

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»

На правах рукописи

Бабарин Денис Вадимович

**Исследование доминирующих факторов,  
определяющих качество металла  
в процессе плавления и кристаллизации**

Направление подготовки  
15.04.01 «Машиностроение»

АВТОРЕФЕРАТ  
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

2017



Работа выполнена на кафедре «Машиностроение и металлургия» ФГБОУ ВО «Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета» и в филиале ПАО «Компания «Сухой» «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина».

Научный руководитель	кандидат технических наук, доцент Бахматов Павел Вячеславович, заведующий кафедрой «Машиностроение и металлургия» ФГБОУ ВО «Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета»
Научный консультант	кандидат технических наук, доцент Мазур Сергей Петрович, заместитель главного металлурга – главный сварщик филиала ПАО «Компания «Сухой» «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина»
Рецензент	кандидат технических наук, доцент Физулаков Роман Анатольевич, начальник научно – производственной лаборатории конструкционных материалов, научно производственного отдела филиала ПАО «Компания «Сухой» «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина»

Защита состоится «27» июня 2017 года в 10:00 часов на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 15.04.01 «Машиностроение» в Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете по адресу: Россия, 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27, учебный корпус 2, аудитория 221.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте <https://knastu.ru/page/1519> и на кафедре «Машиностроение и металлургия» ФГБОУ ВО «КнАГТУ».

Автореферат разослан «24» июня 2017 г.

Секретарь ГЭК

Н.О. Плетнев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы:**

При производстве элементов алюминиевого трубопровода в сварных соединениях по результатам рентгенографического анализа обнаруживаются поры. Пористость является дефектом шва, а ее допустимая размерность и объем определяется нормативно-технической документацией (ПН 1.4.1555-2000). По причине пористости с первого предъявления годными считаются всего 30...45% изготовленных швов, остальные дорабатываются. Доработка сводится к операциям вскрытия мест с порами, заварки, рентгенографическому или рентгеноскопическому контролю и, если обнаружены дефекты – доработка. Процесс доработки достаточно трудоемок и влечет за собой дополнительные материальные затраты, отвлекает основных рабочих от выпуска товарной продукции, поэтому решение проблемы повышения качества сварных соединений алюминиевых элементов трубопроводных систем является актуальной задачей современного машиностроительного производства.

### **Цель работы:**

Проведение комплексных исследований формирующих факторов, влияющих на условия порообразования сварных соединений элементов алюминиевого трубопровода, выполненных ручной аргонодуговой сваркой (сваркой плавлением).

### **Идея работы:**

Изготовление алюминиевых элементов ТПС не ограничивается операцией сварки. До и после сварки выполняются различные технологические операции, каждая из которых может вносить существенный вклад в условия порообразования. К таким операциям можно отнести: раскрой, механическая обработка кромок, травление заготовок и присадочной проволоки, сборка и прочее). Кроме перечисленного, на порообразование может влиять и качество полуфабрикатов трубы, проволоки и сварочных материалов (газ, W-электрод), режимы сварки, техника формирования швов, другие условия: влажность и температура помещения (микроклимат) и другие. Поэтому проведение комплексных исследования перечисленных факторов, как по отдельности, так и комбинаций – основная идея данной работы.

### **Задачи исследования:**

1. Определение влияния времени травления алюминиевых сплавов, являющихся конструкционными и присадочными материалами элементов ТПС, на качество поверхностного слоя и определения его оптимального значения.
2. Выявление оптимального метода определения качества подготовки поверхности основного и присадочного материала после операции травления и непосредственно перед сваркой.
3. Определение влияния временного интервала между операциями травления и сварки на величину порообразования в сварных соединениях. Определение оптимального диапазона допустимости к сварке в зависимости от марки основного металла и времени травления.
4. Исследование влияния параметров режимов сварки и ТПС ( $I_{св}$ ,  $V_{св}$ ,  $U_{д}$ , частота импульсов), техники выполнения швов на качество сварных соединений.
5. Исследование влияния операций механической обработки под сварку на качество сварных соединений.
6. Исследование влияния параметров окружающей среды и температуры аргона на качество сварных соединений.
7. Составление и разработка технологических рекомендаций, способствующих повышению качества сварных соединений алюминиевых элементов ТПС.

### **Методы исследований:**

Сварные образцы получали с применением установки для аргодуговой сварки MasterTIG 3500 с горелкой с жидкостным охлаждением, исследовались образцы из 1 алюминиевых сплавов АМг2, АМг3, АМг6, ВАЛ5, свойства и состав травящих ванн определяли на качество подготовки поверхности под сварку определяли замером электрического сопротивления мультиметром ELC-131D. Для металлографических исследований применялись микроскопы Nikon M200 и Hitachi S-3400N, пробоподготовка велась на абразивном станке марки AbrasiMet 250 (Buehler, Германия).

Оценка механических свойств сварного шва проводилась по стандартным методикам, рекомендованными ГОСТ 6996-66.

Качество сварных соединений оценивалось по требованиям ПИ 1.4.1555-2000 визуально измерительным методом и рентгенографическими исследованиями на установке FILIN-240/225.FP8.C-ARM.

### **Основные научные положения, защищаемые автором:**

1. Условия взаимодействия реактивов травления на структуру поверхности алюминиевых заготовок. Метод подготовки поверхности сварочной проволоки под сварку, включающий лазерное оплавление.

2. Методика определения качества поверхности сварочных материалов и основного металла непосредственно перед сваркой.

3. Закономерность влияния параметров режима сварки и других технологических операций на структуру и свойства сварных соединений алюминиевых ТПС.

4. Особенности ТПС кольцевых швов трубопровода из алюминиевых сплавов и критерии управления структурой и свойствами сварных соединений.

5. Технологические рекомендации, обеспечивающие качество сварных соединений алюминиевых ТПС.

Достоверность научных результатов обеспечивается корректностью постановки решаемых задач и их физической обоснованностью, большим объемом статистических и экспериментальных данных и сопоставлением результатов с данными других авторов.

### **Научная новизна положений:**

1. Впервые произведена оценка влияния времени травления основного и присадочного материала на их структуру поверхности и структуру и свойства сформированных сваркой плавления швов элементов алюминиевого трубопровода. Определены оптимальные значения времени.

2. Разработана методика оценки качества подготовки поверхности под сварку алюминиевых основного и присадочного материалов, обуславливающая отсутствие порообразования в сварных швах. Оценка основана на измерении перед сваркой поверхностного электросопротивления и связи его значения с размером окисной пленки.

На основе теоретических и экспериментальных исследований технологических операций создания элементов ТПС из алюминиевых сплавов определены доминирующие факторы, определяющие структуру и свойства сварных соединений:

– установлено, что время травления алюминиевых деталей существенно влияет на структуру поверхности, при превышении временного диапазона на поверхности растравливается окисная пленка, формируется пемзообразная структура, способствующая накоплению капиллярно-конденсированной влаги. Отсутствие спирта в подготовке поверхности под сварку не позволяет произвести обезжиривание поверхности и вызывает значительное порообразование. При не выдерживании металла в травителе окисная пленка растворяется недостаточно, она гидратирована и вызывает порообразование.

– установлено, что механическая обработка (подгонка размеров элементов ручным напильником, зачистка металлическими щетками), создает дефектный поверхностный слой и не гарантирует отсутствие окисной пленки на поверхности кромок. При анализе 3

поверхности овальных щетинок металлических щеток обнаруживаются частицы алюминия с достаточной окисной пленкой. При использовании этого инструмента с операцией очистки поверхности происходит и ее загрязнение дополнительными окислами, проникающими в приповерхностные слои.

– частота импульса сварочного тока, его значение и модуляция значительно влияют как на структуру, так и на механические свойства сварных соединений из алюминиевых сплавов, а также на порообразование. Показано, что увеличение частоты импульса (до 100 кА при сохранении прочих электрических параметров источника питания) улучшает условия формирования сварного шва: ускоряется процесс разрешения и конденсации оксидной пленки, увеличивается скорость сварки, улучшается эстетика (геометрия и внешний вид шва), снижается порообразование.

– замкнутость сварных соединений элементов ТПС обуславливает необходимость управления ТПС при формировании поворотных стыков (особенно при автоматической АрДЭС). Показано, что с учетом теплофизических свойств алюминиевых материалов энергетические параметры аргоновой дуги нужно программно изменять в сторону уменьшения от возбуждения дуги и до наложения замкового перекрытия. Определены оптимальные режимы сварки таких соединений.

#### **Личный вклад автора:**

Состоит в постановке задач исследования, в оценке доминирующих факторов, влияющих на порообразование сварных соединений, анализе литературных источников, в проведении экспериментальных исследований с последующим анализом и обработкой полученных данных, в проведении металлографических, физико-механических и др. исследований.

#### **Практическая ценность:**

1. На основании исследований влияния величины оксидной пленки на порообразование предложен метод ее оценки по электрическому сопротивлению поверхности образцов.

2. Установлено оптимальное время травления алюминиевых деталей.

3. Предложена методика подготовки кромок и сварочной проволоки под сварку путем их лазерной обработки (соответственно резки и оплавления), позволяющей устранить окисный слой.

4. Разработаны рекомендации по изготовлению элементов алюминиевых ТПС, исключая порообразование в сварных соединениях.

5. Результаты работы внедрены в учебный процесс кафедры «МиМ» в виде методических указаний проведения лабораторных работ по дисциплинам «Методика научных исследований в сварке» и «Технологические основы сварки плавлением» и используется при выполнении научно-исследовательских работ студентами.

#### **Реализация работы в промышленности:**

1. Работа выполнена в рамках хоз. Договора №86-3/14 от 21.03.2014 г. с филиалом ОАО «Компания «Сухой» КнААЗ им. Ю. А. Гагарина». В ходе разработанных рекомендаций ведется модернизация участка химической обработки, сварочные работы ведутся в отдельных от других технологических операций помещениях с контролем и организацией климатических условий (температура, влажность, запыленность) труда.

2. Некоторый объем сварочных работ переведен на автоматическую установку с управлением ТПС, позволившим увеличить процент годных с первого предъявления деталей до 80%.

Результаты работы могут быть интересны не только в рамках работы предприятий, входящих в ОАК (Объединенная Авиационная Корпорация), но и в ОСК (Объединенная Судостроительная Корпорация), холдинга «Вертолеты России», ракетно-космической корпорации «Энергия».

#### **Апробация работы:**

Материалы диссертации докладывались на ежегодных конференциях студентов и аспирантов ФГБ ОУ ВПО «КнАГТУ» (2014-2017 гг.), на международной научно-технической конференции «Проблемы и достижения в инновационных материалах и технологиях машиностроения» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2015 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Металлургия: технологии, управление, инновации и качество» (г. Новокузнецк, 2016 г.).

