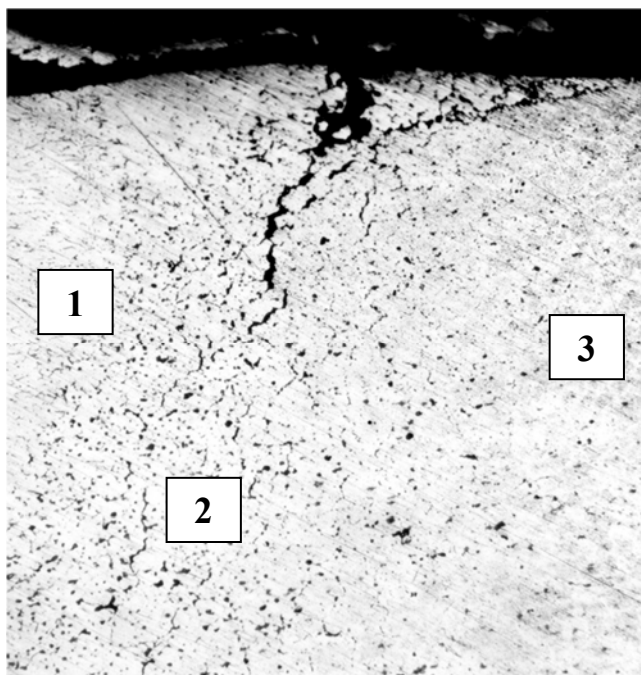


Рисунок 9 – Межкристаллическая коррозия металла зоны термического влияния соединения сплава системы Al–Cu–Mg, полученного СТП (x150): 1 – зона термомеханического воздействия; 2 – зона термического влияния; 3 – основной металл

Результаты механических испытаний показали, что подварки при выполнении основного шва автоматической аргодуговой сваркой (ААрДС) оказывают заметное влияние на прочностные и пластические свойства сварных соединений. Предел прочности сварного соединения сплава Al–Cu–Mg после второй подварки снижается примерно на 13%, а после третьей подварки – на 23%.

Показано, что с увеличением количества подварок прочность сварного соединения снижается как при комнатной, так и при повышенных температурах испытаний. В то же время прочность соединений при температурах испытаний 400 и 450 °С как с подварками, так и без них, практически одинакова.

Выполнение подварок дефектов сваркой трением с перемешиванием не оказывает существенного влияния на структуру и механические свойства соединений сплавов систем Al–Cu–Mg и Al–Mg–Mn не зависимо к количества повторных проходов.

**В заключении** обобщены основные результаты диссертационной работы.

**В приложении** приведены акты о практическом использовании результатов работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Установлено, что в сплавах систем Al–Cu–Mg и Al–Mg–Mn при сварке трением с перемешиванием пластин толщиной 5,0 мм в ядре сварного шва формируется полностью рекристаллизованная структура со средним размером зерна в диапазоне 6,2–9,8 мкм. Доля большеугловых границ в рекристаллизованной структуре составила 68–75% от общего числа межзеренных границ.

2. Показано, что с увеличением скорости сварки до 275 мм/мин при частоте вращения рабочего инструмента 750 об/мин наблюдается уменьшение среднего размера зерен в металле шва для сплава Al–Mg–Mn до 4,5 мкм, а для сплава Al–Cu–Mg до 7,7 мкм, соответственно.

3. Временное сопротивление сварных соединений для сплава Al–Cu–Mg составило 378 МПа (коэффициент прочности 0,80) и для сплава Al–Mg–Mn 355 МПа (коэффициент прочности 0,99). При этом для обоих сплавов временное сопротивление металла шва превосходит значения временного сопротивления сварного соединения. Сварные соединения при испытаниях разрушались по зоне термомеханического влияния.

4. Сварные соединения сплава Al–Cu–Mg, выполненные аргодуговой сваркой, имеют коэффициент прочности на уровне 0,67–0,74 от прочности сплава в термоупрочненном состоянии, в то время как коэффициент прочности соединений сплава Al–Mg–Mn достигает 0,95.

