

На правах рукописи



**Проценко Евгений Олегович**

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В  
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ЛИСТОВ ИЗ АЛЮМОКАЛЬЦИЕВЫХ  
СПЛАВОВ**

Научная специальность  
2.6.17. Материаловедение (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2025

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

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

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

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

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

Защита диссертации состоится «11» декабря 2025 г. в 16<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета 24.2.327.04 (Д 212.125.15) в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 121552, г. Москва, ул. Оршанская, д. 3., ауд. 307Б. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Сковрцовой Светлане Владимировне и по электронной почте skvortsovasv@mai.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте:  
[https://mai.ru/upload/iblock/43f/tjz7dne1jgqy45y6dzt61baf1jlatbbs/Protsenko-E.O.-Dissertatsiya\\_22.09.2025.pdf](https://mai.ru/upload/iblock/43f/tjz7dne1jgqy45y6dzt61baf1jlatbbs/Protsenko-E.O.-Dissertatsiya_22.09.2025.pdf)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета



Сковрцова С.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы и темы исследования

Алюминиевые сплавы, начиная с середины XX столетия, все шире применяются во многих отраслях промышленности, так как имеют весьма малую плотность, но по удельной прочности практически сравнимы с другими конструкционными сталями и сплавами. Кроме того, многие современные алюминиевые сплавы обладают хорошей сопротивляемостью коррозии в речной и морской воде, жаропрочностью, а также высокими механическими свойствами при криогенной температуре вплоть до минус 196 °С. Это обусловило их преимущественное применение в ракетно-космической и авиационной отрасли, судостроении и автотранспортной технике.

В целом сочетание требуемых механических свойств с высокой технологичностью при сварке является непростой задачей для алюминиевых сплавов. Наилучшим балансом этих характеристик обладают среднепрочные деформируемые сплавы типа АМг6 (система Al–Mg), 1915 (система Al–Zn–Mg) и АД35 (система Al–Mg–Si). Среди них наиболее высокими прочностными свойствами обладают сплавы, легированные цинком и магнием в количестве 6-7%.

Однако деформируемые сплавы этой системы обладают низкими литейными свойствами и поэтому не могут быть использованы для получения фасонных отливок сложной формы. В связи с этим изготовление из них гибридных изделий (литодеформированных сварных конструкций), включающих сварные соединения литейных и деформированных полуфабрикатов, весьма затруднено.

Различия в химическом составе литейных и деформируемых алюминиевых сплавов при изготовлении литодеформированных сварных конструкций обуславливает необходимость выполнения сварного соединения между разноименными сплавами. При сварке плавлением разноименных алюминиевых сплавов в ванне происходит их перемешивание и возникает значительная макро- и микро-неоднородность структуры.

Следовательно, актуально создание новых алюминиевых сплавов, обладающих высокой технологичностью при литье, обработке давлением и сварке (прежде всего, наиболее распространенной аргонно-дуговой).

В недавних исследованиях, проведенных в НИТУ «МИСиС» было показано, что система Al–Ca является перспективной для разработки сплавов с улучшенным комплексом механических, технологических и коррозионных свойств. В частности, алюминивно-кальциевые сплавы с добавками цинка и магния показали хорошую технологичность при литье под давлением и в кокиль.

При этом в литом состоянии временное сопротивление на разрыв достигает 350 МПа, что отвечает уровню деформированных полуфабрикатов среднепрочных сплавов. Сплавы системы Al–Ca–Zn–Mg показали хорошую технологичность и при обработке давлением, в частности при горячей и холодной прокатке.

В связи с изложенным весьма актуальным для получения литодеформированных сварных конструкций становится исследование

закономерностей структурно-фазовых превращений в алюминиево-кальциевых сплавах, легированных цинком и магнием, в условиях сварки. При этом рассматривается как сварка плавлением (аргонодуговая и лазерная), так и сварка в твердой фазе – сварка трением с перемешиванием.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта №22–19–00121 «Закономерности структурно-фазовых превращений в алюминиево-кальциевых сплавах, легированных цинком и магнием, в условиях сварки».

**Степень разработанности темы.** Большой вклад в решение проблемы повышения комплекса свойств сварных соединений при сварке алюминиевых сплавов внесли ученые Белов Н.А., Наумова Е.А., Акопян Т.К., Лукин В.И., Колубаев А.Е., Дриц А.М., Бакшаев В.А., Фролов В.А., Рязанцев В.И., Тарасов С.Ю., Овчинников В.В., Филатов Ю.А., 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** является определение рационального химического состава и типа структуры алюминиево-кальциевых сплавов и разработка технологии получения сварных соединений указанных сплавов с высоким уровнем механических свойств.

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

1. Определить стойкость листов сплава  $Al-1Ca-5,5Zn-1,5Mg-0,5Mn$  к трещинообразованию при сварке плавлением. Установить влияние легирования исследуемых сплавов цирконием и скандием на коэффициент трещинообразования и критическую скорость деформирования сварного соединения исследуемого сплава.

2. Исследовать влияние присадочной проволоки на коэффициент трещинообразования и критическую скорость деформирования сварного соединения.

3. Изучить склонность листов сплава  $Al-1Ca-5,5Zn-1,5Mg-0,5Mn$  к порообразованию при сварке плавлением и влияние методов подготовки поверхности листов к сварке на пористость швов.

4. Исследовать влияние химического состава присадочной проволоки на механические свойства сварных соединений листов сплава  $Al-1Ca-5,5Zn-1,5Mg-0,5Mn$ , полученных автоматической аргонодуговой и лазерной сваркой.

5. Оценить влияние отжига сварных соединений листов сплава  $Al-1Ca-5,5Zn-1,5Mg-0,5Mn$  после сварки на комплекс их механических свойств.

6. Изучить особенности формирования структуры стыковых соединений листов сплава  $Al-1Ca-5,5Zn-1,5Mg-0,5Mn$  и уровень механических свойств соединений при сварке трением с перемешиванием, включая сварку заготовок в литом и горячедеформированном состоянии.

7. Исследовать термическую стабильность зоны перемешивания сварных соединений листов сплава  $Al-1Ca-5,5Zn-1,5Mg-0,5Mn$  при нагреве до температуры 520–540 °С.

### **Научная новизна**

1. На основе исследования технологических проб установлено, что коэффициент трещинообразования для сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn составил 47–55% при значении критической скорости деформирования 2,5–3,1 мм/мин. Дополнительное легирования сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn скандием в количестве 0,11–0,15 мас.% снижает коэффициент трещинообразования на 27–32%. Использование присадочной проволоки при сварке плавлением позволяет снизить коэффициент трещинообразования сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn до уровня 2–5%.