**Публикации:**

По теме диссертации опубликованы 2 печатных работы, монография.

**Объем и структура диссертации:**

Диссертация состоит из введения, 5-ти глав, основных выводов и рекомендаций, списка литературы. Диссертация содержит 119 стр.; 56 рис.; 21 табл.; список литературы 30 назв.

Во введении обосновывается актуальность темы применительно к производству сварных трубопроводных систем летательных аппаратов (ЛА) и приведена общая характеристика работы.

В первой главе проведен анализ литературы и статистических данных по вопросу порообразования в сварных соединениях алюминиевых сплавов, выполненных аргонодуговой сваркой неплавящимся вольфрамовым электродом.

В сварных соединениях конструкций ответственного назначения, чаще всего работающих в тяжелых условиях циклических нагрузок, как правило, эксплуатационные требования по пористости являются доминирующими над технологическими. Поэтому пористость нельзя относить к ординарному явлению и решение проблемы борьбы с порами при сварке плавлением алюминиевых и особенно титановых сплавов в последние два десятилетия были и остаются наиболее актуальными.

Большой теоретический и практический вклад в решение проблемы порообразования в условиях сварки, в том числе и при сварке цветных металлов, внесли отечественные ученые, представляющие разные научные школы и направления в изучении этой проблемы: А.А. Алов, В.К. Любавский, А.А. Ерохин, В.В. Фролов, Г.Д. Никифоров, Л.С. Сапиро, В.В. Баженов, И.К. Походня, СМ. Гуревич, Д.М. Рабкин, И.Р. Пацкевич, Г.Ф. Деев, В.Н. Замков, М.А. Абралов, В.В. Подгаецкий, И.И. Фруммин, Г.Л. Петров, Ф.Е. Третьяков, А.И. Горшков, Б.А. Калачев, Л.Я. Ищенко, В.И. Рязанцев, Е.Г. Антонов, А.Н. Хатунцев, В.И. Муравьев, Б.И. Долотов и многие их ученики. Среди зарубежных ученых необходимо выделить Д. Андреа, У. Масахира, М. Махинара, Д. Митчела, С. Ямомото и др.

Процесс порообразования относится к сложным физико-химическим явлениям, развитие которого обусловлено не только свойствами свариваемого металла, но и особенностями сварочного процесса. Природа пор коренным образом отличается от природы других дефектов, возникающих при сварке: трещин, включений, подрезов и др. Поэтому процесс порообразования и проблема борьбы с порами требуют цельного рассмотрения и глубокого изучения. Попытка решить односторонне и эмпирически привела к многообразию представлений о наиболее вероятных источниках газов, формирующих пузырьки, и механизме их возникновения.

Ключом к кардинальному решению существующей проблемы борьбы с порами при сварке плавлением цветных металлов и их сплавов является комплексное всестороннее исследование всех стадий процесса порообразования, систематизация и обобщение существующих знаний и на этой основе разработка научно обоснованных путей и технологических рекомендаций по предупреждению пористости.

Основной причиной порообразования, по данным отечественных и зарубежных исследователей является наличие водорода в зоне сварки.

Анализ выявленных дефектов. В настоящее время в цехе 4 филиала ПАО «Компания «Сухой» «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина» сложилась следующая ситуация. За последнее время выпуск годных изделий после сварки, без недопустимых дефектов (с первого

предъявления), не превышает 70 %, одновременно с этим в цеху накапливается значительное количество изделий, требующих исправления дефектов. В номенклатуре выпускаемых цехом 4 деталей присутствуют различные по форме изделия: от труб малым диаметром, до протяженных изделий плоской формы, угловые и стыковые швы. Дефекты встречаются в различных изделиях, при разной толщине основного металла, протяженности сварного шва, а также и при разных химических составах основного и присадочного материалов. Для оценки общей динамики выпуска изделий приведем сводную таблицу, в которой указаны количественные значения вновь поданных на контроль деталей, изделий после исправления дефектов и находящиеся на исправлении.

Большая часть изделий находится на территории цеха в стадии исправления дефектов. Присутствует определенный процент бракованных изделий, которые исправлению не подлежат (0,5 – 1 %).

Статистика по дефектам в сварных соединениях алюминиевых ТПС, полученных по результатам РГК показывает, что распространенные дефекты в сварных швах – поры (как скопление, так и цепочки), непровары в корне шва, трещины вдоль и поперек шва, разветвленные трещины.

Проанализировав информацию рентгенографического контроля за февраль – март 2017 года, составлена оценка частоты появления дефектов (табл. 1).

На рисунке 1 приведена гистограмма процентного соотношения дефектов сварных соединений из общего числа дефектов.

Таблица 1 – Статистика дефектов РГК

Дефект	Количество дефектов, от общего числа	
	шт.	в %
Поры:	473	59,4
отдельная скопление	235	29,5
цепочка	96	12,1
Трещины	95	11,9
Непровар	228	28,6
Всего	796	100

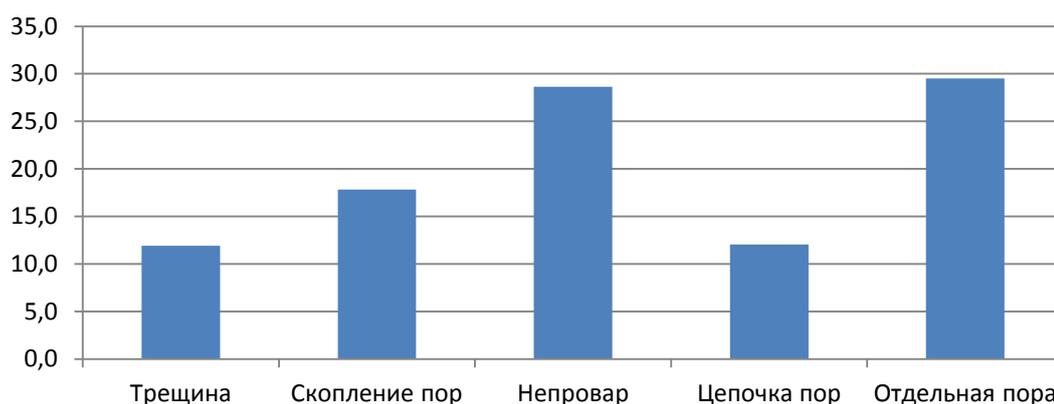


Рисунок 1 – Процентное соотношение дефектов

Цель работы: Обеспечение качества сварных соединений трубопроводов из алюминиевых сплавов АМг2М, АМг3, АМг6, ВАЛ5, получаемый при АрДЭС.

**Задачи для решения основной проблемы:**

Определение и исследование факторов, влияющих на дефекты в виде цепочек газовых пор, скоплений газовых пор, несплавлений, непровара корня шва, трещин сварных б б

соединений трубопроводов из алюминиевых сплавов АМг2М, АМг3, АМг6, ВАЛ5 при АрДЭС.

Во второй главе изложены общие вопросы методики исследования, ряд частных методик представлены в рабочих главах работы.

В условиях цеха 4 КнААЗ проволока и основной металл подвергались обработке химическим способом в щелочном растворе в следующей последовательности, согласно производственной инструкции. Сформировано четыре партии по 4 образца проволоки разной марки. Для определения кинетики процесса химической обработки операция травления велась с выдержкой в ванне 30 с (1 партия), 60 с (2 партия), 120 с (3 партия). Четвертая партия содержала образцы разных марок проволоки в исходном состоянии. Образцы проволоки взяты с одной бухты в состоянии поставки производителем, с наличием бирки. Травление основного металла проводили по той же схеме, травления сварочной проволоки. Исследования поверхности проводились через 6 часов после процесса химической обработки проволоки и основного металла. Также исследованиям подлежали образцы фланцев, подвергнутых холодному оксидированию в цехе 18 (рис. 2, а), поступающими после этого на сварку и уже сваренные с деталью, полученной литьем в цехе 22 (рис. 2, б). Эти соединения наиболее дефектные в отношении порообразования.

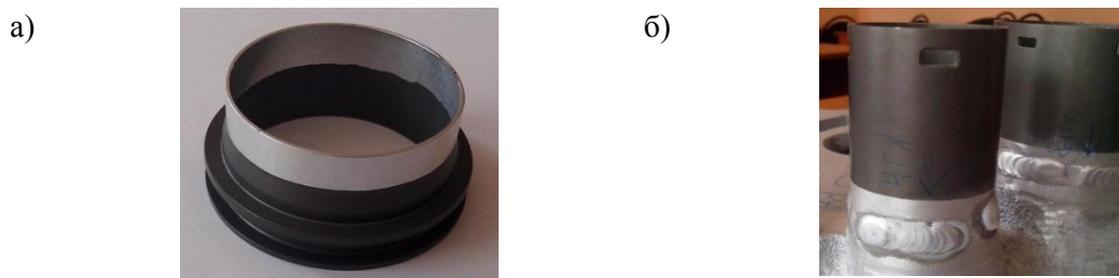


Рисунок 2 – Внешний вид анодированных деталей:  
а) – отдельная деталь; б) – сваренная деталь

Холодное анодирование производится в Ц18 в специальных ваннах (рис. 3) с серной кислотой технической 300 – 380 г/л при температуре от минус 7 °С до минус 4 °С с выдержкой 1 час. Анодирование придает поверхности повышенную износостойкость.

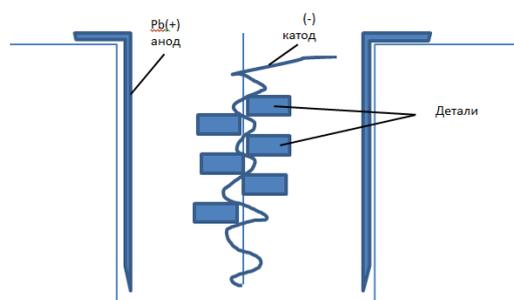


Рисунок 3 – Схема ванны анодирования

В качестве катода (-) применяется проволока Д16, спирально намотанная на трубку, в которую очень плотно установлены анодируемые элементы. В качестве анода (+) – свинцовые электроды, расположенные по бортам ванны. Детали полностью погружаются в раствор. Подготовленные под сварку кромки изолируются клеобразной смесью, которая наносится перед анодированием, имеет красный цвет для лучшего определения покрытых деталей и удаляется после анодирования легким отделением в виде ленты либо окунанием в растворитель. В состав входит эмаль и клей. Детали, по требованию цеха, могут быть предварительно подвергнуты процессу химической очистки.

