

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ «ПРОМЕТЕЙ»**

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Павлова Вера Ивановна

Санкт-Петербург

2016 год

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
Глава 1. Состояние вопроса по сварке алюминиевых сплавов для конструкций низкотемпературного применения.....	16
1.1 Назначение сварных конструкций из алюминиевых сплавов, работающих при низких и криогенных температурах.....	16
1.2 Свариваемые алюминиевые сплавы.....	18
1.3 Основные критерии оценки пригодности алюминиевых сплавов для работы в условиях низких и криогенных температур.....	22
1.4 Сварка алюминия и его сплавов.....	26
1.4.1 Ручная сварка в защитных газах неплавящимся электродом.....	27
1.4.2 Автоматическая сварка неплавящимся электродом.....	28
1.4.3 Сварка плавящимся электродом.....	32
1.4.4 Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом.....	32
1.4.5 Гибридная сварка алюминиевых сплавов.....	34
1.4.6 Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов.....	35
1.5 Механические свойства сварных соединений алюминиевых сплавов при комнатной и криогенной температурах.....	36
1.6 Требования классификационных обществ к материалам и сварным соединениям из алюминиевых сплавов.....	43
1.6.1 Требования L'R и BV к материалам и сварным соединениям корпусных конструкций из алюминиевых сплавов морского назначения и низкотемпературных применений.....	44
1.6.2 Анализ требований Российского морского регистра судоходства (РМРС) к материалам и сварным соединениям, применяемым в морских конструкциях и конструкциях систем хранения груза газозовозов.....	46
1.6.2.1 Требования к материалам. Методы испытаний и нормируемые характеристики деформируемых алюминиевых сплавов.....	47
1.6.2.2 Требования к сварным соединениям. Виды испытаний и нормируемые характеристики.....	49
Выводы по главе 1.....	54
Глава 2. Материалы, оборудование и методика исследования.....	56
2.1 Основные и сварочные материалы	56
2.2 Способы сварки и оборудование.....	59
2.3 Типы сварных соединений.....	60
2.4 Изготовление проб для исследований наплавленного металла.....	60
2.5 Изготовление сварных стыковых проб.....	61
2.6 Контроль качества сварных соединений.....	64
2.7 Методики исследования.....	65
2.7.1 Определение химического состава наплавленного металла.....	65
2.7.2 Металлографические исследования.....	66
2.7.3 Измерение твердости.....	66
2.7.4 Испытания на статическое растяжение.....	67
2.7.5 Испытания на ударный изгиб.....	70
2.7.6 Испытания сварных соединений на статический изгиб.....	72

2.7.7 Усталостные испытания сварных соединений.....	73
2.7.8 Испытания сварных соединений на вязкость разрушения.....	75
2.7.9 Экспериментальные и расчетные характеристики, полученные при проведении испытаний.....	80
2.7.10 Математико-статистическая обработка результатов.....	80
Выводы по главе 2.....	84
 Глава 3. Исследования влияния факторов сварки на свойства металла, наплавленного присадочными материалами, предназначенными для сварных соединений алюминиевых сплавов, при комнатной и криогенных температурах.....	85
3.1 Исследования наплавленного металла.....	85
3.1.1 Химический состав	85
3.1.2 Металлографические исследования.....	86
3.1.3 Оценка неоднородности свойств.....	89
3.1.4 Механические свойства.....	90
3.1.5 Ударная вязкость.....	105
Выводы по главе 3.....	107
 Глава 4. Экспериментальные исследования и анализ влияния конструктивных и технологических факторов сварки на механические свойства сварных соединений алюминиевых сплавов при криогенных температурах.....	110
4.1 Свойства сварных соединений алюминиевых сплавов в зависимости от конструктивных и технологических факторов.....	110
4.1.1 Металлографические исследования сварных соединений.....	110
4.1.2 Оценка неоднородности свойств металла сварных соединений...	117
4.1.3 Прочность сварных соединений при растяжении.....	118
4.1.4 Анализ влияния конструктивных и технологических факторов сварки на механические свойства сварных соединений.....	122
4.1.5 Испытания на ударный изгиб.....	127
Выводы по главе 4.....	131
 Глава 5. Разработка технологии сварки стыковых соединений из деформируемых алюминиево-магниевого сплавов 1565ч и 1550. Свойства сварных стыковых соединений полуфабрикатов из сплавов 1565ч и 1550 в отожженном состоянии.....	133
5.1 Разработка технологии сварки стыковых соединений из алюминиево-магниевого полуфабрикатов сплавов марок 1565ч и 1550	133
5.1.1 Основной и сварочный материалы. Подготовка материалов к сварке.....	136
5.1.2 Выбор режима сварки.....	138
5.1.3 Основные технологические положения по сварке.....	138
5.1.4 Изготовление сварных проб.....	141
5.1.5 Контроль качества сварных соединений.....	144
5.2 Свойства сварных стыковых соединений полуфабрикатов из сплавов 1565ч и 1550 в отожженном состоянии.....	147
5.2.1 Анализ макроструктуры.....	147

