

УДК 621.791:669.715

ГРНТИ 81.35

На правах рукописи



Зыков Сергей Алексеевич

**ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ
СВАРКИ НА СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ
СПЛАВОВ ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

Специальность: 05.02.10 – «Сварка, родственные процессы и технологии»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2016

Работа выполнена в **Федеральном государственном унитарном предприятии**
«Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов
«Прометей»

Научный руководитель:

Кандидат технических наук, доцент,
Павлова Вера Ивановна

Официальные оппоненты:

Овчинников Виктор Васильевич

Доктор технических наук, профессор,
АО «Российская самолетостроительная
корпорация «МиГ», начальник лаборатории
сварки

Кноринг Семен Давыдович

Кандидат технических наук, старший
научный сотрудник, ФГУП «Крыловский
государственный научный центр»,
старший научный сотрудник

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский государственный
морской технический университет

Защита состоится «30» ноября 2016 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета Д411.006.01 при Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» по адресу: 191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» и на сайте: <http://dissovet.cris-m-prometey.ru/ThesisDetails.aspx?id=12>

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д411.006.01,

доктор технических наук, профессор



Малышевский В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Рост энергопотребления в мире приводит к поиску и освоению все более эффективных энергоисточников, к которым относится сжиженный природный газ (СПГ). Транспортировка газов на протяженные расстояния, исключая применение трубопроводов, осуществляется судами-газовозами, сферические резервуары которых, в частности конструкции типа «MOSS», составляющих на сегодняшний день 41% мирового флота, изготавливаются из зарубежного алюминиевого сплава типа 5083, признанного всеми международными классификационными обществами.

Отечественным аналогом, близким по своим свойствам зарубежному сплаву, является алюминиево-магниевый сплав 1550, широко применяемый в изготовлении изделий криогенного применения.

Сплавы 5083 и 1550 в отожженном состоянии при комнатной температуре имеют невысокие гарантированные прочностные свойства: временное сопротивление $\sigma_b \geq 275$ МПа, условный предел текучести $\sigma_{0,2} \geq 135$ МПа.

Необходимость увеличения водоизмещения строящихся судов-газовозов делает актуальным вопрос повышения эксплуатационных характеристик конструкций систем хранения груза газовозов.

С целью обеспечения возможностей освоения производства судов-газовозов промышленностью России ФГУП «Крыловский государственный научный центр» совместно с ОАО «Центр технологии судостроения и судоремонта» в рамках выполнения инновационного проекта по ФЦП «Развитие гражданской морской техники» на 2009–2016 гг. разработаны принципиальные технические решения по использованию современных конструкционных материалов применительно к созданию грузовых емкостей СПГ. Среди рассмотренных материалов для танков судов-газовозов экономически целесообразным признано применение более прочных деформируемых термически неупрочняемых алюминиевых сплавов.

К таким сплавам относится новый, разработанный с участием ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», деформируемый алюминиево-магниевый сплав марки 1565ч, содержащий (5,5–5,9 %) магния. Сплав 1565ч в отожженном состоянии при комнатной температуре характеризуется прочностными свойствами, превышающими на 20–25 % аналогичные характеристики сплавов 5083 и 1550 (временное сопротивление – $\sigma_b \geq 335$ МПа, условный предел текучести $\sigma_{0,2} \geq 175$ МПа), и отвечает основным условиям пригодности материала для использования при криогенных температурах.

Деформируемые алюминиевые сплавы 1550, 1565ч, наряду с широко применяемым в зарубежной практике сплавом 5083, включены в перечень материалов, используемых в системах хранения груза газозовов, для морских конструкций, поднадзорных Российскому морскому регистру судоходства (РМРС).

Учитывая жесткие требования к сварным конструкциям грузовых емкостей, предназначенных для хранения и транспортирования СПГ, возникает необходимость разработки технологии сварки деформируемых алюминиевых сплавов 1550 и 1565ч, разработки требований по выбору присадочных материалов и требований к сварным соединениям.

Отсутствие сведений по всесторонней оценке прочностных и пластических свойств металла различных участков сварных соединений этих сплавов при статическом, динамическом и циклическом нагружении в условиях низких температур определяет необходимость исследования влияния конструктивных и технологических факторов сварки на обеспечение стабильности качества и повышение механических свойств сварных соединений из алюминиевых сплавов при криогенной температуре.

Эффективность использования алюминий-магниевого сплава в конструкциях криогенного назначения определяется прочностными характеристиками сварных соединений в условиях низких температур, при этом максимальная реализация достигается в случае идентичности характера низкотемпературного упрочнения, свойственного основному металлу, у которого происходит увеличение прочности на 30–40% при температуре 77 К. Более высокие значения предела текучести и предела прочности при низкой температуре, которые свойственны основному металлу, в случае их реализации в сварных соединениях могут быть учтены при назначении допускаемых напряжений, возникающих в стенках грузовых емкостей, что дополнительно обеспечит снижение металлоемкости и увеличение полезного груза.

Работа выполнялась в рамках инновационных проектов и хозяйственных договоров, в том числе по Федеральной целевой программе «Развитие гражданской морской техники» 2009–2016 гг. ОКР «Разработка конкурентоспособных криогенных конструкционных материалов из свариваемых коррозионно-стойких алюминиевых сплавов для проектирования и строительства газозовов, работающих в условиях Крайнего Севера» («Криоген»).

Цель работы – разработка технологии сварки плавлением деформируемых алюминий-магниевого сплава 1565ч и 1550, впервые допущенных к применению в системах хранения груза газозовов, обеспечивающей высокий эксплуатационный ресурс

и надежность сварных конструкций при криогенных температурах.

Задачи исследования:

1. Установление зависимости механических свойств наплавленного металла от химического состава, технологических факторов (способа и режима сварки, тепловложения при многопроходном выполнении швов), температуры испытаний в диапазоне 77 К ÷ 293 К.

2. Оценка пригодности исследуемых марок присадочного материала к низкотемпературному применению на основе анализа коэффициентов, характеризующих чувствительность наплавленного металла к концентрации напряжений и вязкость в надрезе.

3. Обоснование выбора присадочных материалов для сварки деформируемых алюминиевых сплавов, работающих при криогенных температурах, и разработка требований к сварным соединениям и сварочным материалам.

4. Разработка технологии аргодуговой сварки плавлением деформируемых алюминий-магниевого сплава 1565ч и 1550 применительно к морским конструкциям криогенного применения.

5. Установление зависимости механических свойств сварных соединений в диапазоне температур 77 К – 293 К от химического состава основного и присадочного материала, способа сварки, технологических и конструктивных факторов оформления шва, температуры испытаний.

6. Исследование свойств сварных соединений из сплавов 1565ч и 1550 при статическом и циклическом нагружении в условиях криогенной температуры.

Методы исследования. При выполнении работ применяли стандартные методы определения прочностных свойств наплавленного металла и сварных соединений при статическом и динамическом нагружении в условиях комнатной и криогенной температур; атомно-эмиссионный спектральный анализ и микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) химического состава металла; металлографические исследования и методики усталостных испытаний и испытаний на трещиностойкость сварных соединений; статистическую обработку результатов испытаний дисперсионным и регрессионным методами.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Установлено, что для присадочных материалов из алюминиевых сплавов СвАМг5, СвАМг61 и Св1597 в наплавленном состоянии коэффициент чувствительности к надрезу, определяемый отношением прочности образца с надрезом (тип III по ГОСТ

22706) к прочности гладкого образца (тип II по ГОСТ 6996) ($\alpha = \sigma_B^{HT} / \sigma_B^T$), находится в пределах от 1,0 до 1,2; параметр вязкости, определяемый отношением прочности образца с надрезом к пределу текучести гладкого образца ($\alpha' = \sigma_B^{HT} / \sigma_{0,2}^T$), находится в пределах от 1,5 до 2,2. Полученные значения не ниже аналогичных показателей основного свариваемого металла из алюминиево-магниевых сплавов 1550 и 1565ч в деформируемом состоянии ($\alpha \geq 0,8$ и $\alpha' \geq 1,0$).

2. Установлено, что для металла в литом состоянии, наплавленного присадочным материалом из сплавов марок СвАМг5, СвАМг61 и Св1597, характерно низкотемпературное упрочнение с более низким темпом (15 ÷ 20 %), чем для алюминиевых сплавов 1550 и 1565ч в деформированном состоянии, темп роста прочности которых не ниже 30 %. Для реализации в сварных соединениях прочности при криогенной температуре не ниже 0,9 от прочности основного металла необходимо выбирать присадочный материал, прочность наплавленного металла которого не менее чем на 10 % превышает прочность свариваемого сплава.