Качество поверхности проволоки и основного металла оценивалось на растровом электронном микроскопе Hitachi S-3400N с использованием приставки для проведения химического анализа по поверхности исследуемого образца.

С целью исследования механизма попадания капиллярно-конденсированной влаги с поверхности химически обработанной сварочной проволоки СвАМг6 диаметром 2 мм, имеющей губкообразное строение, в сварочную ванну проведен анализ оплавленной поверхности проволоки при ручной АрДЭС. На растровом электронном микроскопе Hitachi S-3400N проведен анализ проволоки как со стороны оплавления сварочной дугой, так и с обратной стороны.

Для исследования влияния частоты импульса сварочной дуги на структуру и свойства сварных соединений элементов алюминиевых трубопроводных систем, выполненных на установке MasterTIG 3500 изготовлены 4 образца – патрубка, имеющие стыковое соединение без скоса кромок. Размеры образцов: диаметр 60 мм, толщина стенки 1,0 мм, общая длина 150 мм. Сборка и сварка проводилась по базовой технологии: соединение по ПИ 1.4.1555-85 «Сварка в среде инертных газов» С00000 без скоса кромок (табл. 2), без сварочной оснастки, сборка в сборочном приспособлении с предварительной постановкой прихваток (3 шт.) и механической обработкой кромок металлической щеткой, с гашением дуги для поворота детали, число сваренных секторов - 4, сварное соединение имело нижнее положение. Химическая подготовка деталей под сварку осуществлялась по заводской технологии.

Ориентировочные режимы сварки:  $I_{св} = 60$  А,  $U_{д} = 20 - 30$  В,  $V_{св} = 2,5$  м/ч,  $Q = 8$  л/м, время продувки до сварки 5 сек, после сварки 10 сек.

Таблица 2 – Конструктивные элементы и размеры сварных соединений по ПИ 1.4.1555-2005

Обозначение	До сварки	После сварки
С00000		

При формировании сварных швов образцов варьировалась частота импульса сварочного тока:

Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4
50 Гц	100 Гц	150 Гц	200 Гц

Сварочные материалы: электрод вольфрамовый СВИ-1, диаметр 2 мм; присадочная проволока Св-АМг3 диаметр 1,6; аргон высшей чистоты.

Сварку производил один сварщик: 5 разряд, опыт работы на участке сварки алюминиевого трубопровода – 16 лет, личный коэффициент брака – 1 %, процент деталей удовлетворительного качества с первого предъявления - 48%.

При исследовании влияния времени травления на качество сварного соединения элементов алюминиевых трубопроводных систем, выполненных ручной аргонодуговой сваркой неплавящимся вольфрамовым электродом с присадкой на установке MasterTIG 3500, изготовлены 8 образцов. Сборка и сварка проводилась по базовой технологии: сборка в сборочном приспособлении с предварительной постановкой прихваток и без механической обработкой кромок металлической щеткой, с гашением дуги для поворота детали, сварное соединение имело нижнее положение. Химическая подготовка деталей под сварку также осуществлялась по заводской технологии.

Ориентировочные режимы сварки:  $I_{св} = 66$  А,  $U_{д} = 10-14$  В,  $V_{св} = 2,5$  м/ч,  $Q = 8$  л/м, частота 200 Гц. Сварочные материалы: электрод вольфрамовый СВИ-1, диаметр 2 мм; присадочная проволока Св-АМг3 диаметр 1,6; аргон высшей чистоты.

Полученные образцы подвергнуты визуально-измерительному (измерялись ширина шва и высота усиления при помощи металлической линейки и универсального шаблона сварщика УШС-3) и рентгеноскопическому контролю – использовался рентгенотелевизионный комплекс FILIN-240/225.FP8.C-ARM. Размерность и отклонения геометрических параметров шва и внутренних дефектов сварных соединений оценивали по ПИ 1.4.1555-85 «Сварка в среде инертных газов». Сварное соединение С00000. Для изготовления образцов

для оценки механических свойств сварных соединений использовался настольный абразивный станок марки AbrasiMet 250 (Buehler, Германия).

Испытания образцов на статическое растяжение проводили на испытательной машине Instron 3382 в соответствии с требованиями ГОСТ 6996-66 на образцах типа XII с размерами  $150 \times 10 \times 1$  мм.

В третьей главе исследовано влияние технологических операций подготовки сварочных материалов и основного металла под сварку.

С целью исследования поверхности сварочной проволоки, подвергавшейся химической обработке при различном времени выдержки в ванне травления, проводилось изучение поверхности образцов проволоки при увеличении  $\times 100$  и  $\times 1000$  (см. табл. 3, показано на примере Св-АМг6).

Для исследования влияния качества подготовки свариваемых и сварочных материалов, выполнения требований техники и технологии создания сварных соединений к качеству швов выбраны четыре марки алюминиевой сварочной проволоки диаметром 2 мм: Св-АМг3, Св-АМг6, Св-АК5 и Св-АМг6 полированная. Согласно сертификатам поставщика (ОАО «ВИЛС» г. Москва) проволока поставляется в бухте по ГОСТ 7871-75 тянутая, без термической и химической обработки в нагартованном состоянии. Также нужно особо отметить требования стандарта, предъявляемые к качеству поставляемой проволоки и методам контроля: проволока должна иметь чистую поверхность, без плен, трещин, закатов, вмятин, расслоений и резких перегибов. На поверхности проволоки допускаются местные дефекты: цвета побежалости, темные и белые пятна, не выводящие проволоку при контрольной зачистке за предельные отклонения по диаметру. Проверке размеров и качества поверхности проволоки подвергается каждая катушка, бухта или пучок партии. Химический состав проверяют химическим или спектральным методом у 3 %, но не менее двух катушек, бухт или пучков партии. Для проверки механических свойств отбирают 2%, но не менее двух катушек, определяется временное сопротивление разрыву. Качество поверхности проволоки определяют визуально, без применения увеличительных приборов. В качестве образцов основного металла было взято две марки: АМг2м и АМг3м, образцы вырезаны из одного участка соответствующих марке труб (толщина 1,2 мм) по ОСТ 1.90038-88 «Трубы авиационные из алюминиевых сплавов. Технические условия».

Анализ изображений микроструктуры поверхности образцов показал: поверхность исходной проволоки имеет высокую шероховатость, на поверхности присутствуют места закатов и продольные линии, возникшие при волочении проволоки; микровмятины, микротрещины протяженностью до 50 мкм, шириной до 15 мкм и достаточно глубокие. На поверхности полированной проволоки находятся разветвленные трещины шириной до 0,5 мкм и протяженностью 50 мкм и более.

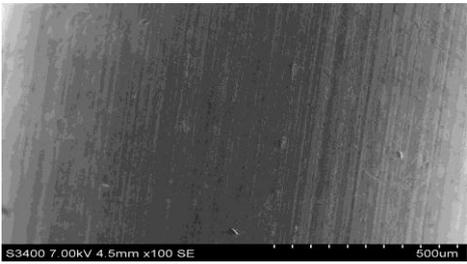
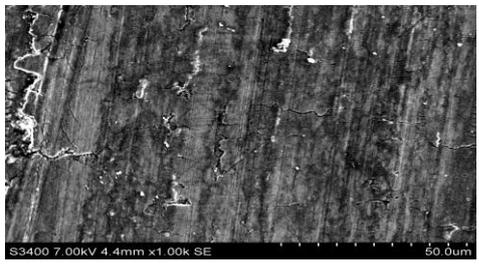
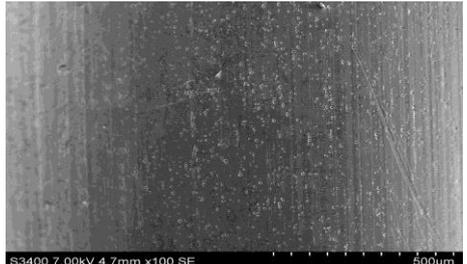
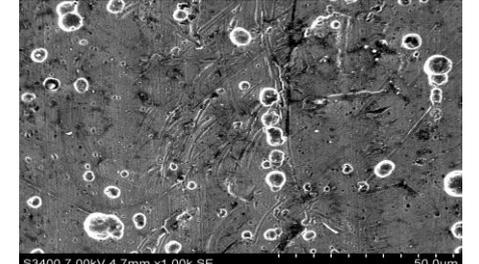
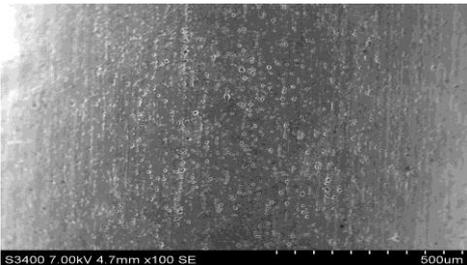
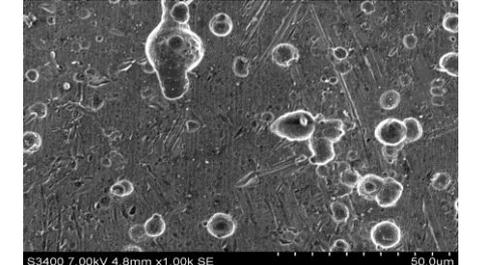
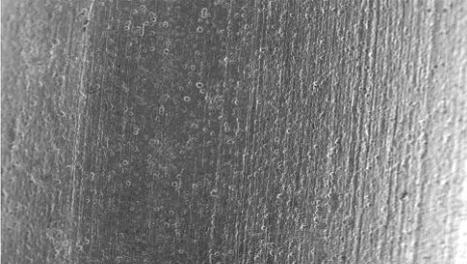
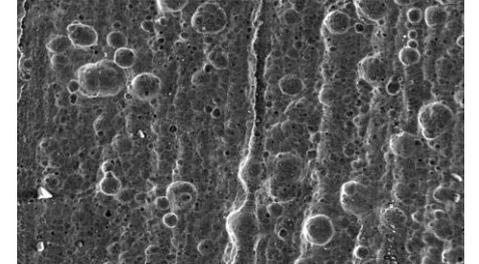
При выдержке в ванне травления 30 секунд видны значительные различия в состоянии поверхности проволоки. Происходит вытравливание поверхностного слоя, что приводит к выравниванию дефектов, сокращается количество поверхностных дефектов, шероховатость уменьшается, появляются волнообразные каналы, направленные вдоль линий волочения.

Выдержка в ванне травления до 60 секунд в целом улучшает поверхность проволоки относительно выдержки в 30 секунд. Значительно уменьшается шероховатость, увеличивается интервал чередования волнообразных каналов, количество дефектов сокращается.