2. Установлено, что при сварке плавлением листов сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn в металле шва формируется литая мелкозернистая структура с отсутствием фаз грубой морфологии. Формирование такой структуры является влияние кальция, который связывает такие примесные элементы как железо и кремний в тройные соединения типа  $Al_{10}CaFe_2$  и  $Al_2CaSi_2$ .

3. Показано, что при аргонодуговой и лазерной сварке листов сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn с присадочной проволокой марки СвАМг63 и Св1575 коэффициент прочности соединений находится на уровне 0,79–0,89. Разрушение сварных соединений при испытании на растяжение происходит по зоне сплавления, где наблюдается наиболее высокая концентрация напряжений при приложении растягивающей нагрузки. Излом имеет вязкий характер.

4. Сварные соединения листов сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn, полученные односторонней сваркой трением с перемешиванием, имеют прочность на уровне 0,92–0,95 от временного сопротивления основного металла. Разрушение образцов при испытаниях на растяжение происходит по зоне термомеханического воздействия со стороны отхода рабочего инструмента, где температура нагрева металла выше по сравнению со стороной набегания рабочего инструмента.

5. Показано, что отжиг сварных соединений после сварки при температуре 350–400 °С в течение 2 часов позволяет повысить временное сопротивление сварных соединений на 12–15%. Наблюдаемое повышение прочности сварных соединений связано с образованием в процессе отжига упрочняющих наночастиц фазы  $Al_3(Zr,Sc)$  структурного типа L12, средний размер которых, составляет порядка 20 нм.

### **Теоретическая и практическая значимость**

1. Разработаны технологические рекомендации по сварке листов сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn, включающие выбор рациональных режимов аргонодуговой и лазерной сварки, а также сварки трением с перемешиванием, технологию подготовки заготовок под сварку, требования к точности сборки соединений и контролю их качества.

2. Предложен химический состав присадочной проволоки, близкий к составу основного металла листов сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn. Из полученных слитков изготовлена присадочная проволока с применением технологии скальпирования поверхности.

3. Результаты работы были включены в учебно-образовательный процесс подготовки бакалавров по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» профиль «Перспективные материалы и технологии» о чем имеется соответствующий акт Московского политехнического университета.

### **Методы исследования и достоверность полученных результатов**

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

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

1. Результаты исследований структуры металла шва листов сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn при сварке плавлением (аргонодуговая и лазерная).
2. Совокупность экспериментальных данных о влиянии технологии подготовки поверхности листов исследуемого сплава к сварке плавлением и о ее влиянии на структуру и фазовый состав поверхностной оксидной пленки.
3. Совокупность экспериментальных данных о формировании при сварке трением с перемешиванием слоистой мелкозернистой структуры металла шва листов сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn.
4. Способность сварных соединений листов сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn к упрочнению при отжиге после сварки за счет формирования когерентных наночастиц фазы  $Al_3(Zr, Sc)$  структурного типа L12.

### **Степень достоверности результатов.**

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

### **Апробация работы.**

Результаты работы доложены и обсуждены на научно-практических конференциях, в том числе: Международный научный форум «Наука и инновации – современные концепции» (Москва, 12 августа 2022 г.); Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы развития научных исследований: теоретический и практический взгляд» (г. Уфа, 25 сентября 2023 г.); Международная научно-практическая конференция «СМИС-2023. Технология управления качеством» (Москва, 17–19 мая 2023 г.); Международная научно-практическая конференция «СМИС-2025. Технология

управления качеством» (Москва, 21–24 мая 2025 г.).

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

**Публикации:** основное содержание диссертации отражено в 13 научных работах в рецензируемых научных журналах, сборниках и трудах конференций, из них 5 статей, входящих в перечень журналов из списка ВАК РФ, 4 статьи из которых переведены.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 239 наименований, 2-х приложений, всего 222 страницы машинописного текста, в том числе 91 рисунок и 30 таблицы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснованы актуальность и степень разработанности темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, обозначена научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, описаны методология исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, представлена общая структура диссертации.

**В главе 1** представлен обзор современного состояния исследований в области сварки высокопрочных деформируемых алюминиевых сплавов и сплавов средней прочности. Показаны системы легирования и методы упрочнения алюминиевых сплавов, проанализировано влияние легирующих элементов на механические свойства и свариваемость алюминиевых сплавов. Рассмотрены способы сварки конструкций из алюминиевых сплавов. В целом сочетание требуемых механических свойств с высокой технологичностью при сварке является непростой задачей для алюминиевых сплавов.

Дана оценка свариваемости самозакаливаемых сплавов системы Al–Zn–Mg. Приведено современное состояние исследований по оценке влияния циркония и скандия на свариваемость Al–Zn–Mg сплавов, влияния примесей железа и кремния. Большое внимание уделено проблемам свариваемости высокопрочных алюминиевых сплавов: для сплавов Al–Zn–Mg это образование пористости и кристаллизационных трещин в высокотемпературной области зоны термического влияния.

Для высоколегированных сплавов системы Al–Zn–Mg с суммарным содержанием цинка и магния более 6 % опасность представляет один из видов холодных трещин, так называемое задержанное разрушение, которое наблюдается в сварных соединениях после нескольких месяцев и даже лет эксплуатации. Склонность сплавов системы Al–Zn–Mg к образованию трещин

при сварке определяется не только суммарным содержанием основных легирующих элементов, а и их соотношением. Наиболее благоприятным для свариваемости является отношение Zn к Mg равное 1. Приведены механические и коррозионные свойства сварных соединений алюминиевых сплавов при различных видах сварки и термообработки.

Однако данные сплавы не пригодны для получения фасонных отливок, так как обладают низкими литейными свойствами. Это не позволяет использовать их при создании сварных литодеформированных конструкций.

В связи с этим представляют интерес результаты работ, проводимых в НИУ МИСИС под руководством профессора Белова Н.А., по легированию сплавов системы Al–Zn–Mg эвтектикообразующими элементами, такими как кальций или никель. При этом легирование кальцием выглядит более предпочтительным, так как оно не снижает коррозионную стойкость и не повышает плотность сплава в отличие от никеля. Легирование микродобавками циркония и скандия целесообразно для повышения термостойкости сплавов до 300 °С. Скандий позволяет значительно сократить время термообработки и обеспечивает необходимый эффект дисперсионного твердения за счет образования при отжиге наночастиц фазы  $Al_3(Zr, Sc)$ .

Рассмотрены особенности способов сварки плавлением алюминиевых сплавов, таких как аргонодуговая и лазерная сварка. Рассмотрены перспективы использования процесса сварки трением с перемешиванием для получения стыковых соединений заготовок из листов алюминиевых сплавов системы Al–Zn–Mg. На основании проведенного анализа сформулирована цель работы и поставлены задачи исследования.