3. Экспериментально установлено, что формирование шва присадочным материалом марки Св1597, содержащим скандий, сопровождается массопереносом скандия в зону сплавления. Благодаря этому происходит упрочнение металла зоны сплавления, что способствует повышению прочности сварных соединений алюминиево-магниевого сплава марки 1565ч в целом.

4. Экспериментально доказана возможность повышения прочности сварных соединений из нового алюминиево-магниевого сплава 1565ч при криогенных температурах до уровня не менее 0,9 от прочности основного металла за счет:

- использования высокопрочного присадочного материала, содержащего скандий, обеспечивающего упрочнение не только металла шва, но и металла зоны сплавления;
- конструктивно-технологического оформления шва наплавкой валиков по границе сплавления;
- применения способа сварки трением с перемешиванием металла толщиной до 10 мм.

Личный вклад автора заключается: в постановке задач исследований, подготовке и проведении экспериментов, анализе и обобщении результатов исследований в диапазоне температур 77 К – 293 К, разработке и освоении технологии сварки алюминиевых сплавов 1565ч и 1550 в толщинах 5–80 мм, разработке технической и нормативно-технической документации, подготовке материалов для патентования и

научных публикаций, представление результатов работы на отечественных и международных конференциях.

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. Влияние химического состава и структуры, способа сварки, внесенных тепловложений, температуры испытаний (77 К – 293 К) на механические свойства металла, наплавленного присадочными материалами различного химического состава (СвАМг61, Св1597, СвАМг5).

2. Влияние химического состава, структуры основного металла и металла шва, способа сварки, конструктивного оформления шва и температуры испытаний (77 К – 293 К) на механические свойства сварных соединений из алюминиевых сплавов марок 1565ч и 1550.

3. Обоснование выбора присадочного материала, обеспечивающего прочность сварных соединений листовых полуфабрикатов алюминиево-магниевых сплавов не ниже 0,9 прочности основного металла при криогенной температуре.

4. Результаты, полученные при разработке технологии импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом в защитном газе полуфабрикатов из деформируемых алюминиево-магниевых сплавов 1565ч и 1550 в широком диапазоне толщин.

Практическая значимость диссертационной работы

Проведена оценка влияния конструктивных и технологических факторов сварки на механические свойства сварных соединений из алюминиевых сплавов 1565ч и 1550, в том числе при криогенной температуре, с привлечением математико-статистических методов анализа обширной выборки экспериментальных данных, установлением зависимости между ними, оптимизацией параметров процесса сварки.

Установлено, что сварные соединения деформируемых алюминиевых сплавов 1565ч и 1550 с использованием соответствующей сплавам категории присадочного материала (СвАМг61 и СвАМг5) сохраняют свойства при температурах до 77 К, т.е. прочность сварных соединений при криогенной температуре не ниже прочности при комнатной температуре.

Исследованные прочностные и пластические свойства сварных соединений сплавов 1565ч и 1550 на растяжение, ударный изгиб, вязкость разрушения при комнатной и криогенной температурах, свидетельствуют о высокой вязкости металла и высокой работоспособности в условиях воздействия статических и циклических нагрузок, т.е. реализуют свойства сплавов 1565ч и 1550, являющихся перспективными импортозамещающими российскими конструкционными материалами, для изделий

криогенной техники.

Разработана и освоена технология полуавтоматической импульсно-дуговой сварки в защитном газе листов и плит толщиной от 5,0 до 80,0 мм из нового деформируемого алюминиевого сплава 1565ч и сплава 1550, впервые допущенных РМРС к применению в системе хранения груза газовозов. Новизна разработанной технологии сварки подтверждена патентом РФ № 2553769 от 17.09.2013 г.

Выпущена нормативная документация РД5.УЕИА3622 «Сварка типовых соединений из алюминиево-магниевого катаных листов и плит толщиной до 80 мм для конструкций емкостей газовозов. Технологическая инструкция», распространяющаяся на сварку разработанного сплава 1565ч и сплава 1550.

Разработаны требования к сварочным материалам и сварным соединениям при сварке полуфабрикатов алюминиевых сплавов 1565ч и 1550, которые одобрены РМРС для их включения в «Правила классификации и постройки морских судов», в том числе для применения в конструкциях систем хранения груза газовозов.

Внедрение результатов работы осуществлено: на производственной базе ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», где разработанная технология механизированной аргодуговой сварки плавящимся электродом в импульсном режиме алюминиево-магниевого сплава марок 1565ч и 1550 в широком диапазоне толщин использована при выполнении опытно-конструкторской работы «Криоген» и в производственном кооперативе «Центр научно-технических услуг «Прометей» при оптимизации технологии сварки загрузочных приспособлений для БИН с транспортировочной рамой из алюминиево-магниевого сплава полуфабрикатов толщиной 30, 50 и 70 мм.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены научной общественности и обсуждались на 8 конференциях, в том числе международных: Молодых ученых и специалистов ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» («ЦНИИ «КМ «Прометей», Санкт-Петербург, 20–22 июня 2012 г., 17–19 июня 2013 г.); «Алюминий-21» («Алюсил-МВиТ», Санкт-Петербург, 20–22 ноября 2012 г., 1–3 октября 2013 г.; 2–4 декабря 2014 г.); «Инновационные сварочные технологии в судостроении, производстве морской техники и строительстве береговых объектов – 2013» (Альянс сварщиков, Санкт-Петербург, 25–26 сентября 2013 г.); «Сварка и родственные технологии в экстремальных и особых условиях» («ЦНИИ «КМ «Прометей», Санкт-Петербург, 11–12 ноября 2014 г.); «Технологии сварки плавлением новых конструкционных материалов» (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, Москва, 25 сентября 2014 г.).

Публикации. По результатам работы опубликовано 9 научно-технических работ, из них 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, и 1 патент РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов по работе, библиографического списка из 121 наименований и приложений на 3 листах. Общий объем составляет 190 страниц печатного текста, включая 68 рисунков и 41 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, определена научная новизна, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, показаны практическая значимость и апробация работы.

В первой главе сделан обзор отечественной и зарубежной научно-технической информации по направлению диссертационной работы.

Особенности низкотемпературной эксплуатации изделий вызывают ужесточение технических требований к изделиям, в частности требуют обеспечения достаточной вязкости материала. Известно, что материалу с ГЦК-решеткой свойственны пластическая деформация и релаксация концентрации напряжений, что обеспечивает разрушение по вязкому механизму, т.к. их сдвиговая прочность всегда ниже сопротивления сколу.

Исследования механических свойств материалов при низких температурах служат основой для рационального выбора и эффективного использования материалов в конструкциях и аппаратах криогенного назначения. Принципы выбора материалов для использования в условиях низких температур изложены в трудах Д. А. Вигли, Ю. П. Солнцева, С. И. Гудкова и др.

Показано, что при использовании в области криогенных температур алюминиевые сплавы должны отвечать следующим основным требованиям:

- с понижением температуры испытания σ_B , $\sigma_{0,2}$ и δ сплава должны увеличиваться, а разница между σ_B и $\sigma_{0,2}$ сплава возрастать;
- прочность образцов с надрезом (σ_B^H) при низкой температуре должна быть больше, чем при комнатной, а также выше $\sigma_{0,2}$ при всех температурах: $(\sigma_B^H/\sigma_{0,2}) > 1$;
- чувствительность к надрезу, оцениваемая отношением прочности образца с надрезом к прочности гладкого образца ($\alpha = \sigma_B^{HT}/\sigma_B^T$), должна иметь значение не ниже 0,8 при всех температурах испытания.

Алюминиево-магниевые сплавы 1565ч и 1550 обладают необходимым комплексом свойств (прочность, пластичность, коррозионная стойкость), что обеспечивает их соответствие основным условиям пригодности для использования при криогенных

температурах.

Наиболее распространенными способами сварки плавлением алюминиевых сплавов являются аргонодуговые способы сварки неплавящимся электродом и плавящимся электродом.

Разупрочнение сварного соединения из алюминиевых сплавов обусловлено формированием неоднородности свойств металла на различных участках (шов, зоны сплавления и термического влияния), а также возможными сварочными дефектами, в том числе, в виде отдельных, допустимых по существующим правилам контроля дефектов металла шва.

Максимальную реализацию прочностных характеристик основного металла в сварных соединениях алюминий-магниевого сплава позволяют достичь технологические мероприятия (выбор состава присадочного металла, формирование мелкозернистой структуры металла шва, снижение термического воздействия на свариваемый металл) или конструктивные, направленные на снижение рабочих напряжений до уровня, допускаемого прочностью металла шва.