Поверхность образцов значительно изменилась при выдержке в ванне травления 120 секунд, образуется пемзообразная поверхность. Отчетливо видны округлые лункообразные места вытравливания и глубокие точечные вытравливания структурных составляющих. Таким образом, при 2 минутах выдержки в ванне травления вытравливается уже основной металл, и на поверхности образуется новая оксидная пленка, совершенно другая по строению, чем та, которая получается при производстве проволоки.

Результаты исследований показали, что наилучшее время травления, как для обычной, так и для полированной проволоки составляет 45 – 75 сек. Влияние образования пемзообразной поверхности после травления 120 сек. на порообразование сварных швов требует дальнейших исследований. Кроме того необходимо тщательно контролировать качество поверхности проволоки после травления для отклонения вероятности перетравливания по наличию пемзообразности. Поскольку состав ванны травления со временем может меняться, необходим периодический контроль не только состава ванны, но и качества травления проволоки. Это можно осуществлять с помощью оптического микроскопа.

Таблица 3 – Поверхность проволоки Св-АМг6

Время травления, с	×100	×1000
полированная, состояние поставки		
30		
60		
120		

Толщину оксидной пленки можно контролировать замером электрического сопротивления. Для установления связи электрического сопротивления с реальным строением оксидной пленки необходимо провести дополнительные исследования. Исследования микроструктуры поверхности основного металла (труба АМг2м и АМг3м) показывают сходные результаты влияния операции травления, как трубы, так и проволоки (рис. 5-20 и рис. 28-35) и, так же как и в случае травления присадочной проволоки, оптимальным режимом подготовки основного металла (АМг5, АМг3, АМг6 и ВАЛ5) травлением является промежуток 45 – 75 сек.

При сварке деталей имеющих холодное анодирование существенно возрастает пористость сварных соединений, аналогично происходит и при сварке деталей, полученных методом литья.

Как видно из рис. 4, поверхность образца изолированного от анодирования имеет дефекты механической обработки в виде рыхлот (вырывов), ориентированных преимущественно в поперечном направлении. В этом же направлении имеются чередующиеся с

шагом 100 мкм сглаживающие (затирающие) вышеуказанные дефекты линии (ширина 45 мкм), оставленные режущим инструментом при чистовой механической обработке.

Представленное на рис. 5 распределение легирующих элементов, бесспорно, отражает исключительно качественную картину, так как определить конкретное количество элемента в одной из частей бинарной системы, которой является переход от анодированного слоя к основному металлу, не представляется возможным. Тем не менее, по нему можно судить о плотности и дисперсности этого распределения. Анализ химического состава поверхности данного образца (табл. 4) показал присутствие серы (свыше 6%), которая при превышении допустимых пределов может привести к уменьшению жидкотекучести и хладноломкости свариваемого материала, и появлению непроваров и трещин в сварном шве.

Поверхность сварного образца с анодированным покрытием отличается от предыдущего: его подготовили под сварку, используя механическую обработку шарошкой (при выборке дефектов) и металлической щеткой. И как видно из рис. 6, этот метод не эффективен для устранения предшествующих ему дефектов (закатов, вырывов, пор), так как исходные дефекты дополнились дефектами механической обработки.

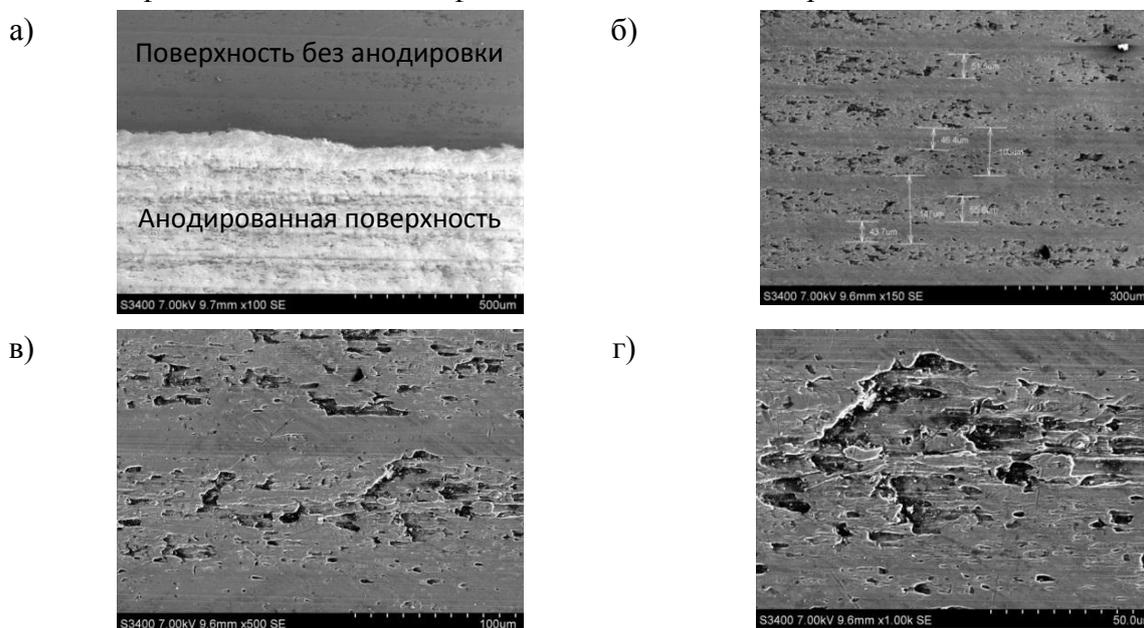


Рисунок 4 – Поверхность фланца после частичного анодирования:  
а) – граница анодированной и неанодированной поверхностей 100×;  
б) ; в) ; г) – дефекты неанодированной поверхности

Таблица 4 – Результат химического анализа

Легирующий элемент						в процентах
Mg	Al	S	Mn	Fe	Ag	
3,34	88,91	6,02	0,46	0,16	1,11	

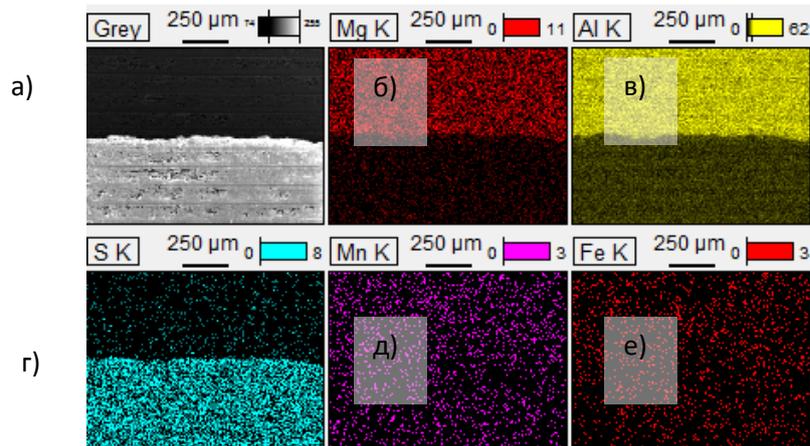


Рисунок 5 – Распределение легирующих элементов по поверхности анодированного образца

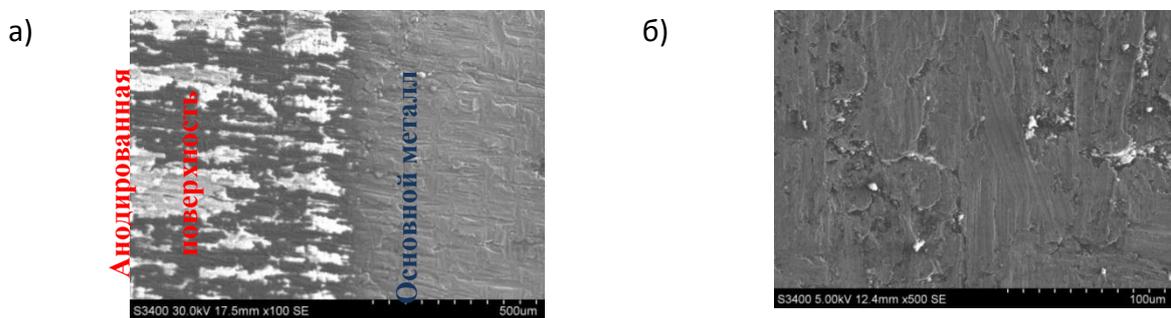


Рисунок 6 – Поверхность образца с анодированным слоем, подготовленным под сварку механическим способом:  
а – переходная зона; б – основной металл, увеличение 500×

Химический анализ поверхности перехода сварного шва к литой детали с распределением элементов, рис. 7, показал, что как деталь, подвергаемая анодированию, так и сварной шов с литой деталью имеют на поверхности серу, ухудшающую свариваемость и качество сварных соединений. Характер распределения серы по поверхности исследуемого образца неравномерный – на поверхности литой детали серы больше, чем в сварном шве и детали анодированной. Значение общего количества легирующих элементов на поверхности исследуемой области представлен в табл. 5.

Химическая подготовка основного металла и сварочных материалов под сварку. На участке химической подготовки расположены ванны с реагентами и проточной водой. Материалы доставляются на участок и готовятся к химической обработке. Детали группируются по марке основного или сварочного материала и обрабатываются одновременно по несколько штук. Химический состав ванн проверяется раз в 10 дней, берется проба и сверяется с установленными допустимыми значениями. Если присутствует отклонение от значения, то вносятся корректировки, после чего снова берется проба раствора. Для достижения удовлетворительного качества подготовки поверхности ПИ 1.4.1555-2000 регламентировано время выдержки в том или ином растворе без учета оскуднения раствора, поэтому подготовка одной партии деталей может незначительно отличаться от подготовки другой партии. Промывка (ополаскивание) деталей и полуфабрикатов в проточной воде путем окунания может проводиться не достаточно длительно, в микродефектах возможна задержка реагента, и при промывании водой он только разбавляется, но не удаляется полностью с поверхности, следовательно, реакция с поверхностью продолжается.