**В главе 2** представлены характеристика объектов и методов осуществления исследования.

Для получения образцов сварных соединений использовали горячекатаные листы сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn, которые были изготовлены из лабораторных слитков. Плавку проводили в электрической печи сопротивления Nabertherm K 1/13 с использованием в качестве шихтовых материалов чистых металлов и лигатур. Способом гравитационной заливки в графитовые формы получали плоский слиток (40x140x180 мм) и цилиндрический слиток (40x280 мм). Химический состав листов сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn контролировался на эмиссионном спектрометре ARL3460. Слитки отжигались в муфельной электрической печи SNOL 8,2/1100. Далее слитки подвергались продольной прокатке на двухвалковом стане ДУО-210. Было проведено 11 проходов по схеме 40-37-33-28-23,5-19-15-12-8,4-6,0-3,9-2,0 мм.

Микроструктура экспериментального сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn в литом и деформированном состояниях приведена на рисунке 1, а их механические свойства в таблице 1.

Лазерную сварку исследуемого сплава выполняли посредством оптоволоконного лазера «YLS-CL» с максимальной мощностью излучения 10 кВт. Сварку проводили со сквозным проплавлением с присадочной проволокой диаметром 1,0 мм.



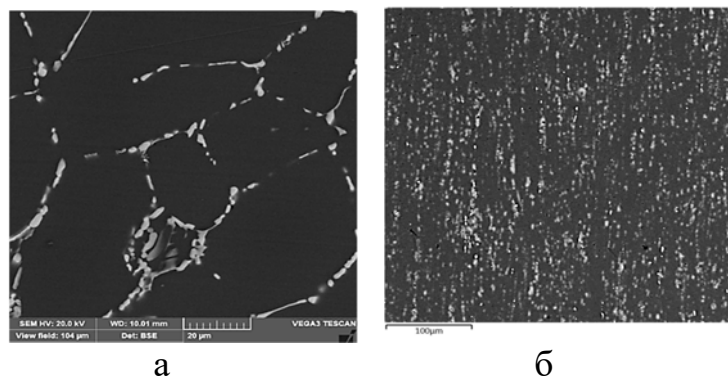


Рисунок 1 – Микроструктура экспериментальных сплавов системы Al-1Ca-5,5Zn-1,5Mg-0,5Mn в литом состоянии (а) и после прокатки при 450°С со степенью деформации 90 % (б)

Таблица 1 – Механические свойства экспериментального сплава системы Al-1Ca-5,5Zn-1,5Mg-0,5Mn

| Состояние сплава       | Временное сопротивление $\sigma_B$ , МПа | Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа | Относительное удлинение $\delta$ , % |
|------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Литое                  | 219–240                                  | 176–182                                        | 1,71–3,22                            |
| После горячей прокатки | 330–335                                  | 275–285                                        | 4,3–4,85                             |

Сварку трением с перемешиванием исследуемого сплава выполняли на экспериментальном стенде, созданным ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель» на режиме: частота вращения инструмента 850–900 об/мин; скорость сварки 125–350 мм/мин, угол наклона инструмента в плоскости стыка (против часовой стрелки) 2,5 град, усилие прижатия заплечика инструмента к поверхности заготовок 2,2–2,8 кН.

Для исследования показателей свариваемости исследуемых сплавов были использованы технологические пробы ("рыбий скелет" и крестовая) и методика оценки трещиностойкости МГТУ им. Н.Э. Баумана, критерием которой является величина критической скорости деформации растяжения ( $A_{кр}$ ) металла шва в процессе кристаллизации, при которой в нем не образуется трещин. Оценку трещиностойкости проводили на установке ЛТП1-6 с использованием образцов размером 50×50 мм. При оценке показателей свариваемости исследуемых сплавов сварка осуществлялась без присадочного металла.

Перед сваркой проводили зачистку поверхности свариваемых образцов путем химического травления в щелочи КОН с последующим осветлением в 30%-ном растворе азотной кислоты  $HNO_3$ , а также исследовали лазерную зачистку, которую выполняли с помощью установки LightCLEAN.

Испытания на одноосное растяжение листов проводили по ГОСТ 1497-84, а сварных соединений согласно ГОСТ 6996-66. Согласно последнему стандарту были подготовлены плоские образцы, вырезанные перпендикулярно направлению сварки. Определяли значения предела прочности ( $\sigma_B$ ), условного предела текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) и относительного удлинения ( $\delta$ ). Испытания на

растяжение для всех образцов проводились на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z250 в комплексе с автоматическим датчиком продольной деформации. Испытания на статический изгиб проводились на универсальной испытательной машине УТС 110М–100. Образцы для испытаний соответствовали ГОСТ 6996–66, тип XXVI. Испытания включали определение угла изгиба и наличия трещин при статическом изгибе.

Микротвердость сварных соединений измеряли на микротвердомере Duramin 5 по методу Виккерса в соответствии с ГОСТ 9450–76 с шагом 0,5 мм при нагрузке 490,6 мН и времени выдержки 10 с.

Металлографические исследования проводились на полированных травленных шлифах. После вырезания образцы монтировались в винтовые зажимы и шлифовались на шлифовальных бумагах с корундовым абразивом зернистостью от 400 до 2000. Начиная с зернистости 1000, производилось мокрое шлифование.

Для выявления особенности зеренной структуры неразъемных соединений проводились металлографические исследования при помощи средств световой микроскопии. Использовался оптический металлографический микроскоп Olympus GX51 при увеличениях 100–1000.

Детальный металлографический анализ проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) TESCAN VEGA3, который укомплектован системой локального микроанализа (МРСА) производства Oxford Instruments и программным обеспечением Aztec при увеличениях от  $\times 200$  до  $\times 5000$ .

Анализ тонкой структуры проводился посредством просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) JEOL JEM 1400.

Первичный контроль сварных соединений выполняли с помощью рентгеновского источника типа ICM CP 120 и цифрового приемника Teledyne Dalsa 6K. Качество сварных соединений оценивали с использованием рентгеновской компьютерной томографии.

Испытания образцов из исследуемых алюминиевых сплавов, а также их сварных соединений, на склонность к межкристаллитной коррозии проводились в растворе, содержащем: 3%-ный раствор хлористого натрия плюс 1%-ный раствор соляной кислоты (30 г/л хлористого натрия плюс 10 мл/л соляной кислоты плотностью 1,19 г/см<sup>3</sup>), температура раствора 18–25°C, продолжительностью 24 ч.

**В главе 3** представлены результаты исследования свариваемости листов исследуемого сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn в условиях сварки плавлением. Оценку склонности к трещинообразованию при сварке сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn осуществляли с использованием карточек толщиной 2,5 мм и размерами 100×60 мм с направлением прокатки по более длинной стороне.