Рассмотрены и проанализированы требования Правил РМРС и МАКО (Международной ассоциации классификационных обществ), предъявляемые к деформируемым алюминий-магниевого сплавам, применяемым в морских конструкциях, конструкциях систем хранения груза газозовов и их сварным соединениям. Анализ показал, что необходимо разработать требования по выбору присадочных материалов и сварным соединениям сплавов 1565ч и 1550 предназначенных для применения в конструкциях систем хранения груза газозовов, и с последующим включением этих требований в Правила РМРС.

Вторая глава посвящена вопросам методологии исследования.

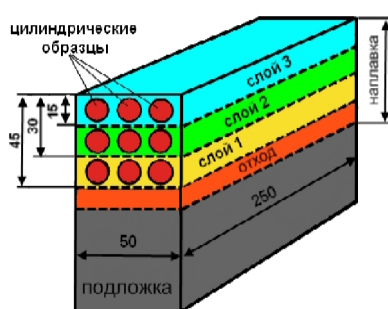
Объектами исследования являются – наплавленный металл и стыковые соединения. В качестве основного материала использованы деформированные полуфабрикаты (листы и плиты) из алюминий-магниевого сплава марок 1565ч и 1550 в отожженном состоянии (М) толщиной 5, 7, 10, 20, 40, 60, 80 мм. В качестве сварочных материалов использованы сварочные проволоки марок СвАМг5, СвАМг61 и Св1597; защитный газ – аргон высшего сорта; неплавящийся электрод – вольфрамовые прутки марки ЭВЧ. Способы сварки – ручная аргонодуговая сварка неплавящимся электродом (АрДС) на установке FAL TIG-400 AC/DC, полуавтоматическая аргонодуговая сварка плавящимся электродом в импульсном режиме (ИДСПЭ) на установке Multi 500KW и

сварка трением с перемешиванием металла (СТП) на специализированной установке, разработанной в ЦНИИ КМ «Прометей».

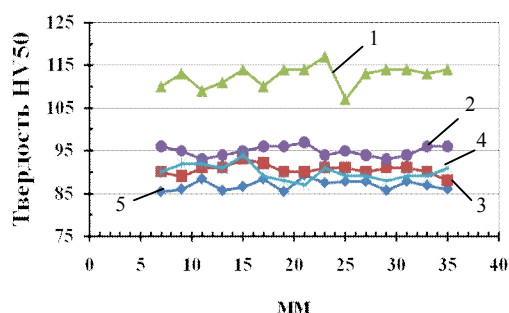
Приведены методики диссертационного исследования, включающие экспериментальные испытания образцов наплавленного металла и стыковых сварных соединений согласно которым произведены: оценка значимости влияния конструктивных и технологических факторов на механические свойства сварных соединений на стандартных образцах по ГОСТ 6996 в диапазоне температур 77 К – 293 К; испытания на вязкость разрушения при комнатной и криогенной температурах; статистическая обработка результатов испытаний. Представлены типы испытанных образцов и дана характеристика оборудования для исследований.

В третьей главе изложены результаты экспериментальных исследований металла, наплавленного присадочными материалами СвАМг5 (AlMg5,0Mn0,6), СвАМг61 (AlMg6,0Mn1) и Св1597 (AlMg6,0Mn1Sc), проведенных с целью оценки влияния повторных сварочных нагревов на структуру, состав и свойства наплавленного металла, а также для установления закономерностей изменения механических свойств в зависимости от состава присадочного материала, способа сварки, температуры испытаний (в диапазоне 77 К – 293 К) и наличия концентратора напряжений.

Установлено, что химический состав наплавленного металла в исследуемых зонах, различно расположенных по высоте наплавки (рисунок 1, а), находится в пределах, регламентированных нормативно-технической документацией на присадочные материалы, т.е. влияния способа наплавки (АрДС или ИДСПЭ) и повторяющихся нагревов наплавленного металла не выявлено.



а)



б)

Рисунок 1 – Схема разделки многослойной наплавки (а), характер распределения твердости в поперечном сечении проб наплавленного металла, выполненных АрДС с присадочной проволокой 1 – Св1597, 2 – СвАМг61, 3 – СвАМг5 и ИДСПЭ с присадочной проволокой 4 – СвАМг61, 5 – СвАМг5 (б).

Структура металла, наплавленного присадочными материалами СвАМг5 и СвАМг61 способами АрДС и ИДСПЭ, не имеет заметных отличий и представляет собой типичную для алюминиево-магниевого сплава литую структуру дендритного строения с выделениями упрочняющей фазы различной степени дисперсности. Металл, наплавленный присадочным материалом Св1597, отличается литая мелкозернистая структура с равномерным распределением выделений упрочняющих фаз (типа Al_3Sc) внутри зерен и по границам.

Твердость металла зависит от марки присадочного материала и практически не зависит от способа сварки. Для металла, наплавленного присадочным материалом СвАМг5, значения твердости лежат в диапазоне 85–90 HV; для СвАМг61 – 95–100 HV. Наибольшие значения твердости имеет металл, наплавленный скандийсодержащим присадочным материалом Св1597 – 109–120 HV (рисунок 1, б).

Механические свойства наплавленного металла определены при статическом растяжении цилиндрических пятикратных ($l_0 = 5,65\sqrt{F_0}$) образцов – гладких и с кольцевой V-образной выточкой по центру рабочей части цилиндрического образца (диаметр образца – 6 мм, диаметр образца в надрезе – 5 мм, угол раскрытия надреза – 60° , радиус в вершине надреза – 0,1 мм). Образцы вырезали вдоль слоев наплавленного металла из трех исследуемых зон – слоев по высоте (рисунок 1, а).

Качественная оценка результатов испытаний показала, что с вероятностью 95% можно пренебречь влиянием повторных сварочных нагревов при многопроходной сварке и способом сварки на свойства наплавленного металла и признать существенными факторами только химический состав, температуру испытаний и наличие искусственного концентратора напряжений.

С понижением температуры испытаний наблюдается одинаковая закономерность изменения механических свойств наплавленного металла для всех исследованных составов присадочного материала: временное сопротивление и условный предел текучести возрастают (рисунок 2, а, б, в). Темп роста прочности зависит от системы легирования сплава и составляет 15–20% при температуре 77 К; темп роста условного предела текучести менее интенсивен, чем временного сопротивления.

С понижением температуры испытаний относительное удлинение монотонно снижается и составляет при температуре 77 К 10–12%, 5–6% и 4–5%, соответственно для СвАМг5, СвАМг61 и Св1597.

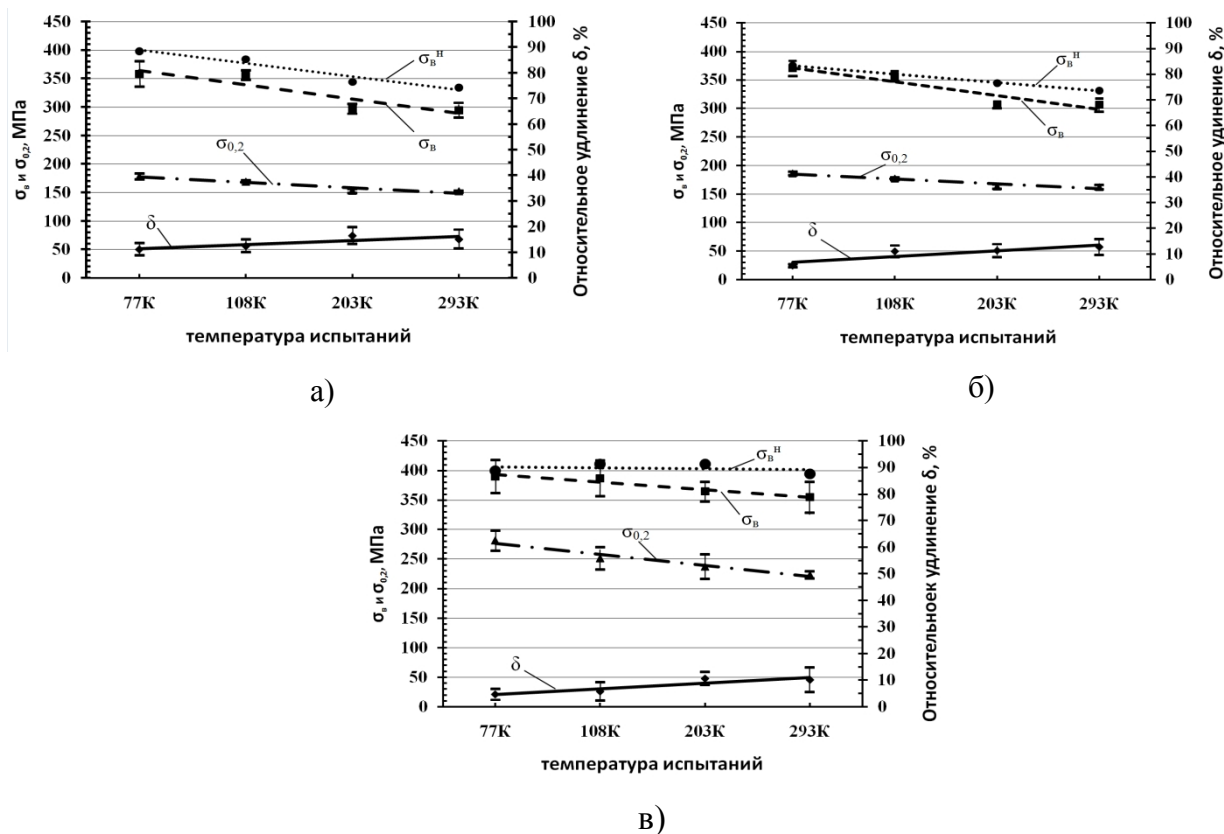


Рисунок 2 – Зависимость механических свойств наплавленного металла (АрДС) от температуры испытаний (по средним значениям): а – СвАМг5; б – СвАМг61; в – Св1597.