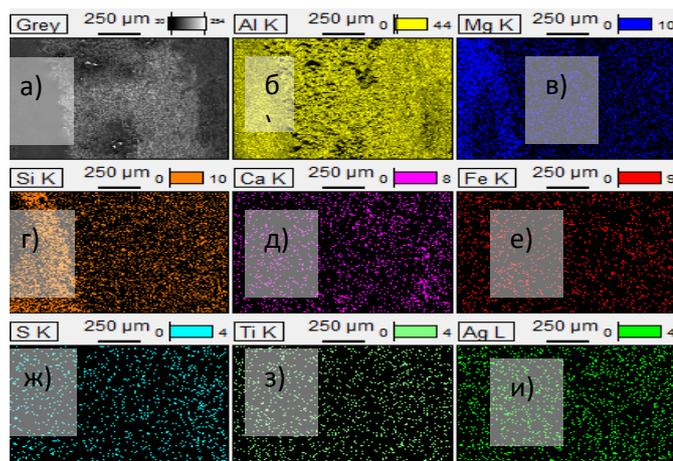


Рисунок 7 – Распределение химических элементов на поверхности перехода сварного шва к литой детали (ЗТВ):

а) – вид сканируемой поверхности; б) – Al; в) – Mg; г) – Si;  
д) – Ca; е) – Fe; ж) – S; з) – Ti; и) – Ag

Таблица 5 – Результат химического анализа

Легирующий элемент							в процентах
Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	Fe	Ag
1.69	85.73	10.75	0.25	0.28	0.11	0.32	0.87

После обработки в реагентах и промывки деталей они подвергаются продувке воздухом, после чего помещаются в камеру сушки. Камера оборудована стеллажами, на которые укладываются детали и проволока, температура поддерживается за счет парового трубопровода по периметру. Наблюдались случаи задержки деталей в камере значительное время, что недопустимо установленными временными интервалами между операциями химической обработки и сварки. Все операции химподготовки производятся вручную, при этом возможно нарушение соблюдения режимов технологических операций.

Слесарные и сварочные операции. В цехе 4 оборудовано несколько рабочих мест слесарей-сборщиков в несколько рядов. Рабочие места удалены от позиций сварки, находящиеся в отдельных помещениях. Слесари собирают ЭПС в приспособлениях, обрабатывают кромки свариваемых деталей, производят зачистку швов после сварки, производят выборку дефектов. При этом используют различные инструменты: щетки, шарошки, слесарный инструмент и вспомогательные приспособления. В ходе слесарных операций на поверхности деталей и на перчатках слесаря накапливается достаточное количество мелкодисперсной пыли и других загрязнений.

До сборки под сварку производится зачистка сварного стыка на 15-20 мм металлической щеткой, затем шабрение торцев и обработка ацетоном.

Кроме основных исследований произвели анализ поверхности щетинок металлической щетки, используемой в операции подготовки кромок под сварку и качества поверхности основного металла и сварочной проволоки.

На поверхности рабочих торцов щетинок металлической щетки и на протяжении 1 мм от них обнаружены загрязнения (рис. 8), на остальных участках поверхность удовлетворительная.

Предположительно, наблюдаемый объект - алюминий. Объяснить этот эффект можно нагревом за счет сил трения алюминиевой части и перенос металла на более холодную стальную проволоку. Как видно из рисунка 3 объем нанесенного слоя может быть существенным и постоянно взаимодействовать с очищаемым металлом. Таки образом можно сделать вывод о том, что использование металлических щеток для подготовки поверхности кромок под сварку нецелесообразно, так как способствует перемещению

оксидных загрязнений на всю обрабатываемую поверхность и не гарантирует полного их удаления.

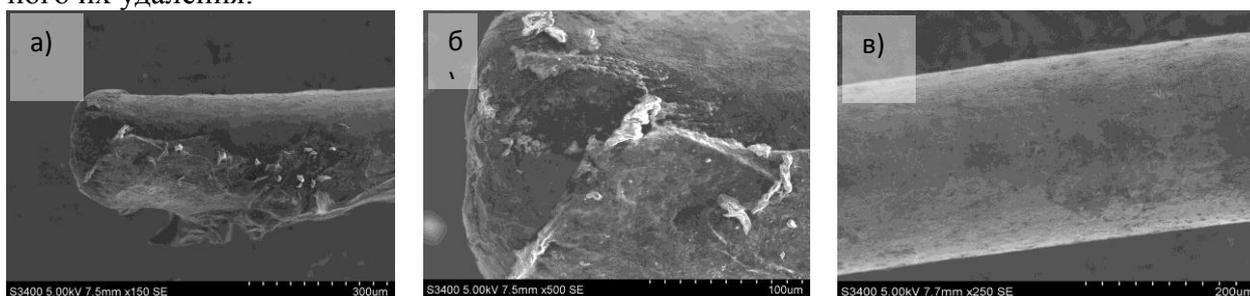


Рисунок 8 – Поверхности щетинок металлической щетки:  
а), б) рабочий торец; в) центральная часть

Перед сваркой детали собирают в сборочной оснастке. Сборку производит слесарь-сборщик. Сварщик делает прихватки по схеме технологической карты. В связи с вероятностью внесения дополнительных загрязнений в собранный стык прихватки не зачищаются и не подвергаются химической обработке. Контроль поверхности свариваемых деталей перед сваркой производится контролером, без зачистки деталь на позицию сварки не переходит. Контроль качества сборки производится по сборочному приспособлению. При сварке детали не закреплены и механизировано не вращаются, а применяется пошаговое наложение шва с остановкой процесса сварки и поворота детали на необходимый угол вручную и возобновления сварки. Сварной шов может разбиваться на несколько участков различной длины, это зависит от удобства выполнения и техники сварки. Выполнение процесса сварки происходит на режимах сварки, оговоренных в картах сварки, однако возможна корректировка режима в зависимости от опыта сварщика. В ходе этих операций кромки свариваемых деталей и проволока не обрабатываются спиртом или другим средством обеспечения удаления поверхностно-конденсированной влаги, а лишь обезжириваются ацетоном.

После травления сварочная проволока разносится по сварочным участкам из расчета расхода на одну смену для каждого сварщика. Временные интервалы между химической подготовкой и сваркой учитываются по прикрепленной к партии прутков биркой с указанием времени выдачи. На участке сварки проволока обычно лежит в открытой упаковке (полиэтиленовый пакет или бумажная упаковка) на сварочном столе или около него. Также на сварочном столе могут лежать подготовленные для сварки детали и уже заваренные. Сварка ведется без обеспечения подачи защитного газа к корню шва.

Подготовка вольфрамового электрода производится персонально каждым сварщиком на наждачном круге.

Анализ дефектов сварных соединений по результатам радиографического контроля показал, что основными дефектами является поры (как единичные, так и скопления). Поры обнаруживаются как в центре сварного соединения, так и по линии сплавления. Особенно часто поры встречаются в местах окончания одного и начала следующего валика. Таких мест (рис. 9) в соединении может быть 3-5 в зависимости от диаметра свариваемых элементов трубопроводных систем (ТПС).

Как видно из рис. 9, предыдущий валик накрывается последующим, и это перекрытие может составлять от 3 до 15 мм. Кроме того, что этот параметр выбирается сварщиком интуитивно и не регламентируется нормативной документацией, он приводит к увеличению усиления сварного шва и потере эстетического его вида.

Такие переходы регламентируются технологическим процессом изготовления этих элементов по причине отсутствия поворотных механизмов для вращения труб, и, главным образом, по причине невозможности использования стандартного оборудования (вращателей, манипуляторов, позиционеров) для сварки криволинейных участков труб. Поэтому

сварщику при выполнении сварного кольцевого шва приходится делать вынужденные паузы с прерыванием дугового разряда и производить вращение трубы на угол до  $90^\circ$  вручную. Многие сварщики по этой причине располагают свариваемые элементы ТПС вертикально с фиксацией их между торцом столешницы стола сварщика и собственной ногой, при этом шов имеет горизонтальное пространственное положение, что крайне усложняет операции его формирования.

В четвертой главе представлены результаты исследований влияния времени травления и параметров режима сварки на качество сварного соединения. Показано, что сварка на 50 Гц не способствует хорошему разрушению окисной пленки, затруднено формирование валика, что приводит к сварке на пониженных скоростях. Сварка с частотой импульса тока 100 Гц значительно улучшает, по отношению к 50 Гц разрушение окисной пленки, стабилизирует процесс сварки. Применение импульса тока с частотой 150 Гц приводит к оптимальному качеству сварного соединения, улучшает разрушение окисной пленки, процесс формирования сварного шва становится более наблюдаемым.

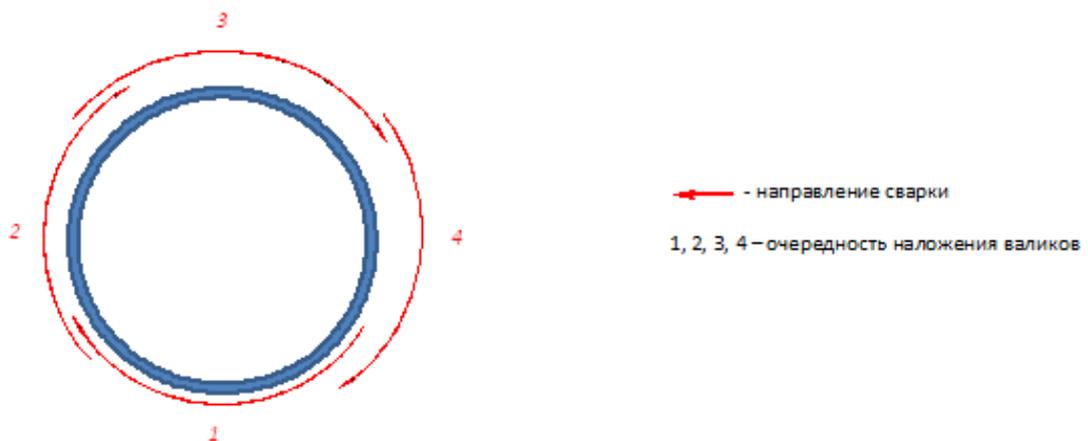


Рисунок 9 – Схема наложения валиков при АрДЭС элементов ТПС

200 Гц ведет к повышенному расходу проволоки и увеличению скорости сварки. Приходится интенсивно контролировать формирование сварного соединения и внимательно следить за скоростью сварки. Повышенная частота импульсов увеличивает шумовой эффект от процесса сварки. Некомфортно работать на таких режимах без специальной защиты слухового аппарата.

После сварки образцы подвергнуты визуально-измерительному и рентгенографическому контролю, а также исследованиям механических свойств и микроструктурному анализу сварных соединений. Внешний вид обнаруженных поверхностных дефектов после визуального осмотра сварных швов приведен в табл. 6.

Как видно из табл. 6 образец 3 имеет блестящую поверхность шва, равномерную чешуйчатость, на его поверхности отсутствуют визуально определяемые дефекты. Образцы 2 и 4 имеют единичные поры, расположенные на галтели. Этот дефект может появиться по причине недостаточной очистки поверхности от окисной пленки или других загрязнений. Образец 1 имеет поверхностную рыхлотность проходящую преимущественно по центру сварного шва и распространяющуюся на  $1/3$  от всей его длины. Вероятной причиной образования этого дефекта – загрязнения сварочной проволоки и/или недостаточная защита газом.