5. Жаропрочность сварных соединений сплава Al–Cu–Mg, выполненных СТП, при 400–450 °С сопоставима со значениями жаропрочности основного металла.

6. Дополнительное охлаждение сварного шва в процессе сварки трением с перемешиванием исследуемых сплавов способствует повышению временного сопротивления и твердости металла шва (зоны перемешивания) при сохранении области разрушения соединений в процессе испытаний – по зоне термомеханического воздействия со стороны отхода инструмента.

7. Дополнительное охлаждение сварного шва в процессе сварки трением с перемешиванием способствует снижению среднего размера зерна в зоне перемешивания до 1,8–2,1 мкм для сплавов систем Al–Cu–Mg и Al–Mg–Mn при охлаждении шва направленными воздушно-водяными струями.

8. Дополнительное охлаждение водой при сварке трением сплава системы Al–Cu–Mg приводит к существенному (1,4–2 раза) снижению склонности различных зон сварного шва к межкристаллитной коррозии и является весьма эффективным методом повышения коррозионной стойкости сварных соединений листов данного сплава.

9. Временное сопротивление и коррозионная стойкость соединений сплава Al–Cu–Mg при повышенных температурах (200 и 300 °С), выполненных

сваркой трением с перемешиванием, превосходит аналогичные показатели соединений, полученных аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом.

10. Установлено, что подварки при выполнении основного шва автоматической аргонодуговой сваркой (ААрДС) оказывают заметное влияние на прочностные и пластические свойства сварных соединений. Предел прочности сварного соединения сплава Al–Cu–Mg после второй подварки снижается примерно на 13%, а после третьей подварки – на 23%. В то же время подварки швов СТП за счет дополнительных проходов не оказывают влияния на структуру и механические свойства соединений.

11. Разработаны технологические рекомендации на процесс сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов с дополнительным охлаждением металла шва, которые используются при изготовлении сварных конструкций.

### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. **Соловьева И.В.**, Овчинников В.В., Давыденко Л.В. Влияние эксплуатационных нагревов на свойства и структуру сварных соединений алюминиевого сплава 1151Т1. // Заготовительные производства в машиностроении. 2018. – Т.16. – №6. – С.246–253.

2. **Соловьева И.В.**, Овчинников В.В., Давыденко Л.В. Механические свойства и структура сварных соединений алюминиевого сплава 1151, полученных аргонодуговой сваркой и сваркой трением с перемешиванием. // Электрометаллургия. 2018. – №6. – С.25–36.

3. **Соловьева И.В.**, Овчинников В.В., Давыденко Л.В. Влияние подварок на свойства сварных соединений сплава 1151Т1, выполненных аргонодуговой сваркой. // Заготовительные производства в машиностроении. 2018. – Т.16. – №12. – С.537–542.

4. **Соловьева И.В.**, Овчинников В.В., Давыденко Л.В. Исследование свариваемости жаропрочных алюминиевых сплавов 1150 и 1151 в условиях сварки плавлением. // Заготовительные производства в машиностроении. 2019, т.17, №7. – С.299–304.

5. Дриц А.М., Овчинников В.В., **Соловьева И.В.**, Бакшаев В.А. Свойства и структура соединений сплава 1151 системы Al–Cu–Mg, выполненных сваркой трением с перемешиванием с принудительным охлаждением шва. // Цветные металлы. – 2020– №11. – С.70–76. DOI: 10.17580/tsm.2020.11.10.

6. Овчинников В.В., Дриц А.М., **Соловьева И.В.** Влияние параметров режима сварки трением с перемешиванием на свойства и структуру соединений листов сплава 1151Т. // Заготовительные производства в машиностроении. 2021–19–№1– С.11–18 DOI: 10.36652/1684-1107-2021-19-1-11-18.

7. Дриц А.М., Овчинников В.В., **Соловьева И.В.**, Бакшаев В.А. Влияние принудительного охлаждения при сварке трением с перемешиванием на структуру и свойства соединений алюминиевого сплава 1565чН116. // Цветные металлы. – 2021– №8. – С.50–57. DOI: 10.17580/tsm.2021.08.08.