Подобное изменение механических свойств отличает наплавленный (литой) металл от деформированных полуфабрикатов той же системы легирования, у которых при понижении температуры происходит рост прочности на 30–40%. Данное обстоятельство может говорить о том, что в сварных соединениях алюминий-магниевого сплава, для которых предназначены исследуемые составы присадочного материала, наиболее ослабленной зоной может являться шов, металл которого характеризуется комплексом прочностных и пластических свойств, особенно в условиях низкотемпературного нагружения, заметно отличающимся от основного свариваемого материала.

Экспериментально установлено, что для всех исследуемых составов наплавленного металла прочность образцов с кольцевой выточкой выше прочности и предела текучести гладких цилиндрических образцов во всем диапазоне температур от 77 К – 293 К. Оценка чувствительности наплавленного металла к концентрации напряжений и к изменению его вязкости дана по следующим коэффициентам:

$$\alpha = \sigma_B^{HT} / \sigma_B^T - \text{коэффициент чувствительности к концентрации напряжений;}$$

$$\dot{\alpha} = \sigma_B^{HT} / \sigma_{0,2}^T - \text{коэффициент вязкости металла в надрезе.}$$

Зависимости рассматриваемых коэффициентов от температуры испытания представлены на рисунке 3.

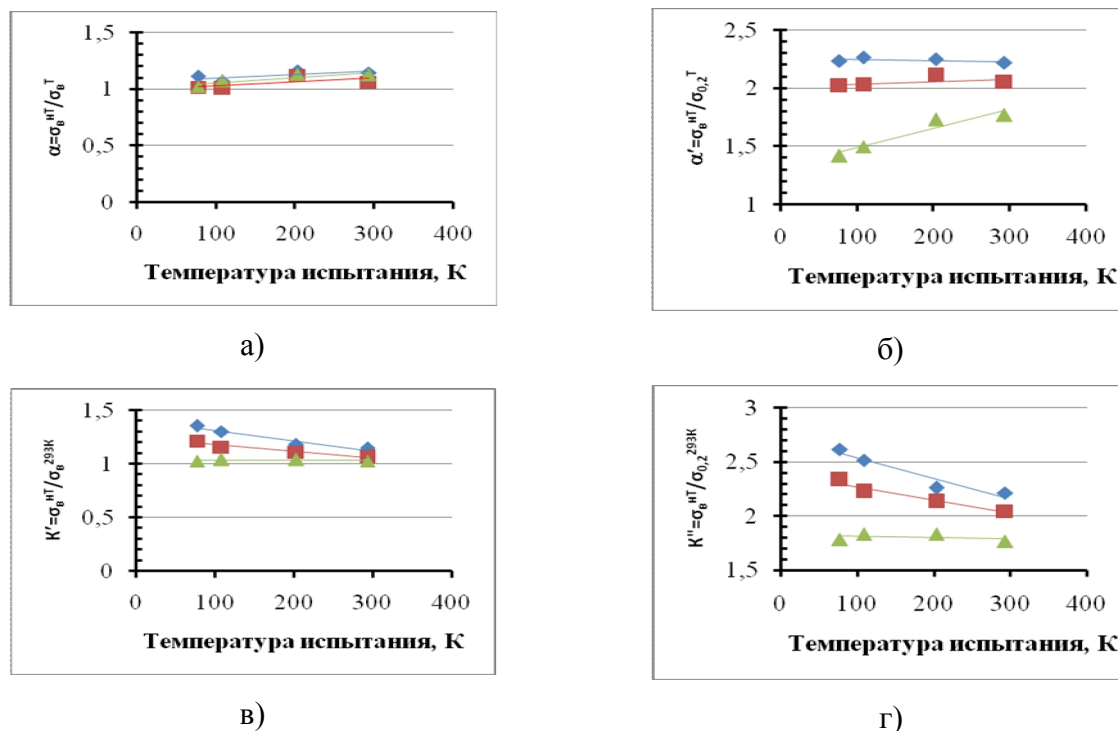


Рисунок 3 – Температурные зависимости коэффициентов: а – чувствительность металла к надрезу; б – вязкость металла в надрезе; в – изменение прочности при низкой температуре; г – запас прочности.

$\sigma_{в}^T$ – временное сопротивление гладкого образца; $\sigma_{в}^{HT}$ – временное сопротивление образца с надрезом; $\sigma_{0,2}^T$ – предел текучести. \blacklozenge – сплав СвАМг5; \blacksquare – сплав СвАМг61; \blacktriangle – сплав Св1597.

Значения коэффициентов α (чувствительности к концентрации напряжений) и α' (вязкости металла в надрезе) для металла, наплавленного исследуемыми составами присадочного материала, больше 1. Высокие значения α и α' характеризуют способность наплавленного металла сохранять высокую вязкость разрушения даже при наличии нарушений сплошности металла в виде отдельных допустимых дефектов сварных соединений. Это позволяет сделать вывод о пригодности присадочных материалов исследуемых составов для изготовления сварных конструкций криогенного применения.

Испытания наплавленного металла на ударный изгиб проведены при температурах 77 К, 108 К, 203 К и 293 К. Установлено, что для металла, наплавленного присадочными материалами СвАМг5, СвАМг61 и Св1597 способом АрДС, при понижении температуры испытаний характерно монотонное снижение ударной вязкости (рисунок 4).

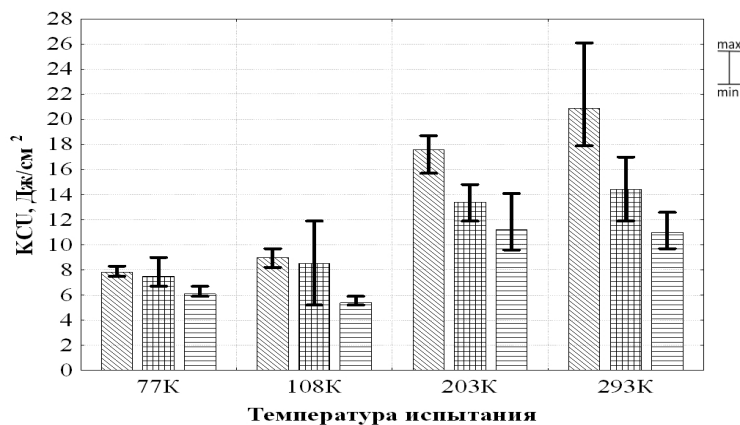


Рисунок 4 – Изменение ударной вязкости металла, наплавленного АрДС, в зависимости от температуры испытаний и состава присадочного материала: ▨ – СвАМг5; ▩ – СвАМг61; ≡ – Св1597.

Для металла, наплавленного ИДСПЭ, при комнатной температуре значения ударной вязкости для СвАМг5 лежат в диапазоне 22,6–28,9 Дж/см², а для СвАМг61 – 14,9–19,4 Дж/см².

При снижении температуры испытаний у всех исследуемых составов присадочного материала, независимо от способа сварки, наблюдается одинаковая закономерность изменения ударной вязкости, заключающаяся в ее монотонном понижении. При криогенной температуре (77 К) ударная вязкость металла составляет 40–50% (6–9 Дж/см²) от значений, полученных при комнатной температуре.

Поверхности образцов, испытанных на статическое растяжение и ударный изгиб, как при комнатной, так и криогенной температурах, характеризуются чашечным изломом, типичным для вязкого механизма разрушения.

В четвертой главе представлены результаты исследования влияния конструктивных и технологических факторов сварки на механические свойства сварных соединений алюминиевых сплавов 1565ч и 1550 при криогенных температурах.