Проведенные измерения ширины шва и высоты усиления при помощи металлической линейки и универсального шаблона сварщика УШС-3 показали удовлетворительное качество геометрии швов. Из данных табл. 6 видно, что требованиям ПИ 1.4.1555-200 удовлетворяет образец 1. Остальные имеют внутренние недопустимые для первой категории шва дефекты.

Анализ результатов испытаний сварных образцов на статическое растяжение показал, что разрушение всех образцов произошло по основному металлу. При этом предел прочности образцов не превысил 174 МПа, а относительное удлинение 31%. По ГОСТ 4784 – 97 значение механических свойств для труб ГОСТ 18482-79 следующие:  $\sigma_b = 155$  МПа;  $\sigma_t = 60$  МПа;  $\delta = 10$  %. Таким образом, все образцы соответствуют требованиям, предъявляемым к основному металлу.

Результаты микроструктурных исследований поперечного сечения полученных сварных швов проводили на оптическом микроскопе Nikon MA200 (табл. 7). Для анализа изменения структуры сварных соединений в зависимости от частоты импульса сварочного тока применили метод скелетирования снимков микроструктур при увеличении  $\times 400$  и компьютерной обработки изображения при помощи прикладной программы Image Pro. Свод данных по программе Image Pro приведен в табл. 8.

Как видно из табл. 8 периметр границ объектов, обнаруженных на микроснимке сварного шва возрастает относительно основного металла, а средняя плотность границ зерен увеличивается в 2 раза во всех образцах. Исключение составил образец 4.

Таблица 6 – Обнаруженные поверхностные дефекты сварных соединений

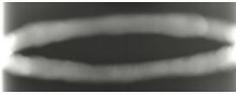
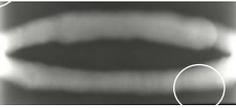
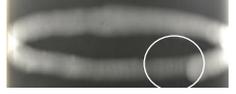
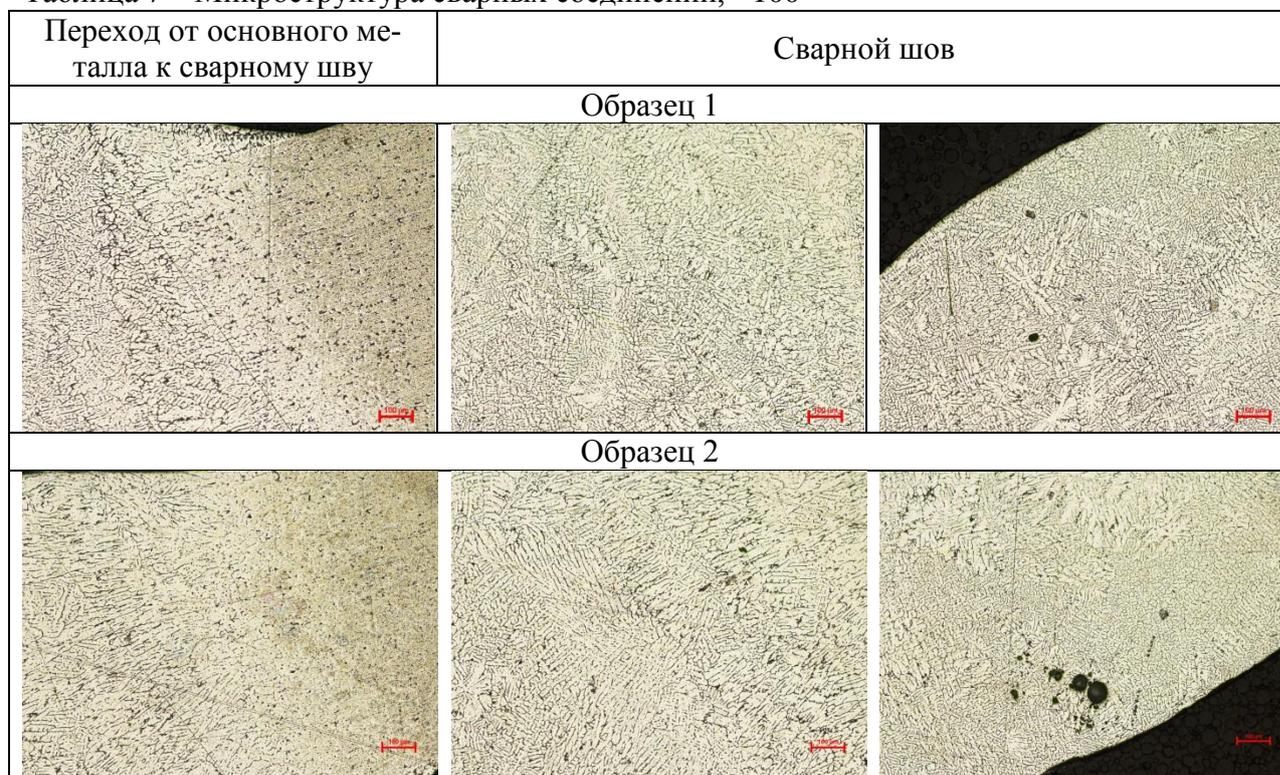
Образец	Изображение шва		Визуально-измерительный контроль		Заключение по РГК
	Визуальное	Рентгенограмма	Описание дефекта	Качество поверхности шва	
1			Рыхлоты на поверхности сварного шва	Поверхность шва матовая	Удовлетворительно, недопустимых дефектов не выявлено
2			Единичная пора в галтели, превышение усиления замка	Поверхность шва матовая	4 единичных поры по галтели, диаметр каждой 0,2 мм
3			Поверхностных дефектов не обнаружено	Равномерная чешуйчатость, блестящая поверхность шва	Единичная пора, диаметр 0,5 мм
4			Единичная пора в галтели	Поверхность шва блестящая, равномерная чешуйчатость	Единичная пора, диаметр 1 мм

Таблица 8 – Расчетная средняя плотность границ зерен

№ образца	Область определения значений	Средняя плотность границ зерен
1	Шов	2,915882
	Основной металл	5,231791
2	Шов	3,476346
	Основной металл	6,006216
3	Шов	3,40984
	Основной металл	6,593959
4	Шов	2,962113
	Основной металл	2,185285

Возрастание средней плотности границ зерен объясняется образованием дендритных структур сварного шва, имеющих меньшее количество и увеличенный объем (периметр). В отношении образца 4 можно сказать, что структура основного металла сходна со структурой сварного шва по количеству зерен и их периметру.

Исследованиями влияния времени травления на качество сварного соединения элементов алюминиевых трудопроводных систем, выполненных ручной аргодуговой сваркой неплавящимся вольфрамовым электродом с присадком на установке MasterTig3500 установлено, что количества пор в металле шва и величина суммарной площади пор зависит от временного интервала между операцией травления и сваркой (рис. 10). Наибольшее количество пор с максимальной суммарной площадью зафиксировано в сварных образцах, выполненных по истечении 3 ч после травления. Также наблюдается повышение этих показателей в образцах, с продолжительностью травления 60 с относительно обработанных 30 с.

Таблица 7 – Микроструктура сварных соединений,  $\times 100$ 

Продолжение стр.7

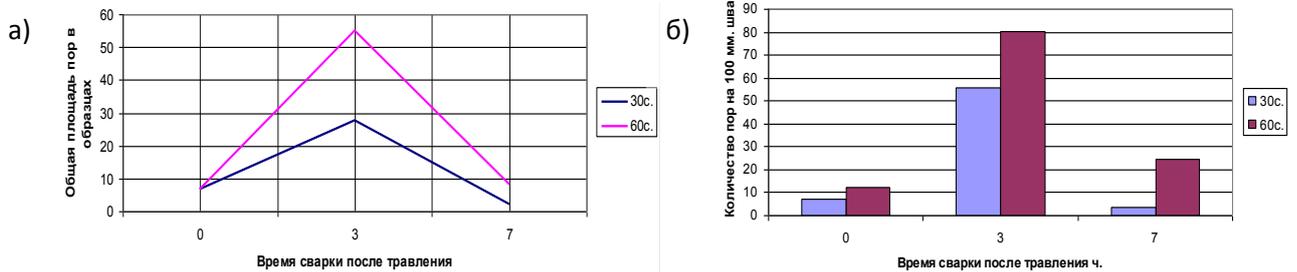
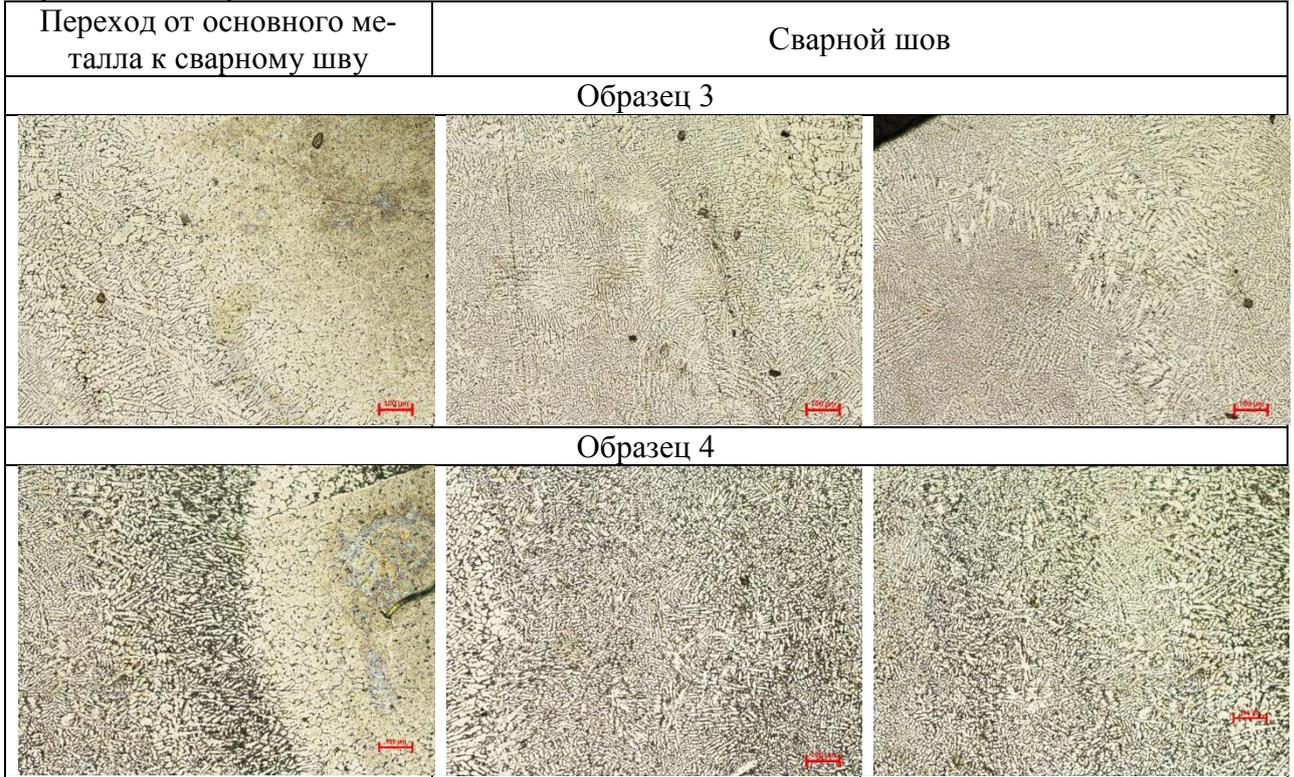
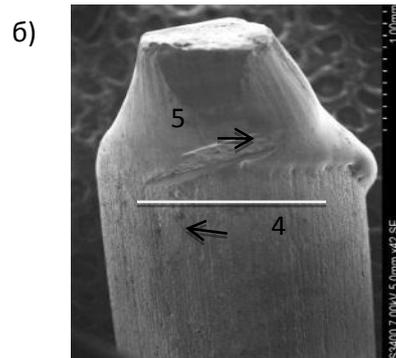
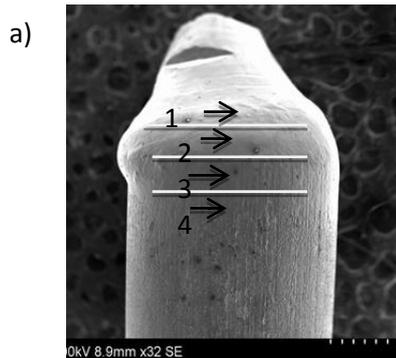