Результаты определения коэффициента трещинообразования и критической скорости деформирования при сварке исследуемого сплава, приведены в таблице 2.

Для сплава  $Al-1Ca-5,5Zn-1,5Mg-0,5Mn$  коэффициент трещинообразования по пробе «рыбий скелет» находится в пределах 51...58%. Для крестовой пробы значения коэффициента трещинообразования находятся в пределах 45...55%, что можно объяснить меньшей точностью данной пробы. Наблюдается тенденция к увеличению коэффициента трещинообразования с увеличением тока дуги при соответствующем росте объема сварочной ванны.

В общем можно отметить, что свариваемость сплава  $Al-1Ca-5,5Zn-1,5Mg-0,5Mn$  находится на уровне свариваемости термоупрочняемого алюминиевого сплава 1915 (таблица 2).

Таблица 2 – Показатели свариваемости алюминиевых сплавов

| Сплав                      | Ток дуги, А | Коэффициент трещинообразования $K$ , % по пробе |              | Критическая скорость деформации $A_{кр}$ , мм/мин |
|----------------------------|-------------|-------------------------------------------------|--------------|---------------------------------------------------|
|                            |             | крестовая                                       | рыбий скелет |                                                   |
| $Al-1Ca-5,5Zn-1,5Mg-0,5Mn$ | 85          | 38                                              | 47           | 3,1                                               |
|                            | 90          | 45                                              | 51           | 2,8                                               |
|                            | 95          | 50                                              | 55           | 2,5                                               |
|                            | 100         | 55                                              | 58           | 2,1                                               |
| 1915                       | —           | 55                                              | 60           | 2,0                                               |

Внешний вид трещин на пробе «рыбий скелет» для исследуемого сплава  $Al-1,0Ca-5,5Zn-1,5Mg-0,5Mn$  показан на рисунке 2. Наблюдается формирование магистральной трещины по оси шва. Результаты исследований поверхности излома по трещине позволили установить, что поверхность горячих трещин на пробе в металле шва представляет собой межкристаллитный разлом с упорядоченной дендритной структурой.



Рисунок 2 – Внешний вид образцов пробы «рыбий скелет» из исследуемого сплава  $Al-1Ca-5,5Zn-1,5Mg-0,5Mn$

Результаты исследований показали, что дополнительное легирование сплава  $Al-1Ca-5,5Zn-1,5Mg-0,5Mn$  цирконием в количестве 0,2 мас.% и скандием в количестве 0,12 мас.% способствует снижению коэффициента трещинообразования по пробе «рыбий скелет» до значения 21–27% при соответствующем увеличении критической скорости деформации до 4,4–4,8 мм/мин.

Для оценки влияния скандия на структуру металла шва были подготовлены шлифы сварного шва в плане (рисунок 3). Из приведенных фотографий видно, что при легировании скандием наблюдается разрушение центрального кристаллита в шве и формирование равноосной мелкозернистой структуры (рисунок 3б).

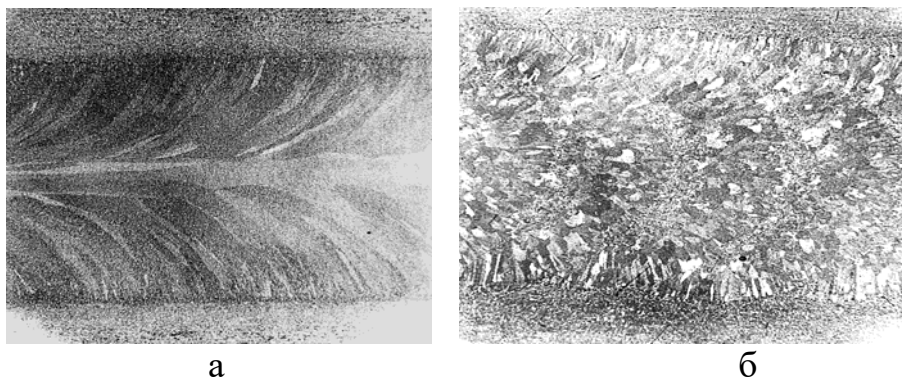


Рисунок 3 – Макроструктура шва в плане сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn без легирования (а) и с легированием 0,12 масс.% скандия (б). Сварка без присадочной проволоки (x15)

Установлено, что применение присадочной проволоки приводит к существенному снижению коэффициента трещинообразования по пробе «рыбий скелет» и критической скорости деформирования. При этом наиболее высокая стойкость исследуемых сплавов к трещинообразованию наблюдается при использовании для сварки присадочной проволоки Св1575, легированной скандием, и при наличии скандия в основном материале (коэффициент трещинообразования 1,2% при критической скорости деформации 7,4 мм/мин).

Для оценки склонности исследуемых сплавов системы Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn к порообразованию при сварке плавлением оценивали при проплавлении дугой в аргоне целой пластины без стыка. С лицевой стороны соединения дефектов, выходящих на поверхность шва, обнаружено не было. Со стороны проплава отмечается вспучивание оксидной пленки без нарушения ее целостности. Оксидная пленка полностью покрывает поверхность проплава шва.

Для более детального анализа распределения пор в образце сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn была проведена компьютерная томография сварного соединения. С помощью компьютерной томографии можно видеть, что сварной шов поражен пористостью (рисунок 4).

Большая часть пор сосредоточена в верхнем слое шва ближе к его лицевой поверхности, что говорит об их кристаллизационном происхождении. Видно, что поры закрытого типа, несквозные. При этом поры распределены равномерно в верхней части шва, что не должно сильно снижать показатели угла изгиба сварного шва, как это было бы при сосредоточении пор по краям шва.

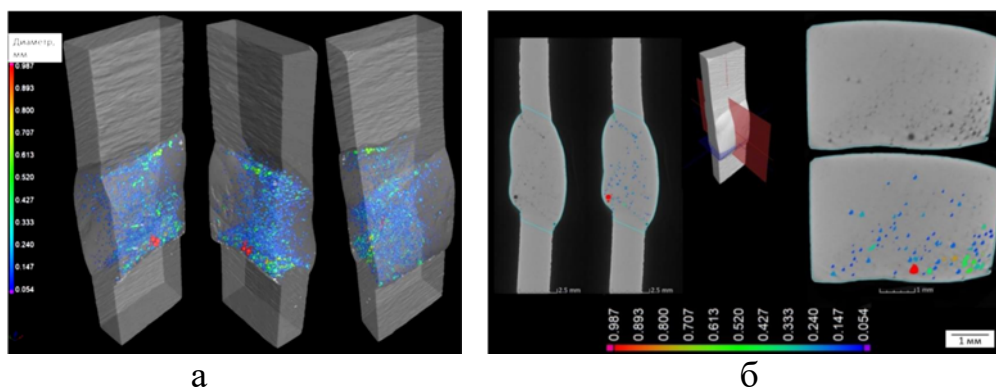


Рисунок 4 – Томограмма (а) и томографические срезы сварного шва (б) сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn

Для устранения пористости при сварке плавлением листов алюминиевых сплавов в настоящее время широко применяется химическое травление заготовок в щелочи с последующим осветлением в 30%-ном растворе азотной кислоты. В качестве альтернативного метода подготовки поверхности алюминиевых сплавов к сварке плавлением в последнее десятилетие получил свое развитие метод лазерной очистки сканирующим лазерным излучением. Установлено, что после лазерной очистки наблюдается существенное изменение цвета поверхности листа сплава с темно-серого Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn (для исходного состояния) до светлого матово-серебристого после лазерной очистки.