Сварные стыковые пробы для исследований выполнены способами сварки плавлением – АрДС и ИДСПЭ в среде аргона и сваркой в твердой фазе – сварка трением с перемешиванием (СТП). Очистку свариваемых кромок и присадочных материалов перед сваркой проводили химическим способом (травлением). Разделка свариваемых кромок выполнена в соответствии с действующей нормативной документацией на сварку алюминиевых сплавов и по разработанному автором способу (патент № 2553769).

Металл шва, выполненный присадочными материалами СвАМг5 и СвАМг61 способами АрДС и ИДСПЭ, представляет литую кристаллическую структуру дендритного строения, с выделениями упрочняющей фазы различной степени

дисперсности, расположенными внутри вытянутых кристаллитов и по их границам. Для металла шва, выполненного скандийсодержащим присадочным материалом Св1597, характерна однородная мелкозернистая структура с выделениями дисперсных частиц упрочняющей фазы (типа Al_3Sc), хаотично расположенных по границам зерен, а также в теле зерна в виде включений. Металл шва в сварных соединениях, выполненных СТП, характеризуется мелкодисперсными равноосными зёрнами, т.е. имеет наиболее благоприятную структуру, с точки зрения формирования высоких прочностных свойств, металла шва.

Зона сплавления – область шириной от 100 до 300 мкм характеризуется химической и структурной неоднородностью. Кроме того, в этой области наиболее вероятно образование микроскопических дефектов сварочного происхождения: пор, усадочных раковин, инородных включений, поэтому она может являться наиболее ослабленным участком в сварном соединении (рисунок 5, а, б, в).

Использование алюминиевой скандийсодержащей проволоки при сварке сопровождается массопереносом скандия из металла шва в зону сплавления (рисунок 5, г), а следовательно, насыщением скандием твердого раствора и образованием дисперсных выделений упрочняющей фазы, что способствует упрочнению металла и ограничению роста зерен в зоне сплавления, т.е. увеличению прочности сварного соединения в целом.

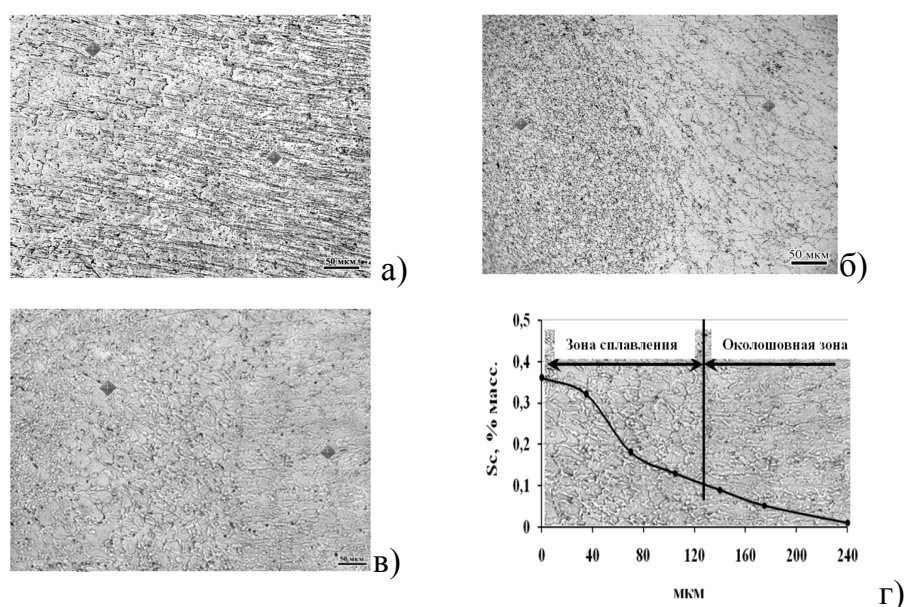


Рисунок 5 – Микроструктура ($\times 200$) металла в зоне сплавления сварных соединений сплава 1565ч: а – ИДСПЭ с применением СвАМг61; б – СТП; в – АрДС с применением Св1597; г – распределение скандия в зоне сплавления сплава 1565ч (МРСА).

Следует отметить, что значения твердости металла шва, зоны сплавления и зоны термического влияния для сварных соединений, выполненных АрДС и ИДСПЭ, составляют 91–95 HV, т.е. находятся практически на одном уровне. В то же время твердость металла шва и зоны сплавления в соединениях, выполненных с присадочным материалом Св1597, составляет 119–124 HV т.е. на 10–20% выше твердости основного металла, аналогично сварным соединениям, выполненным СТП.

Оценка влияния конструктивных и технологических факторов на свойства сварных соединений алюминиевых сплавов марок 1565ч и 1550 проведена по результатам испытаний на растяжение плоских образцов с различным конструктивным оформлением шва (с усилением сварного шва, со снятым усилением сварного шва, с конструктивно-технологическим оформлением шва наплавкой дополнительных валиков по границе сплавления) при комнатной и криогенной температурах.

Установлено, что с понижением температуры испытаний в сварных соединениях сплава 1550 происходит низкотемпературное упрочнение аналогично основному металлу, практически с тем же темпом (рисунок 6, а). Коэффициент прочности сварных соединений сплава 1550 составляет не менее 0,9 от прочности основного металла, т.е. использование присадочного материала СвАМг5 обеспечивает достижение максимальных прочностных свойств не только при комнатной, но и при криогенной температуре.

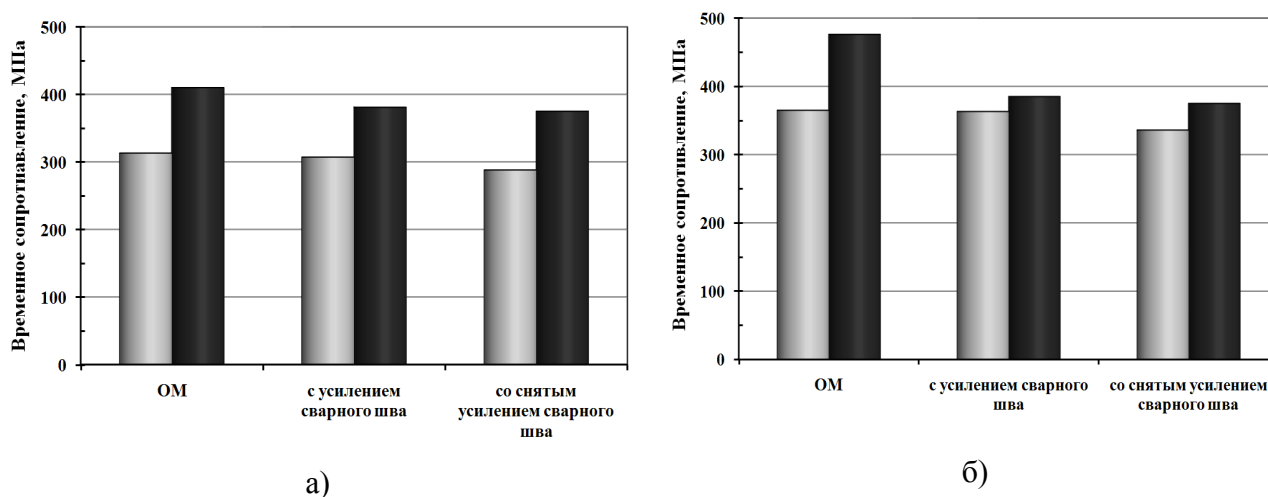


Рисунок 6 – Прочность сварных соединений алюминиевых сплавов 1550 (а) и 1565ч (б), выполненных АрДС, в зависимости от температуры испытания, где:

■ – температура испытания 108 К; □ – температура испытания 293К.

Сварные соединения сплава 1565ч, выполненные присадочным материалом СвАМг61 характеризуются меньшим темпом роста прочности при криогенной

температуре, чем основной металл (рисунок 6, б). Коэффициент прочности сварных соединений, испытанных при криогенной температуре (108 К), составляет 0,8 от прочности основного металла, при этом разрушение образцов, преимущественно, происходит по зоне сплавления.

Поиск путей реализации прочности основного металла в сварных соединениях сплава 1565ч при криогенной температуре потребовал выполнения работ по оценке значимости влияния факторов сварки, таких как состав присадочного материала, способ сварки, оформление шва и др., на возможность повышения низкотемпературной прочности сварных соединений.

Научно обоснована и экспериментально доказана возможность повышения прочности сварных соединений алюминиевых сплавов 1565ч и 1550, в том числе при криогенных температурах, до уровня прочности основного металла за счет конструктивно-технологического оформления сварного шва наплавкой валиков по границе сплавления с основным металлом, а также использования присадочных материалов, содержащих скандий, и применения способа сварки в твердой фазе с целью формирования в металле шва и зоны сплавления мелкозернистой структуры.