5.2.2 Оценка неоднородности механических свойств сварных соединений по толщине свариваемых полуфабрикатов.....	148
5.2.3 Испытания на статическое растяжение.....	151
5.2.4 Испытания на статический изгиб.....	155
5.2.5 Усталостные испытания.....	157
5.2.6 Испытания на вязкость разрушения.....	161
5.3 Разработка предложений для включения в Правила РМРС требований к сварным соединениям деформируемых алюминиевых сплавов 1565ч и 1550, применяемым в системе хранения груза газозовов.....	164
5.4 Разработка нормативно-технологической документации на сварку алюминиево-магниевых сплавов.....	167
5.5 Внедрение результатов работы.....	168
Выводы по главе 5.....	170
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ.....	172
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	175
Приложение 1	188
Приложение 2	189
Приложение 3	190

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и обоснование цели диссертационного исследования.

Рост энергопотребления в мире приводит к поиску и освоению все более эффективных источников энергии, к которым относится сжиженный природный газ (СПГ).

Транспортировка газов на протяженные расстояния, исключая применение трубопроводов, экономически целесообразна судами-газовозами, в частности конструкции типа «MOSS», составляющих на сегодняшний день 41% мирового флота, имеющих сферические грузовые резервуары, которые, как правило, изготавливаются из алюминиевого сплава.

Алюминиевые сплавы способны сохранять прочность, пластичность и вязкость при криогенных температурах, имеют высокую удельную прочность и не подвержены хрупкому разрушению, так как не имеют порога хладноломкости вплоть до температур 20 К благодаря кристаллическому строению – гранецентрированной кубической решетке (ГЦК) [1, 2].

Неоспоримое первенство среди алюминиевых сплавов криогенного назначения, в том числе для использования в строительстве судов-газовозов, получил зарубежный алюминий-магний-марганцевый сплав 5083, признанный Международной Ассоциацией Классификационных Обществ (МАКО). В России широкое применение в изделиях криогенной техники получил отечественный алюминий-магний-марганцевый сплав марки 1550, близкий по своим свойствам зарубежному аналогу – сплаву 5083.

Сплавы 5083 и 1550 используются в отожженном состоянии, механические свойства которых при комнатной температуре составляют: временное сопротивление $\sigma_b \geq 275$ МПа, условный предел текучести $\sigma_{0,2} \geq 135$ МПа и относительное удлинение $\geq 15\%$. Этим сплавам при криогенной температуре присуще низкотемпературное упрочнение с приростом прочности при 77 К на 20–30%.

«ЦНИИ КМ «Прометей» совместно с ЗАО «Алкоа СМЗ» и ОАО «НИИ стали» разработан алюминий-магний-марганцевый сплав марки 1565ч, содержащий (5,5–5,9%) магния [3], который в отожженном состоянии при комнатной температуре характеризуется прочностными свойствами (временное сопротивление

$\sigma_B \geq 335$ МПа, условный предел текучести $\sigma_{0,2} \geq 175$ МПа), превышающими на 20–25% аналогичные характеристики сплавов 5083 и 1550, при одинаковой пластичности с этими сплавами.

Известно, что в алюминии и сплавах на его основе отсутствует порог хладноломкости, когда при понижении температуры происходит переход из вязкого состояния в хрупкое.