Результаты анализа структуры оксидной пленки на поверхности листа сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn после лазерной очистки и химического травления приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Толщина и фазовый состав оксидной пленки листов сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn после различных методов подготовки

| Параметр                       | Исходное состояния                                                               | Механическая зачистка металлической щеткой                                 | Химическое травление в щелочи с осветлением в 30%-ном растворе HNO <sub>3</sub>   | Лазерная зачистка поверхности                                             |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Толщина оксидной пленки, мкм   | 265–340                                                                          | 188–220                                                                    | 12–19                                                                             | 15–28                                                                     |
| Фазовый состав оксидной пленки | MgO + ZnO + Mg(OH) <sub>2</sub> + AlOOH + α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> • MgO | ZnO + Mg(OH) <sub>2</sub> + AlOOH + α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> • MgO | AlOOH + α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> • MgO + γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> • MgO + γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |

Суммарная толщина оксидной пленки после лазерной очистки несколько больше, чем после химического травления. В тоже время в структуре оксидной пленки отсутствует соединение AlOOH, диссоциация которого при нагреве может служить источником поступления водорода в расплав сварочной ванны.

Показано, применение лазерной очистки поверхности позволяет снизить

количество и средний диаметр пор по сравнению с зачисткой механической щеткой примерно в 2 раза. По этому показателю лазерная очистка поверхности листов сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn практически равноценна химическому травлению.

Результаты гидростатического взвешивания приведены на рисунке 5. Из приведенного рисунка видно, что применение лазерной очистки поверхности листов сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn позволяет практически полностью исключить пористость в металле шва при лазерной сварке.

В главе 4 приведены результаты исследований структуры и комплекса механических свойств листов сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn, выполненных сваркой плавлением (автоматическая аргонодуговая и лазерная сварка). Результаты механических испытаний сварных соединений приведены в таблице 4. Сварные соединения листов с усилением на лицевой поверхности шва разрушались при растяжении по границе сплавления шва с основным металлом (по зоне сплавления) или на расстоянии 3–5 мм от границы шва, а образцы без технологического утолщения (после механической обработки) – в центральной части шва.

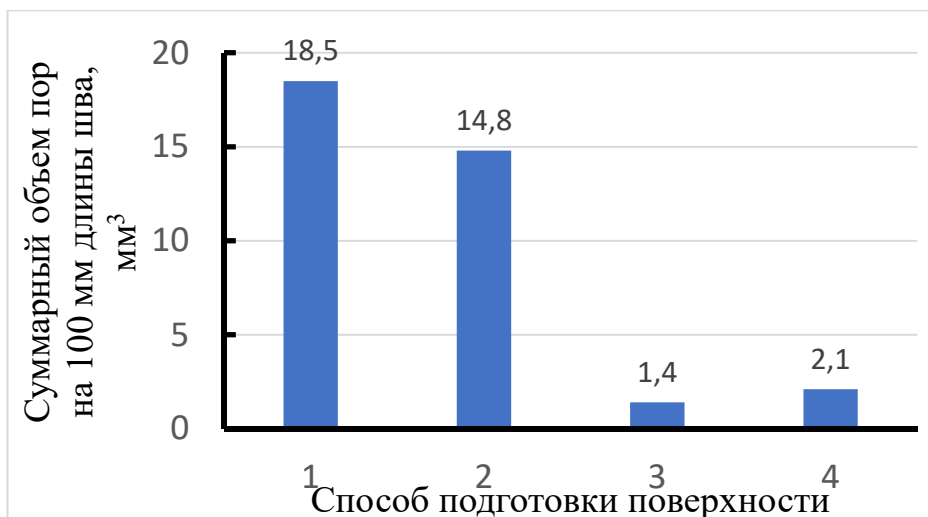


Рисунок 5 – Влияние способа подготовки поверхности листов сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn под сварку на пористость сварных швов; 1 – без подготовки; 2 – механическая зачистка щеткой; 3 – травление в щелочи NaOH с осветлением в 30%-ном растворе HNO<sub>3</sub>; 4 – лазерная очистка поверхности

Таблица 4 – Механические свойства сварных соединений сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn, легированного цирконием и скандием, полученных автоматической аргонодуговой сваркой

| Присадочная проволока | Временное сопротивление сварного соединения $\sigma_b$ , МПа | Коэффициент прочности сварного соединения | Временное сопротивление металла шва $\sigma_b^{\text{III}}$ , МПа | Угол изгиба $\alpha$ , град. |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| СвАМг63               | $\frac{285,7-296,4}{284,3}$                                  | 0,84                                      | $\frac{161,7-166,9}{165,4}$                                       | $\frac{50-72}{58}$           |
| Св1575                | $\frac{294,6-302,7}{298,3}$                                  | 0,89                                      | $\frac{176,7-188,4}{183,1}$                                       | $\frac{72-86}{78}$           |

Для исследуемого сплава  $Al-1Ca-5,5Zn-1,5Mg-0,5Mn$  коэффициент прочности соединения при сварке с проволокой СвАМг63 находится на уровне 0,83–0,84, а с проволокой Св1575 – на уровне 0,89.

Значения угла изгиба сварных соединений исследуемого сплава находятся на среднем уровне в диапазоне 45–60°. Только в случае сочетания легирования основного металла скандием и присадочной проволоки (Св1575) удалось достичь достаточно высоких значения угла изгиба 72–86°.

Микроструктура металла сварного шва в основном содержит магнийсодержащую фазу, по-видимому,  $Al_3Mg_2$ . Указанная фаза имеет вид неравномерных прожилок на фоне твердого раствора магния в алюминии. Следует отметить, что в структурах основного металла и металла сварного шва отсутствуют фазы с грубой морфологией, что, вероятно, является следствием относительно высокой скорости охлаждения при формировании шва.