Повышение прочности сварных соединений сплава 1565ч при криогенной температуре достигается (рисунок 7):

- конструктивно-технологическим оформлением шва наплавкой валиков по границе сплавления с основным металлом, что обеспечивает увеличение рабочего сечения сварного соединения в околошовной зоне и ведет к снижению влияния концентрации напряжений благодаря плавности перехода на границе металла шва и основного металла;

- формированием в металле шва и околошовной зоны мелкозернистой структуры благодаря использованию в качестве присадочного материала алюминиевого сплава с содержанием 0,36–0,5% скандия (Св1597);

- формированием в металле шва мелкодисперсной, близкой к равноосной структуры, характерной для сварки трением с перемешиванием (СТП).

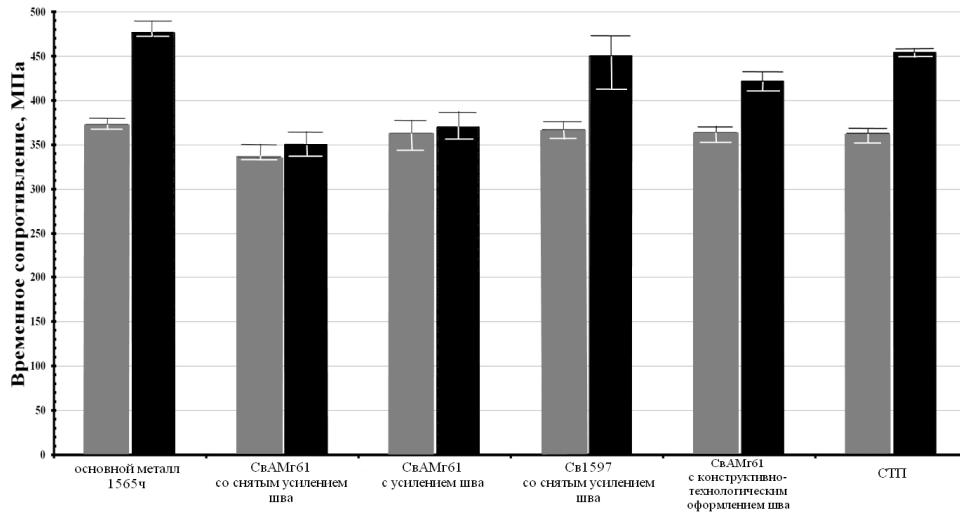


Рисунок 7 – Прочность образцов сварных соединений сплава 1565ч, выполненных АрДС с использованием СвАМг61 и Св1597 и СТП.

■ – температура испытания 293 К; ■ – температура испытания 108 К.

Повышение прочности сварных соединений сплава 1565ч при криогенной температуре сопровождается увеличением относительного удлинения образца на 50–60% (рисунок 8), при этом разрушение преимущественно происходит в зоне сплавления (рисунок 9, а).

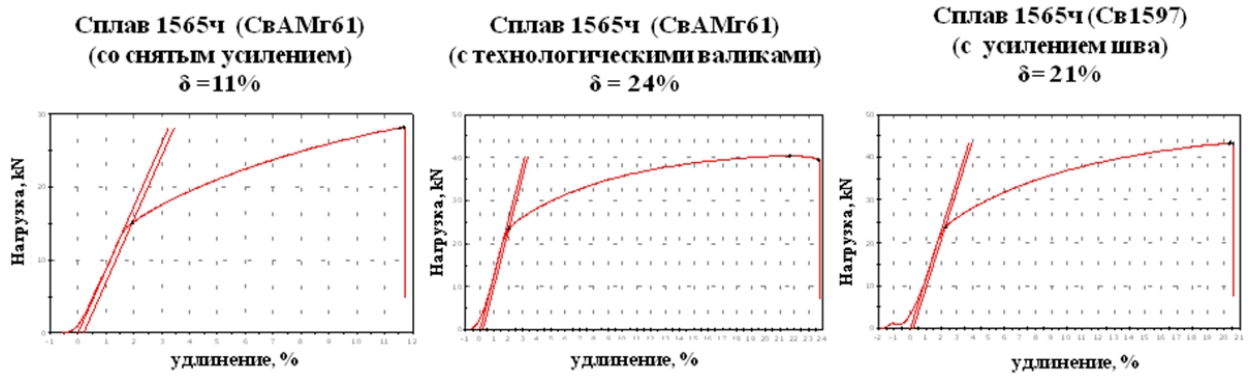


Рисунок 8 – Диаграммы статического растяжения сварных соединений сплава 1565ч при температуре 108 К.

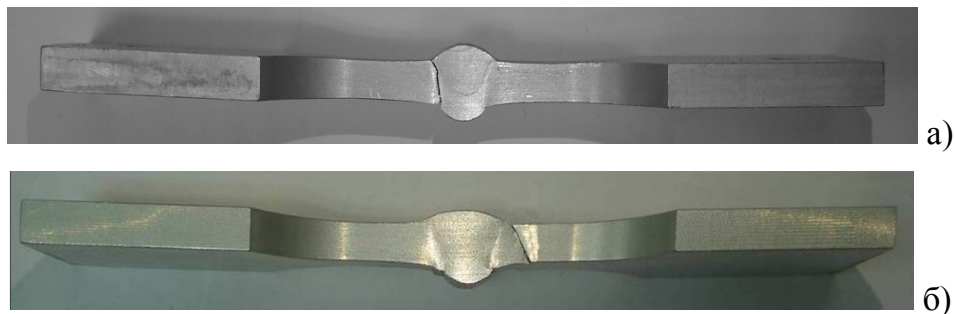


Рисунок 9 – Характер разрушения сварных соединений сплава 1565ч: а – температура испытания 77 К; б – температура испытания 293 К.

Следует отметить, что разрушение сварных соединений с усилением шва сплава 1550, выполненных сваркой плавлением, при криогенной температуре также происходит в зоне сплавления.

При комнатной температуре разрушение сварных соединений сплавов 1565ч и 1550, выполненных сваркой плавлением, происходит по металлу шва в образцах со снятым усилением шва; по ЗТВ – в образцах с усилением шва или с конструктивно-технологическим оформлением шва (рисунок 8, б).

Сварные соединения, выполненные СТП, разрушаются по основному металлу во всем диапазоне исследуемых температур.

Анализ фактуры поверхности изломов свидетельствует о протекании вязкого механизма разрушения без признаков охрупчивания металла.

Сварные соединения обоих сплавов, выполненные сваркой плавлением, имеют общую закономерность изменения значений ударной вязкости в зависимости от места расположения надреза и температуры испытаний, при понижении которой происходит монотонное уменьшение величины ударной вязкости металла на всех участках, включая основной металл (рисунок 10).

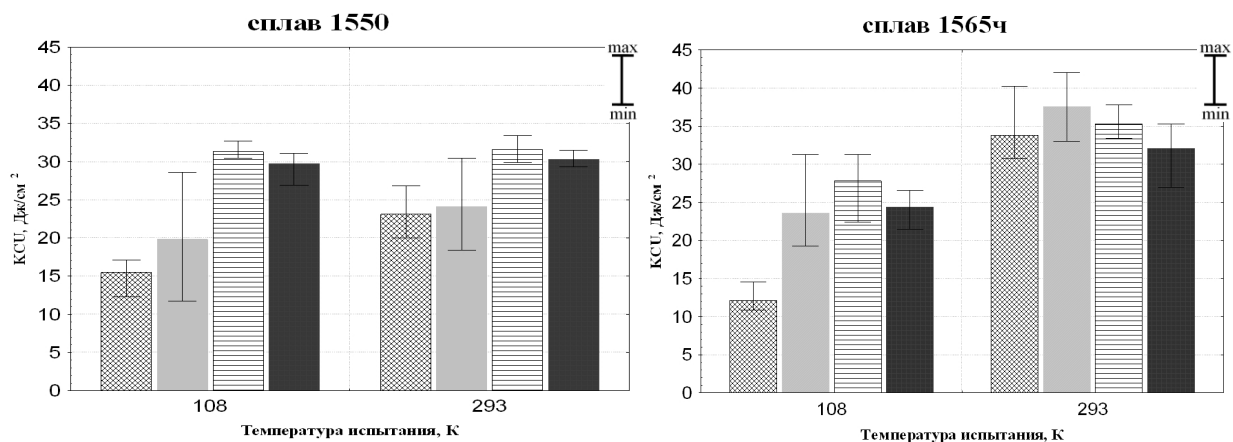


Рисунок 10 – Ударная вязкость сварных соединений сплавов 1565ч толщиной 7 мм и 1550 толщиной 5 мм, выполненных АрДС, где: – металл шва; – граница сплавления;

– зона термического влияния; – основной металл.