Рисунок 10 – Количество пор (а) и их общая площадь (б), в зависимости от времени

Внешний вид оплавленного торца сварочной проволоки СВАК5, полученного при остановке процесса сварки, приведен на рис. 12. Проволока к сварке была подготовлена по традиционной цеховой технологии.

Как видно из рис. 11,а, поверхность проволоки со стороны воздействия дуги имеет несколько областей: 1 - зона расплавленного металла, 2 - бурт с переходом от оплавленного металла к расплавленному, 3- оплавленная часть и 4- не подвергнутая плавлению. Обратная сторона (рис 11, б) не имеет зон 1, 2 и 3.



- 1 – зона расплавления; 2 – зона оплавления; 3 – переходная зона;  
 4 – исходное состояние; 5 – пластифицированный металл  
 Рисунок 11 – Оплавленный торец присадочной проволоки:  
 а) – сторона воздействия дуги; б) – обратная сторона

Исходная поверхность проволоки (рис. 12) имеет как с лицевой, так и с обратной стороны пемзообразную структуру с большим количеством пор, ямок, диаметром от 3 до 10 мкм. Также на поверхности проволоки по направлению продольной оси наблюдаются чередующиеся с шагом 25÷50 мкм бороздки, что свидетельствует о травлении около 120 сек. Переходная зона присадочной проволоки со стороны воздействия дугового разряда характеризуется сохранением дефектов исходной проволоки: несколько размытой (частично оплавленной) формы продольные бороздки (рис. 13, а). Оплавленная поверхность имеет микротрещины шириной 1 мкм, микропоры диаметром не более 2 мкм и единичные макропоры диаметром 30÷35 мкм (рис. 13 б, в). Поверхность зоны оплавления со стороны воздействия дуги при переходе от зоны оплавления к зоне расплавления также оплавлена, дендритная структура дефектов не имеет (рис. 14).



Рисунок 12 – Поверхность сварочной проволоки

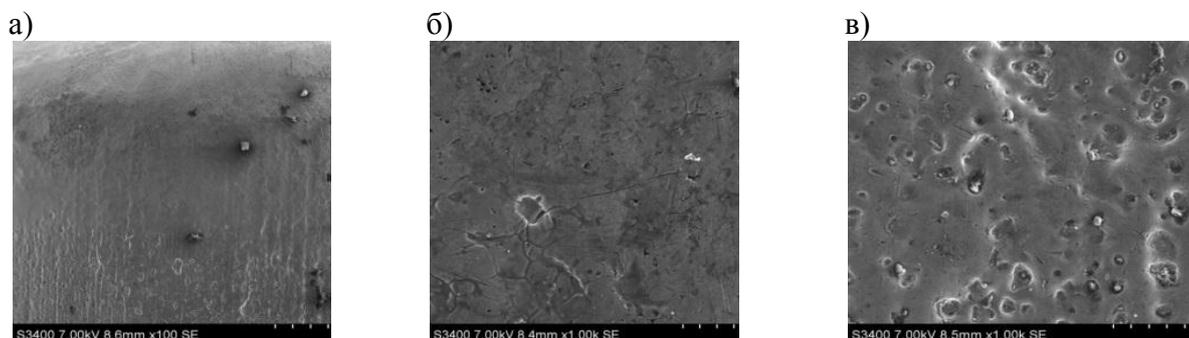


Рисунок 13 – Поверхность проволоки в зоне оплавления со стороны воздействия дуги и области подробного исследования:

- а) – вид переходной зоны; б) – оплавленный участок; в) – переходная зона

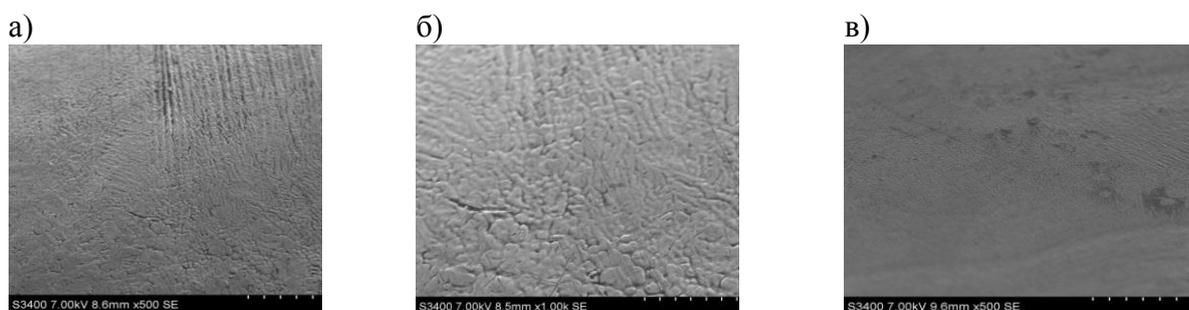


Рисунок 14 – Зона оплавления (а, б) и зоны расплавления (в) присадочной проволоки с лицевой стороны

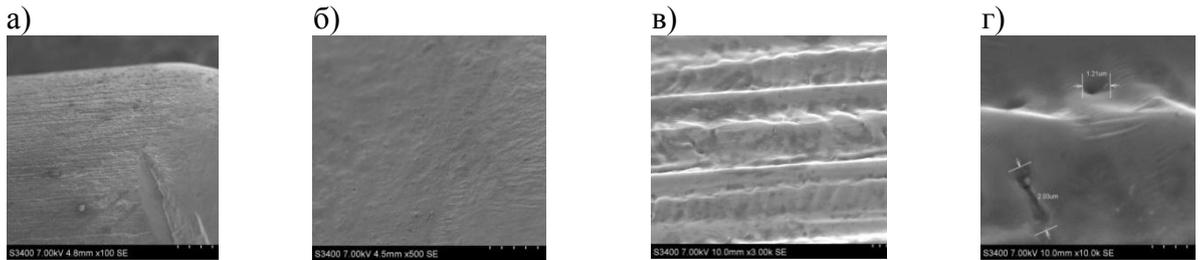


Рисунок 15 – Обратная сторона поверхности проволоки в переходе (а, б) от исходного состояния к зоне 5 (в, г) пластически деформированного металла

На рис. 14 показана поверхность проволоки с лицевой стороны с четким дендритным строением зерен по линии отрыва капли расплавленного металла от проволоки. Поверхностных дефектов не наблюдается.

Совершенно иная картина наблюдается в зоне 5 с обратной стороны шва (рис. 15). В зоне 5 вдоль проволоки видны борозды исходного состояния проволоки, образовавшиеся в процессе вытяжки пластифицированного участка проволоки температурой сварочной дуги в момент отвода присадка. Чередование бороздок по всей обратной поверхности одинаковое с периодом 5 мкм. На поверхности чередующегося рельефа имеются мелкие поры диаметром 1 мкм и микротрещины 1×3 мкм. Расплавления поверхности проволоки с обратной стороны не наблюдается.

Обратная сторона сварочной проволоки сохраняет большой объем нерасплавленного металла, но при этом разогревается до температуры пластификации. Так как на обратной стороне проволоки отсутствуют зоны оплавления 2 и расплавления 1, то при выводе из зоны действия сварочной дуги она сильно удлиняется с образованием на ее поверхности микродефектов в виде пор и поверхностных дефектов исходного состояния проволоки.

Механизм внесения капиллярно-конденсированной влаги с поверхности проволоки в сварочную ванну можно объяснить следующим образом: процесс внесения присадочного материала связан с чередованием манипуляций введения и вывода присадочного материала из зоны горения дуги. Попадая под действие сварочной дуги, расплавляется лишь лицевая поверхность сварочной проволоки, в то время как обратная значительно пластифицируется. Образовавшийся на лицевой поверхности проволоки объем расплавленного металла удерживается на ней до достижения критической массы и стекает в сварочную ванну под действием сил тяжести и давления дуги.

При небольшом перерыве (связанном с поворотом детали, с заменой деталей и т.п.) эти дефекты способны накапливать капиллярно-конденсированную влагу, и при возобновлении процесса сварки некий объем пластифицируемого материала обратной стороны будет вовлечен в сварочную ванну.

Подготовка поверхности является решающим фактором, определяющим возможность получения высококачественных соединений.

Для оценки качества подготовки поверхности были рассмотрены четыре способа подготовки поверхности свариваемых деталей из сплава Амгб (без подготовки; механический; химический по базовой технологии + шабрение; химический по технологии НИАТ+ шабрение). Для каждого способа были взяты по 3 образца толщиной 2 мм. После подготовки образцы заваривали АрДЭС. Применали аргон высшего сорта, проверенный на содержание влаги (<0,007 г/м<sup>3</sup>). Сварочную проволоку подготовили по базовой технологии. Для количественной оценки качества подготовки поверхности деталей из алюминиевых сплавов и продолжительности сохранения ее свойств использовали результаты измерения электроконтактного сопротивления. Сопротивление измеряли прибором ELC-131D (рис. 16) непосредственно после подготовки поверхности и каждые 30 минут в течении 8 часов.