В зависимости от ответственности конструкции и толщины свариваемого стыка оговаривается максимально допустимый диаметр единичных пор, больше которого необходимо исправлять дефектное место выборкой механическим путем с повторной его подваркой. Результаты механических испытаний показывают, что подварки при выполнении основного шва автоматической аргонодуговой сваркой (ААрДЭС) оказывают заметное влияние на прочностные и пластические свойства сварных соединений. Установлено, что при условии сохранения высоких прочностных и пластических свойств сварных соединений допускается трехкратная подварка дефектного участка шва.

Показано, что отжиг после сварки позволяет снизить уровень остаточных напряжений в сварных соединениях исследуемого сплава. С повышением температуры отжига наблюдается снижение уровня остаточных напряжений для соединений, полученных сваркой плавлением. Также можно констатировать, что увеличивать температуру отжига выше 350–400 °С нецелесообразно.

В таблице 5 представлены механические свойства сварных соединений листов исследуемого сплава, выполненные лазерной сваркой с присадочной проволокой Св1575.

Таблица 5 – Механические свойства сварных соединений листов сплава  $Al-1Ca-5,5Zn-1,5Mg-0,5Mn$ , выполненные лазерной сваркой

| Вариант подготовки поверхности под сварку | Временное сопротивление при растяжении $\sigma_B$ , МПа | Коэффициент прочности сварного соединения K | Временное сопротивление металла шва $\sigma_B^{\text{ш}}$ , МПа | Угол изгиба $\alpha$ , град. |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Химическое травление                      | <u>216,8–270,2</u><br>245,6                             | 0,74                                        | <u>161,7–167,4</u><br>164,6                                     | <u>50–62</u><br>54           |
| Лазерная очистка                          | <u>227,2–248,1</u><br>235,3                             | 0,71                                        | <u>155,7–157,9</u><br>156,8                                     | <u>44–54</u><br>52           |
| Зачистка металлической щеткой             | <u>152,6–207,1</u><br>179,1                             | 0,54                                        | <u>141,6–149,5</u><br>144,7                                     | <u>37–48</u><br>43           |



Из приведенной таблицы 5 видно, что коэффициент прочности сварного соединения в случае химической технологии подготовки поверхности листов под сварку составляет 0,74. Разрушение сварных соединений происходит по зоне термического влияния сварного соединения. В случае применения лазерной очистки поверхности листов перед сваркой коэффициент прочности немного снижается до 0,71. Значения угла изгиба сварных соединений исследуемых сплавов находятся на среднем уровне в диапазоне 37–60°, что свидетельствует о невысоких пластических свойствах сварных соединений.

Показатели твердости по сечению образцов сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn примерно аналогичны. Выявлено, что характер изменения механических свойств в результате отжига сильно зависит от химического состава присадочной проволоки (рисунок 6). Измерение проводили по длине поперечно-вырезанных плоскопараллельных образцов с шагом 1 мм.

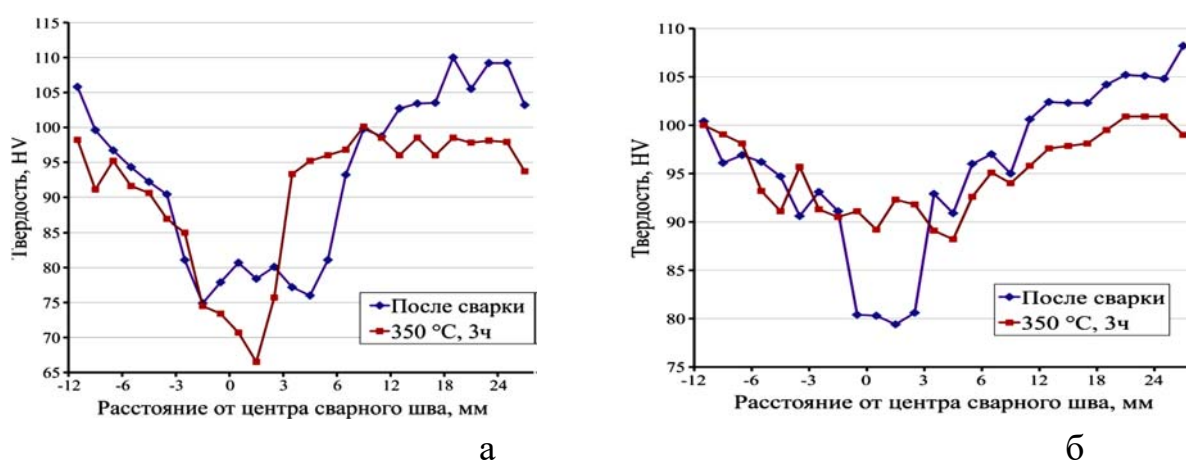


Рисунок 6 – Твердость образцов сварного соединения сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn, выполненных с присадочной проволокой Св1575 (а) и с проволокой аналогичного химического состава с основным металлом

Отжиг образцов при 350 °C приводит к повышению твердости зоны сварного соединения, полученного с использованием сварочной проволоки химического состава, близкому к составу основного материала. Наблюдаемое повышение твердости связано с формированием в процессе отжига упрочняющих наночастиц фазы  $Al_3(Zr,Sc)$  структурного типа L12, средний размер которых, составляет порядка 20 нм. Формирование упрочняющих наночастиц приводит к относительному выравниванию показателей твердости в образце.

Для подробного анализа влияния состава присадки на механические свойства были получены свойства в исходном состоянии (после сварки) и в отожженном состоянии образцов исследуемого сплава (таблица 6). Коэффициент прочности, показывающий разницу между временным сопротивлением сварного соединения и основного металла, составляет 80% для отожженного образца, выполненного с присадочной проволокой Al–Ca. Коэффициенты других образцов примерно аналогичны и находятся в пределах 72–75%.



Таблица 6 – Сравнение механических свойств сварных образцов сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn, полученных с различными присадочными материалами

| Присадочная проволока | Состояние образца | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | Коэффициент прочности сварного соединения $K$ , % |
|-----------------------|-------------------|------------------|----------------------|--------------|---------------------------------------------------|
| Св1575                | После сварки      | 238±3            | 149±4                | 2,7±0,4      | 72,4                                              |
|                       | Отожженное        | 246±7            | 174±4                | 2,3±0,2      | 74,8                                              |
| AlCa                  | После сварки      | 247±3            | 169±4                | 3,1±0,4      | 75,3                                              |
|                       | Отожженное        | 274±2            | 181±20               | 2,9 ±0,8     | 80,1                                              |

В главе 5 представлены результаты исследования структуры и механических свойств сварных соединений листов сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn, выполненных сваркой трением с перемешиванием (сварка в твердой фазе).