В сварных соединениях, выполненных СТП, независимо от марки сплава, значения ударной вязкости металла шва при температуре 293 К на ~60 %, а при температуре 108 К на ~75 % выше, чем у сварных соединений, выполненных сваркой плавлением.

Морфология излома образцов независимо от места надреза и температуры испытания имеет ямочное строение, типичное для вязкого механизма разрушения (рисунок 11).

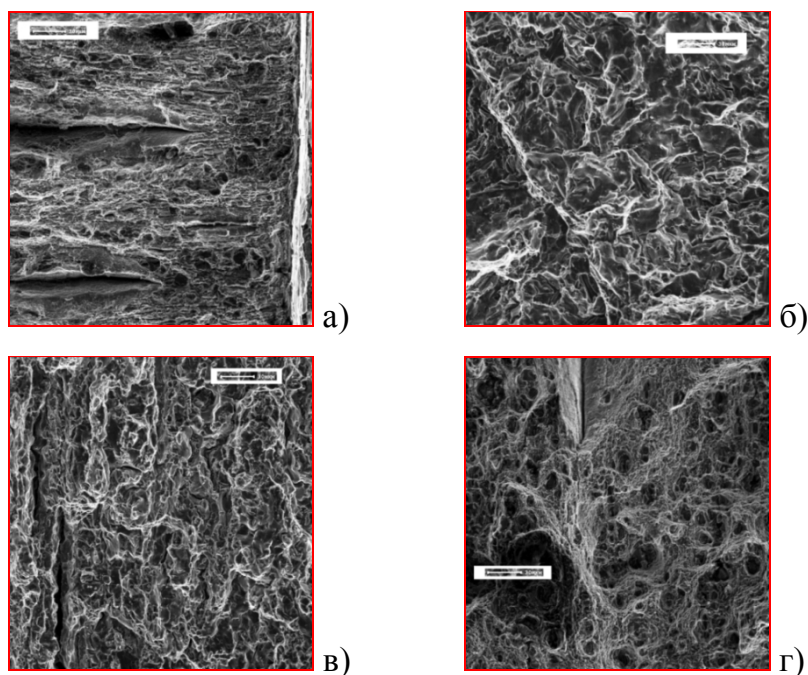


Рисунок 11 – Фрактуры изломов образцов, испытанных при температуре 108 К:

а – основной металл; б – металл шва; в – зона сплавления; г – зона термического влияния;
×1000.

В пятой главе на базе проведенных экспериментальных исследований свойств сварных соединений из алюминиевых сплавов 1565ч и 1550 при комнатной и криогенной температурах, установления характера и степени низкотемпературного упрочнения, оценки зависимости свойств от влияния конструктивных и технологических факторов сварки:

- выполнен обоснованный выбор сварочных материалов, позволяющий обеспечить равнопрочность сварных соединений при сварке сплава 1550 сварочным материалом той же категории прочности (СвАМг5), при сварке сплава 1565ч – более высокой категории прочности (Св1597);

- разработаны технологии сварки плавлением в защитных газах неплавящимся и плавящимся электродом полуфабрикатов толщиной от 5 до 80 мм;

- исследовано влияние конструктивных и технологических факторов сварки на обеспечение заданного уровня механических свойств и стабильность качества сварных соединений из алюминиевых сплавов 1565ч и 1550 при криогенной и комнатной температурах с привлечением статистических методов обработки данных и оптимизацией параметров процесса сварки;

- разработаны требования к механическим свойствам сварных соединений, в соответствии с которыми прочность при комнатной температуре должна быть не ниже

временного сопротивления для сплава 1550М и не ниже 0,9 от временного сопротивления для сплава 1565чМ;

– разработаны предложения для включения в Правила РМРС требований к сварным соединениям деформируемых алюминиевых сплавов 1565ч и 1550, впервые допущенных к применению в системах хранения груза газозовозов.

Разработанная технология сварки плавлением алюминиевых сплавов 1565ч и 1550 включает в себя комплекс технических решений, защищенных патентом на изобретение № 2553769, и предусматривает выполнение Х-образной разделки с криволинейным скосом свариваемых кромок, что обеспечивает:

– полный провар свариваемых кромок за один проход благодаря заявленным соотношениям конструктивных элементов – закругление (R) и притупление (c), выбираемые в зависимости от толщины свариваемых деталей (рисунок 12);

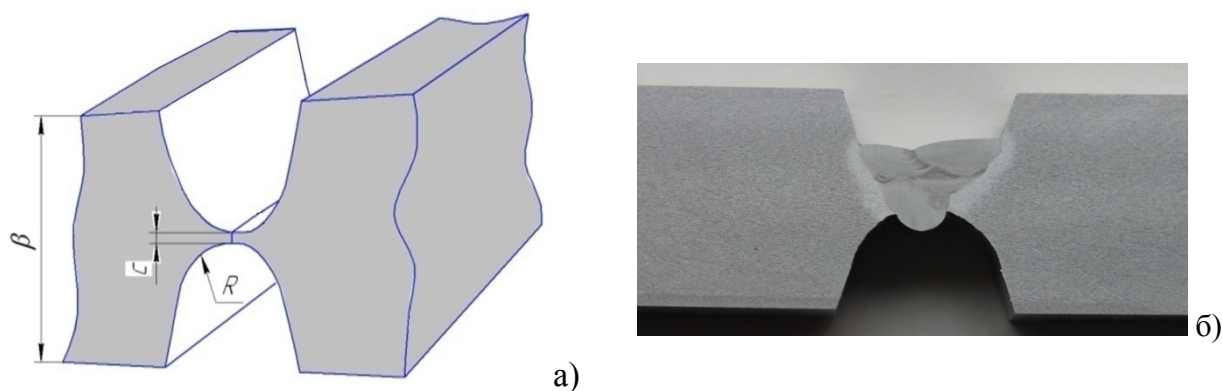


Рисунок 12 – Конструктивные элементы разделки свариваемых кромок (а), полный провар свариваемых кромок (б).

– гарантированное сплавление присадочного металла с основным металлом при заполнении разделки кромок многопроходными швами благодаря наклону оси электрода под углом $\alpha = 15 - 45^\circ$ к скошенной поверхности свариваемых кромок;

– низкий уровень остаточных угловых деформаций сварных соединений без применения специальных мероприятий по их снижению благодаря рациональной последовательности заполнения разделки при многопроходной сварке;

– обеспечение требуемого уровня статической прочности сварных соединений – не менее 0,9 от прочности основного металла путем перекрытия зоны сплавления технологическими валиками на величину не менее 10 – 40% от толщины свариваемых деталей (рисунок 13).

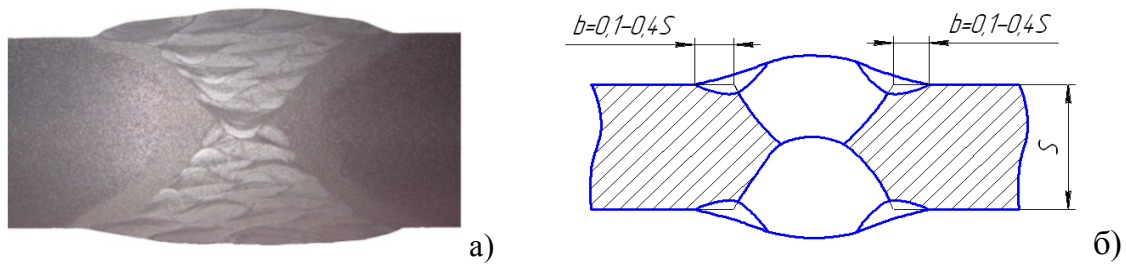


Рисунок 13 – Макроструктура ($\times 10$) сварного соединения сплава 1565ч толщиной 40 мм (а); конструктивно-технологическое оформление шва наплавкой валиков (б).

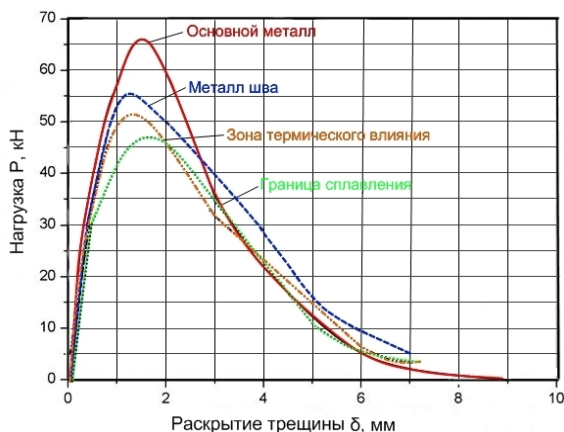
Неоднородность механических свойств металла различных зон сварных соединений сплавов марок 1565ч и 1550 по толщине свариваемых кромок (60 мм), оцененная по результатам статического растяжения цилиндрических образцов, не превышает 8 %, что согласуется с распределением твердости металла: для соединений сплава 1550 значения составляют 87–91 HV; для соединений сплава 1565ч – 93–98 HV.