Выявили, что с увеличением времени растет контактное сопротивление, что связано с ростом окисной пленки на поверхности металла. В результате проведенного рентгеноконтроля выявили, что при подготовки поверхности по технологии НИАТ пор не обнаружено.

Появление единичных дефектов на образцах возникло по истечении 3-х часового рубежа и значении сопротивления, равного 280 мкОм.

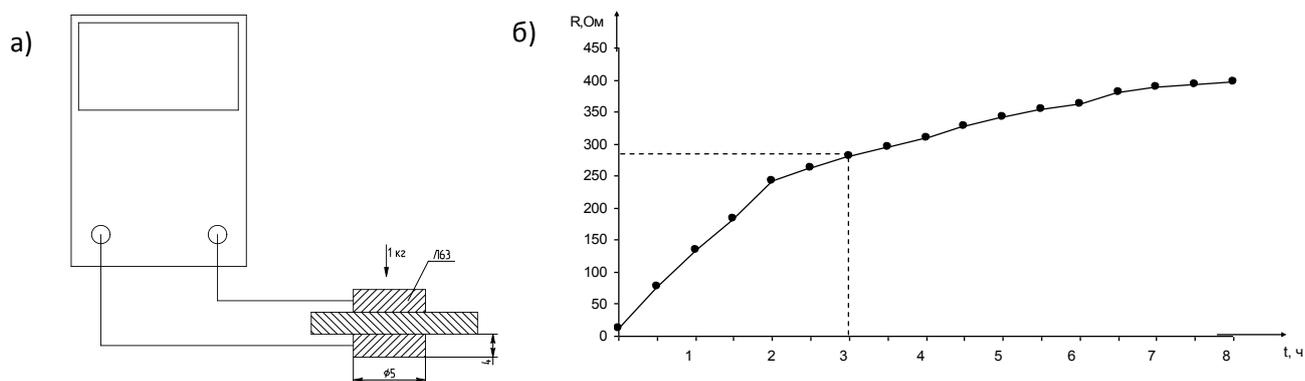


Рисунок 16 – Схема проведения измерений (а) и зависимость контактного сопротивления от времени после травления (б)

В пятой главе проведен анализ техники и технологии сварки некоторых деталей: тройника подачи и патрубков, исследован процесс выполнения сварки тройников подачи, патрубка. Контролируемые параметры: номер и название детали, диаметр сварного соединения, марка материала, толщина сварного соединения, количество участков сварки, диаметр и марка присадочной проволоки, диаметр и название вольфрамового электрода, угол заточки и наличие шарика вольфрамового электрода, место введения присадочной проволоки, траектория и амплитуда движения процесса сварки, дуговой зазор, показания манометров, сила сварочного тока, результаты рентген-контроля. Сварку TIG ведут на переменном токе (АС).

По анализу техники выполнения сварных соединений и технологии изготовления патрубков и тройников из алюминий-магниевого сплава видно, что практически при безукоризненном выполнении сварщиком указаний специального технологического процесса 04.02290.00025 детали имеют дефекты геометрического характера, а также трещины и поры. Это еще раз свидетельствует о недостаточном качестве подготовки сварочной проволоки и основного металла (растворенная поверхность, наличие загрязнений), о недопустимости вынужденных остановок с прерыванием дугового разряда для поворота трубы вручную на угол до  $90^\circ$  (при котором необходимо поддерживать горение дуги с помощью функции «Минилог», которой снабжен сварочный аппарат MasterTIG AC/DC 3500W), о необходимости ликвидации оплавленного участка сварочной проволоки после прерывания дугового разряда. Сварочный аппарат MasterTIG AC/DC 3500W может быть снабжен сварочной горелкой, позволяющей автоматизировать подачу проволоки в зону горения дуги. Это обстоятельство позволит освободить руку сварщика для свободного вращения детали без гашения дуги.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Сварка алюминиево-магниевых сплавов осложняется вероятностью порообразования возникающей по причине формирования на их поверхности гидратированной оксидной пленки, сложно удаляемой традиционными методами, поэтому механизм порообразования при сварке алюминиево-магниевых сплавов отличен от механизма при сварке алюминия. Этим обусловлен большой процент дефектных деталей (свыше 30%) из числа предъявляемых впервые и доработанных.

Установлено, что основной причиной образования пор является водород, накапливающийся в оксидной пленке свариваемых деталей. Причем технологические операции изготовления полужабириков (литье, штамповка, фрезерование и др.), подготовки их под сварку (хим. обработка, шабрение, зачистка металлическими щетками) также способствуют этому процессу, образуя поверхностные дефекты, увеличивающие фактическую площадь соединимых кромок, то есть площадь, на которой оксидная пленка развивается, а в последующем переносится в сварочную ванну. Кроме того, операция холодного анодирования способствует образованию сульфидов на поверхности свариваемых деталей, что неизбежно приводит к трещинообразованию и возникновению несплавлений в сварных соединениях.

Количества пор в металле шва и величина суммарной площади пор зависит от временного интервала между операцией травления и сваркой. Наибольшее количество пор с максимальной суммарной площадью зафиксировано в сварных образцах, выполненных по истечении 3 ч после травления. Также наблюдается повышение этих показателей в образцах, с продолжительностью травления 60 с относительно обработанных 30 с.

Анализ процесса плавления сварочной проволоки при ручной подаче в зону действия дуги показал неравномерное ее оплавление и сохранение (с увеличением размеров) поверхностных дефектов, способствующих накоплению капиллярно-конденсированной влаги и ее внесению при возобновлении сварки. Этот факт усугубляется тем, что сварщику приходится периодически останавливать сварку для вращения детали и осуществлять переварку части уже существующего шва, а так же организацию замковых участков перекрытия формирующегося шва. На качество сварки отрицательно влияет отсутствие защиты корня шва.

Наилучшее время травления как для обычной, так и для полированной проволоки, а также основного металла (алюминиево-магнмевые сплавы АМг2, АМг3, АМг6 и ВАЛ15) составляет 45-75 сек. при котором обеспечивается устранение дефектов волочения и оптимальной величины оксидной пленки.

В повышении качества сварных соединений несомненно может способствовать уникальное высокоэффективное оборудование для ручной АрДЭС – установки Mastertig AC/DC 3000 и 3500W, имеющие возможности регулировки частоты импульсов сварочного тока, функцию "Минилог", позволяющую использовать два уровня тока: сварочного и дежурного, при котором переход между уровнями происходит кратковременным нажатием переключателя горелки (для поддержания дугового воздействия при повороте детали) и др., а также разработка и использование универсальных механизированных вращателей.

Частота импульсов сварочного тока играет существенную роль в формообразовании сварного соединения из алюминиевого сплава, определяя технологические параметры режима сварки. Пониженные значения частоты сварочного тока (ниже 75 Гц) недостаточны для эффективного разрушения оксидной пленки и приводят к возникновению непроваров и поверхностных рыхлотов, хотя сам процесс сварки по шуму комфортный. Повышение частоты до 100-150 Гц приводит к улучшению и информативности процесса формирования сварного соединения, хотя и усугубляет шумовой фон. Частота 200 Гц существенно ускоряет разрушение поверхностной оксидной пленки, как основного, так и присадочного металла, обуславливая ускорение процесса сварки с обеспечением стабильного качества сварного шва.

Качество поверхности свариваемых деталей и сварочных материалов из алюминия и его сплавов играют решающую роль в образовании дефектов сварного соединения, вне зависимости от режимов сварки, квалификации сварщика и применяемой техники формирования соединения.

Применение в технологическом процессе подготовки кромок под сварку металлических щеток не гарантирует полной очистки обрабатываемой ими поверхности от окисных пленок и других загрязнений. Кроме того, вероятность нанесения на рабочую кромку щетинки алюминия способствует его интенсивному окислению и нанесению оксида на поверхность обрабатываемой кромок.

Разработан способ измерения электроконтактного сопротивления поверхности алюминиевых деталей и сварочной проволоки для контроля их подготовки под АрДЭС.

Безукоризненное выполнение сварщиком всех указаний специального технологического процесса в отношении выполнения сварных соединений из алюминиево-магниевого сплава не гарантирует качество швов, что свидетельствует о недостаточном качестве подготовки сварочной проволоки и основного металла (растравленная поверхность, наличие загрязнений), о недопустимости вынужденных остановок с прерыванием дугового разряда для поворота трубы вручную.

#### **ПРЕДЛОЖЕНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ:**

1. Улучшить качество литых полуфабрикатов, поставляемых под сварку. Не подавать под сварку детали, имеющие обширные поверхностные дефекты, даже незначительных размеров.
2. Проводить дополнительные мероприятия по активизации процесса промывки в проточной воде поверхностей деталей и сварочной проволоки после химического травления, протиркой влажной ветошью под проточной водой либо в ультразвуковых ваннах.
3. Контролировать качество поверхности точеных деталей, поставляемых на позицию сварки на предмет образования рыхлот (вырывов) при нарушении режимов резания.
4. Четко отслеживать время травления 45-75 сек.
5. Применить обработку спиртом свариваемых кромок непосредственно перед сваркой.
6. Производить сварку алюминиевых труб, толщиной до 1,5 мм при частоте импульса 150-170 Гц, токе сварки 60-90 А.
7. При вынужденных остановках с прерыванием дугового разряда для поворота трубы вручную, необходимо поддерживать горение дуги на дежурном токе с помощью функции «Мини-лог», которой снабжен сварочный аппарат MASTERTIG AC/DC 3500W.
8. После каждой остановки процесса сварки (непосредственно перед возобновлением сварки) производить ликвидацию (откусывание кусачками) оплавленного конца присадочной проволоки на расстоянии 2 см от торца, либо (если это невозможно) использовать новую проволоку.
9. Необходимо разработать поворотное устройство, позволяющее вращать детали сложной конфигурации различного диаметра с минимальным размером установочной базы в сочетании с ручной АрДЭС.

#### **ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:**

1. Влияние операции опескоструивания присадочной проволоки и кромок на качество сварных соединений / Муравьев В.И., Бахматов П.В., Бабарин Д.В., Волжин С.А., Мазур С.П. // Сварка и диагностика. 2016-№6 – С39-44.
2. Причины возникновения дефектов при сварке алюминиевого трубопровода / Бабарин Д.В., Ковалев В.А., Ващук И.А. // Конференция студентов и аспирантов Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, 2017.