Анализ твердости по профилю полученного сварного соединения не выявил существенных отличий для различных характерных зон, выделяемых при получении соединений методом СТП. В частности, в зоне перемешивания сварного соединения твердость несколько выше, чем в основном металле. В зоне термомеханического воздействия со стороны отхода рабочего инструмента наблюдается локальное снижение твердости до уровня 100–103 HV.

Результаты анализа микроструктуры сварного соединения и прилегающей области показали, что явной границы между основным металлом и зоной термического влияния не наблюдается. Характерная деформированная структура основного металла переходит в область, которая может быть охарактеризована как зона термомеханического влияния со структурой, существенно отличающейся от исходной. В зоне перемешивания в сравнении с основным металлом наблюдается глубокое измельчение кристаллов эвтектической фазы (Al,Zn)<sub>4</sub>Ca и их более равномерное распределение по сечению. Аналогичным образом наблюдаются равномерно распределённые эвтектические кристаллы, основная доля которых обладает средним поперечным размером не более 4,5–5 мкм.

Результаты анализа тонкой структуры зоны перемешивания сварного соединения, полученные с использованием метода ПЭМ, представлены на рисунке 7. Из рисунка 7а можно видеть формирование весьма дисперсной зеренной структуры со средним размером зерна порядка 1 мкм. Формирование наблюдаемой зеренной структуры, скорее всего, имеет место в процессе динамической рекристаллизации, протекающей при получении сварного соединения методом СТП.

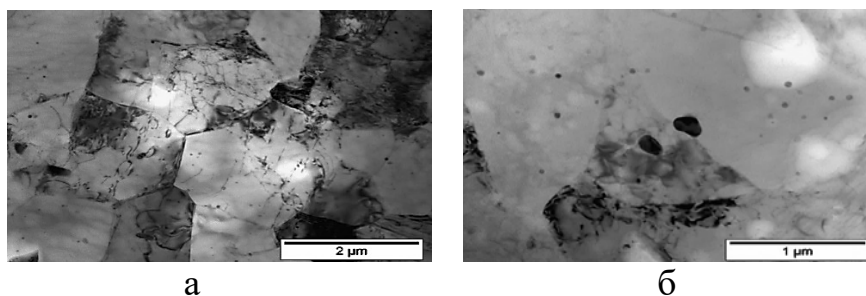


Рисунок 7 – ПЭМ изображения структуры шва (зоны перемешивания) сварного соединения. а) Общий вид зеренной структуры и б) наличие дисперсных включений, обнаруживаемых также по границам зерен

Подробные результаты механических испытаний сварных соединений сплава  $\text{Al-1Ca-5,5Zn-1,5Mg-0,5Mn}$ , выполненных сваркой трением с перемешиванием, представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Механические свойства горячекатанных листов сплава  $\text{Al-1Ca-5,5Zn-1,5Mg-0,5Mn}$ , выполненных СТП

| Образец            | Предел прочности $\sigma_B$ , МПа | Коэффициент прочности $K$ | Предел прочности металла шва $\sigma_B^{\text{ш}}$ , МПа | Угол изгиба $\alpha$ , град. | Область разрушения соединения при испытаниях                                  |
|--------------------|-----------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Основной металл    | <u>305–312</u><br>308             | –                         | –                                                        | <u>15–22</u><br>18           | –                                                                             |
| Сварное соединение | <u>304–315</u><br>308             | 0,99–1                    | <u>317–326</u><br>320                                    | <u>35–44</u><br>38           | По зоне термомеханического воздействия со стороны отхода рабочего инструмента |

В рамках проводимых в диссертационной работе исследований были проведены эксперименты по сварке трением с перемешиванием заготовок из сплава  $\text{Al-1Ca-5,5Zn-1,5Mg-0,5Mn}$  в литом и горячекатанном состояниях. Механические свойства сварных соединений исследуемых заготовок приведены в таблице 8.

В обоих вариантах расположения литой заготовки относительно направления вращения рабочего инструмента достигаются примерно одинаковые значения прочности сварного соединения и угла его изгиба. Коэффициент прочности относительно литой заготовки составляет 0,99–1, а относительно горячекатанной – 0,71–0,72. Угол изгиба при этом находится на уровне 44–50°.

Таблица 8 – Механические свойства соединений листов сплава Al–1,0Ca– 5,5Zn– 1,5Mg–0,5Mn в сочетании литого и горячекатанного состояния, выполненных СТП

| Положение литой заготовки относительно направления вращения инструмента | Предел прочности сварного соединения $\sigma_B$ , МПа | Коэффициент прочности $K_1$ относительно литой заготовки | Коэффициент прочности $K_2$ относительно горячекатанной заготовки | Зона разрушения сварного соединения    | Предел прочности металла шва $\sigma_B^{\text{III}}$ , МПа | Угол изгиба $\alpha$ , град. |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Со стороны набегания                                                    | <u>232–247</u><br>240                                 | 1                                                        | 0,72                                                              | По зоне ТМВ со стороны литой заготовки | <u>340–352</u><br>345                                      | <u>48–52</u><br>50           |
| Со стороны отхода                                                       | <u>228–245</u><br>235                                 | 0,98                                                     | 0,71                                                              |                                        | <u>340–352</u><br>345                                      | <u>42–48</u><br>46           |

Для соединений СТП листов сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn можно допустить трехкратную подварку дефектного участка повторными проходами СТП. Металлографическими исследованиями не выявлено существенного роста среднего размера зерна в зоне перемешивания при увеличении числа проходов при подварке дефекта. Временное сопротивление металла шва после подварки АрДС занимает промежуточное положение между значениями, характерными для СТП и АрДС. По-видимому, временное сопротивление металла шва после подварки будет определяется во многом той площадью в поперечном сечении шва, которую займет расплавленный металл при выполнении подварки АрДС.

Можно отметить высокую термическую стабильность микроструктуры зоны перемешивания соединения СТП листов сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn, проявляющуюся в отсутствии аномального роста зерна при нагреве до температур 500–540 °С. В основе такой термической стабильности, по-видимому, находится наличие в структуре выделений в виде фаз Al<sub>4</sub>Ca.

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

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

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЫ

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

1. Установлено, что для листов сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn коэффициент трещинообразования по пробе «рыбий скелет» находится в пределах 51–58%. Легирование цирконием привело к снижению показателей стойкости против образования трещин при сварке. Дополнительное легирование скандием листов сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn особенно благотворно сказывается на снижении склонности сплава к трещинообразованию – коэффициент трещинообразования снижается на 21–27%.

2. Применение присадочной проволоки приводит к повышению критической скорости деформирования: 7,1 мм/мин для проволоки СвАМг63 и 7,4 мм/мин для проволоки Св1575 соответственно. При этом наиболее высокая стойкость листов исследуемого сплава к трещинообразованию наблюдается при использовании для сварки присадочной проволоки, легированной скандием, и при наличии скандия в основном материале.