Испытания на статическое растяжение сварных соединений, выполненных по разработанной технологии, показали, что минимальные значения их прочности не ниже сертификационных значений для каждого из сплавов и соответствующей категории присадочного материала (таблица 1).

Сварные соединения алюминиево-магниевых сплавов марок 1565ч и 1550 с поперечным швом способны выдерживать пластическую деформацию без образования недопустимых трещин в растянутой зоне при изгибе до параллельности сторон (180°).

Совместно с ФГУП «Крыловский государственный научный центр» проведены испытания металла различных зон сварных соединений сплавов 1565ч и 1550 на вязкость разрушения в условиях нормального отрыва при статическом нагружении. Результаты показали, что при криогенной температуре для обоих сплавов характерен рост максимальной приложенной нагрузки, необходимой для начала развития трещины (рисунок 14). Следовательно, вязкость разрушения основного металла, металла шва, зон сплавления и термического влияния при криогенной температуре не ниже, чем при комнатной температуре.

Температура испытания 108 К



Температура испытания 293 К

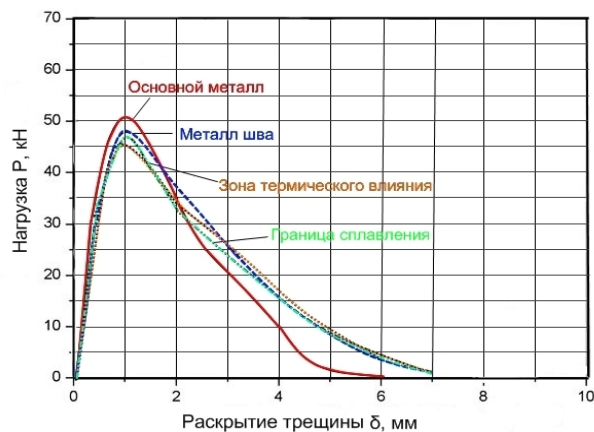


Рисунок 14 – Диаграммы нагрузка – раскрытие трещины ($P-\delta$) основного металла, металла шва, зоны сплавления и зоны термического влияния сварных соединений сплава 1565ч.

Разработанные требования к сварным соединениям деформируемых алюминиевых сплавов 1565ч и 1550, выполненным аргонодуговой сваркой неплавящимся и плавящимся электродом, включают сертификационные механические испытания сварных образцов разрушающими методами при комнатной температуре. Нормируемые характеристики сварных соединений (таблица 1):

- временное сопротивление (R_m , min);
- угол изгиба сварного образца на оправке установленного диаметра.

Таблица 1 – Требования к механическим свойствам стыковых сварных соединений сплавов 1550 и 1565ч

Основной металл		Категория сварочного материала	Нормируемые характеристики (не менее)		
Категория	Состояние поставки		Временное сопротивление	Статический изгиб	
				R_m , МПа	Соотношение d/t_s^1
1550	О $t_s \leq 12,5$ мм $t_s > 12,5$ мм	R2/W2 (СвАМГ5)	275	6	180
			255	6	180
1565ч	О $t_s \leq 12,5$ мм $t_s > 12,5$ мм	R3/W3 (СвАМГ61)	305	6	180
1565ч	О $t_s \leq 12,5$ мм $t_s > 12,5$ мм	R4/W4 (Св1597)	335	6	180

¹ d – диаметр пуансона или внутреннего ролика, мм; t_s – толщина гибового образца, мм

Подготовленные предложения для включения в Правила РМРС требований к деформируемым алюминиевым сплавам, применяемым в конструкциях систем хранения груза газозовов, приняты РМРС для опубликования в Правилах редакции 2016 г.

Основные выводы и результаты работы

1. Анализ существующего уровня сварки алюминиевых сплавов показал, что до настоящего времени промышленные технологии сварки конструкций криогенного назначения базируются на способах сварки плавлением неплавящимся и плавящимся электродом в среде защитного газа благодаря их освоенности, универсальности, технологичности.

2. Подтверждена пригодность использования присадочных материалов марок СвАМг5, СвАМг61 и Св1597 для сварки алюминиево-магниевых сплавов 1550 и 1565ч, в конструкциях, работающих при криогенных температурах.

3. Установлено, что сварные соединения деформируемых алюминиевых сплавов 1565ч и 1550 с использованием соответствующих сплавов присадочного материала (СвАМг61 и СвАМг5) сохраняют свойства при рабочих температурах до 108 К, включая прочность и вязкость разрушения, значения которых при криогенных температурах не ниже значений при комнатной температуре.

4. Разработаны пути повышения прочности при криогенной температуре сварных соединений нового сплава 1565ч на уровне гарантированной прочности основного металла, которая достигается:

- конструктивно-технологическим оформлением шва дополнительной наплавкой валиков по границе сплавления;
- применением более прочного присадочного материала, легированного скандием;
- использованием перспективного способа сварки трением с перемешиванием.

5. Разработаны предложения по требованиям к сварочным материалам и сварным соединениям из деформируемых алюминиевых сплавов марок 1565ч и 1550 предназначенных для применения в конструкциях систем хранения груза газозовов для включения предложений в Правила РМРС.

6. Разработана технология сварки плавлением неплавящимся и плавящимся электродом деформируемых алюминиево-магниевых сплавов 1565ч и 1550, техническая новизна которой подтверждена патентом РФ № 2553769. Выпущена нормативно-техническая документация РД5.УЕИА.3622-2013 «Сварка типовых соединений из алюминиево-магниевых катаных листов и плит толщиной до 80 мм для конструкций емкостей газозовов».

7. Полученные результаты показывают, что применение сплава 1565ч в качестве конструкционного материала обеспечит надежную работу сварных грузовых емкостей при криогенных температурах и по сравнению со сплавами 1550 и 5083 позволит на 15–25 % снизить металлоемкость конструкции.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Зыков С. А., Орыщенко А. С., Павлова В. И., Осокин Е. П. Свойства сварных соединений алюминиево-магниевых сплавов криогенного назначения // Цветные металлы. – 2014. – № 3. – С. 64–70.

2. Зыков С. А., Павлова В. И., Осокин Е. П. Оценка влияния конструктивно-технологических факторов сварки на свойства сварных соединений из алюминиево-магниевых сплавов при криогенной температуре // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 2 (78). – С. 138–154.

3. Зыков С. А., Павлова В. И., Осокин Е. П. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом полуфабрикатов из алюминиево-магниевых сплавов в широком диапазоне толщин // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 1 (81). – С. 229–239.

4. Зыков С. А., Павлова В. И., Осокин Е. П. Прочность при низких температурах сварных соединений алюминиево-магниевых сплавов // Мир сварки. – 2012. – № 5–6 (25–26). – С. 22–26.

5. Зыков С. А., Павлова В. И., Осокин Е. П. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом полуфабрикатов из алюминиево-магниевых сплавов в широком диапазоне толщин // Международная научно-техническая конференция «Сварка и родственные технологии в экстремальных и особых условиях». Материалы конференции. – 2014. – С. 51–63

6. Зыков С. А., Павлова В. И. Исследование свойств сварных соединений алюминиево-магниевых сплавов криогенного назначения // Труды конференции молодых ученых и специалистов ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», 20–22 июня 2012 г. – СПб.: ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», 2013. С. 96–101.

7. Зыков С. А., Павлова В. И., Осокин Е. П. Сравнительный анализ свойств сварных соединений алюминиево-магниевых сплавов, выполненных неплавящимся и плавящимся электродом // Научный электронный журнал «Новости материаловедения. Наука и техника». – 2014. – № 5. – С. 1–16.

8. Зыков С. А., Павлова В. И., Якерсберг Л. М., Зайцев Д. В., Полякова И. Н. Патент № 2553769, Российская Федерация, МПК В23К 9/09, В23К 33/00, В23К 103/10. Способ импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом алюминиевых сплавов /

ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей». Патентообладатель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации (Минпромторг России). – № 2013142390/02; заявл. 17.09.2013; опубл. 20.06.2015, бюл. № 17.

9. Башаев В. К., Павлова В. И., Осокин Е. П., Зыков С. А., Дриц А. М. Деформируемые алюминиево-магниевые сплавы и сварные соединения для конструкций систем хранения груза газозовов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. – 2016. – № 42/43. – С. 93–101.