3. Для снижения вероятности образования пор в металле шва исследуемых сплавов требуется сочетание следующих мер: уменьшение количества растворенного водорода в основном металле до 0,48 см<sup>3</sup>/100 г, тщательное соблюдение технологии подготовки свариваемых кромок под сварку и создание при сварке условия для интенсивной пузырьковой дегазации сварочной ванны. Показано, что лазерная очистка поверхности позволяет снизить количество и средний диаметр пор по сравнению с зачисткой механической щеткой примерно в 2–2,5 раза и по качеству соединений равноценна химическому травлению листов перед сваркой.

4. Исследованы механические свойства сварных соединений листов сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn при автоматической аргодуговой сварке с присадочными проволоками СвАМг63 и Св1575. Установлено, что бездефектные сварные соединения при испытаниях на растяжение имеют прочность на уровне 0,79–0,89 от временного сопротивления основного металла. Временное сопротивление литого металла шва в зависимости от применяемой присадочной проволоки находится в диапазоне 144–165 МПа (проволока СвАМг63) и 158–185 МПа (проволока Св1575).

5. Установлено, что бездефектные сварные соединения, полученные автоматической лазерной сваркой с присадочной проволокой Св1575, при испытаниях на растяжение имеют прочность на уровне 0,74–0,79 от временного сопротивления основного металла. Разрушение соединений при испытаниях на растяжение происходит по зоне сплавления.

6. Проведение отжига сварных соединений листов сплавов системы Al–Ca–Zn–Mg при температуре 350–400 °С при выдержке 3 часа приводит к релаксации остаточных напряжений в сварном соединении до уровня 10–15 МПа. При этом наблюдается упрочнение сварных соединений образцов, полученные с использованием проволоки химического состава, аналогичного химическому составу листов сплава, в результате выделения когерентных наночастиц фазы L12. В частности, такой эффект привел к повышению временного сопротивления с 247 МПа до 274 МПа, что составляет 80% от показателя прочности основного металла.

7. Получены качественные бездефектные сварные соединения листов сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn в горячекатанном состоянии методом сварки трением с перемешиванием. Коэффициент прочности соединений близок к 1. Разрушение соединений при испытаниях на растяжение происходит по зоне термомеханического воздействия.

8. Получены бездефектные стыковые соединения заготовок сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn в литом и горячекатанном состоянии сваркой трением с перемешиванием. Параметры режима СТП остаются неизменными при

изменении положения литой и горячекатанной заготовки относительно направления вращения рабочего инструмента.

9. Прочностные свойства соединений заготовок сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn в литом и горячекатанном состоянии при СТП определяются пределом прочности литой заготовки. При этом коэффициент прочности соединения составляет 0,99–1 относительно прочности литого материала.

10. Выявлена высокая термическая стабильность микроструктуры зоны перемешивания соединения СТП листов сплава Al–1Ca–5,5Zn–1,5Mg–0,5Mn при нагреве до 540 °С в течение 1–15 минут. В основе такой термической стабильности, по-видимому, лежат выделения частиц фазы Al<sub>4</sub>Ca в структуре зоны перемешивания.

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

1. Овчинников В.В. Показатели свариваемости при сварке плавлением перспективных алюминиевых сплавов на основе системы Al–Ca–Zn–Mg. / В.В. Овчинников, Т.К. Акопян, Е.О. Проценко, Д.А. Поляков // Научные технологии в машиностроении. 2023. – №4. – С.11–23. [doi.org/ 10.30987/2223-4608-2023-11-23](https://doi.org/10.30987/2223-4608-2023-11-23).

2. Овчинников В.В. Свариваемость новых алюминий-кальциевых сплавов, легированных цинком и магнием, при сварке плавлением. / В.В. Овчинников, Я.М. Глухих, Е.О. Проценко. // Электromеталлургия. 2024. – 0. – №1. – С.3–15. DOI: 10.31044/1684-5781-2024-0-1-3-15.

Ovchinnikov V.V. Weldability of New Aluminum–Calcium Alloys with Zinc and Magnesium during Fusion Welding. / V.V. Ovchinnikov, Ya. M. Glukhikh, E.O. Protsenko. // Russian Metallurgy (Metally), Vol. 2024, No. 6, pp. 537–546. DOI: 10.1134/S0036029524700915.

3. Овчинников В.В. Влияние циркония и скандия на склонность к трещинообразованию при сварке сплавов на основе Al–Ca–Zn–Mg и механические свойства их сварных соединений. / В.В. Овчинников, Т.К. Акопян, Е.О. Проценко, Я.М. Клочков // Металлург. 2024. – №9. – С.43–49. DOI: 10.52351/00260827\_2024\_9\_43.

Ovchinnikov V.V. Influence of zirconium and scandium on crack susceptibility during welding of Al–Ca–Zn–Mg alloys and mechanical properties of their welded joints. / V.V. Ovchinnikov, T.K. Akopyan, E.O. Protsenko, Ya.M. Klochkov. // Springer Science + Business Media, LLC, part of Springer Nature 2024. 20 December 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-024-01842-y>.

4. Овчинников В.В. Лазерная сварка листов алюминиевого сплава системы Al–Ca–Mg. / В.В. Овчинников, Е.О. Проценко, Я.М. Клочков. // Электromеталлургия. 2025 – 0 – №4 – С.12–20. DOI: 10.31044/1684-5781-2025-0-4-12-20.

Ovchinnikov V. V. Laser Welding of Al–Ca–Mg Alloy Sheets. / V.V. Ovchinnikov, E.O. Protsenko, Ya.M. Klochkov. // Russian Metallurgy (Metally), Vol. 2025, No. 1, pp. 23–29. DOI: 10.1134/S0036029525700752.

5. Овчинников В.В., Проценко Е.О., Клочков Я.М. Механические свойства и структура сварных соединений листов алюминиевого сплава Al–Ca–Mg,

выполненных аргонодуговой сваркой. / В.В. Овчинников, Е.О. Проценко, Я.М. Клочков. // Материаловедение. 2025. 0. – 5. – С.3–10. DOI: [10.31044/1684-579X-2025-0-5-3-10](https://doi.org/10.31044/1684-579X-2025-0-5-3-10).

Ovchinnikov V. V., Protsenko E.O., Klochkov Ya.M. Mechanical properties and structure of welded joints of the sheets of aluminum alloys of the Al-Ca-Zn-Mg system performed by automatic argon–arc welding. / V.V. Ovchinnikov, E.O. Protsenko, Ya.M. Klochkov.// Metallurgist. doi.org/10.52351/00260827\_2024\_12\_71.