Для использования в области криогенных температур комплекс механических свойств Al-Mg-сплавов должен удовлетворять следующим требованиям [1]:

- с понижением температуры испытания σ_B , $\sigma_{0,2}$ и δ сплава увеличиваются;
- рост механических свойств катаного материала (листы и плиты) в продольном и поперечном направлениях при низкотемпературных испытаниях идентичен;
- разница между σ_B и $\sigma_{0,2}$ сплава возрастает при уменьшении температуры испытания;
- прочность образцов с надрезом (σ_B^H) при низкой температуре должна быть больше, чем при комнатной температуре, а также выше $\sigma_{0,2}$ при всех температурах: $(\sigma_B^H / \sigma_{0,2}) > 1$;
- чувствительность к надрезу, которая оценивается отношением прочности разрывного образца с надрезом к прочности гладкого образца (σ_B^H / σ_B), должна иметь значение не ниже 0,8 при всех температурах испытания.

Алюминиево-магниевые сплавы марки 1550М и 1565чМ удовлетворяют вышеперечисленным критериям и сохраняют высокий комплекс механических, пластических и коррозионных свойств при температурах до 77 К, при этом временное сопротивление (σ_B) и предел текучести ($\sigma_{0,2}$), а также циклическая прочность возрастают, удлинение (δ) монотонно повышается [4].

Необходимость увеличения водоизмещения строящихся судов-газовозов обуславливает актуальность совершенствования конструкций грузовых емкостей.

В работе [5] подробно рассмотрены проблемы морской транспортировки сжиженного природного газа (СПГ). Среди рассмотренных материалов для грузовых емкостей (танков) судов-газовозов выделены алюминиевые сплавы как перспективный материал. Материалы резервуаров судов-газовозов работают в

сложных условиях эксплуатации: низкие температуры, статические нагрузки от находящегося в резервуаре жидкого газа, динамические нагрузки при волнении на море, швартовке, при возможных столкновениях судов или посадке их на мели, циклически действующие нагрузки при заполнении и разгрузке. Металл находится в объемном напряженном состоянии, испытывая статическую и динамическую знакопеременную нагрузку, которая усугубляется наличием концентраторов напряжений в зоне сварных швов.

Таким образом, основой для создания надежной конструкции являются не только механические свойства применяемых сплавов, но и механические свойства металла швов и сварных соединений в целом, определяющие характер влияния низких температур на показатели деформации и разрушения сварных конструкций.

По Федеральной целевой программе (ФЦП) России «Развитие гражданской морской техники» на 2009–2016 гг. [6] выполнен ряд научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, направленных на обеспечение проектирования и строительства судов-газовозов в нашей стране.

ФГУП «Крыловский государственный научный центр» совместно с ОАО «Центр технологии судостроения и судоремонта» (ЦТСС) выполнили НИР «СПГ–Альтернатива» [7]. Разработаны принципиальные технические решения по использованию современных конструкционных материалов применительно к созданию грузовых емкостей СПГ для судов-газовозов, обеспечивающие возможности освоения их производства промышленностью Российской Федерации. Выполненная оценка строительной стоимости судов СПГ показала, что с учетом веса вкладных емкостей менее дорогостоящим (по сравнению со сталью 12X18H10T) является использование алюминиевых сплавов [8].

ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» в 2011–2013 годах выполнил комплекс работ по изучению коррозионно-стойких конструкционных алюминий-магниевого сплавов, промышленному освоению деформированных полуфабрикатов для их применения в емкостях судов-газовозов для перевозки СПГ – НИОКР «Криоген» [9]. Опытно-промышленные партии полуфабрикатов из сплавов 1565ч и 1550 в виде катаных листов и плит толщиной от 5 до 80 мм изготовлены на заводах ЗАО «Алкоа Металлург Рус» и ЗАО «Алкоа СМЗ».

Проведенные специалистами ФГУП «Крыловский государственный научный центр» в рамках совместной работы по теме «Криоген» исследования характеристик работоспособности алюминиево-магниевого сплава 1565ч и 1550 в отожженном состоянии (О) и их сварных соединений, показали возможность достижения высокого эксплуатационного ресурса и надежности конструкций. Авторы [10] рекомендуют эти сплавы использовать при проектировании криогенной техники, в том числе конструкций емкостей для хранения и перевозки СПГ.

Включение в Правила классификации и постройки судов Российского морского регистра судоходства (РМРС) издания 2015 года [11] деформируемых алюминиевых сплавов 1565ч и 1550 в перечень материалов, предназначенных к применению в системах хранения груза газозовов (раздел 10 части XIII «Материалы»), обуславливает необходимость разработки технологии сварки алюминиевых сплавов 1565ч и 1550. Это связано с тем, что эффективность использования алюминиево-магниевого сплава для изготовления сварных конструкций криогенного назначения определяется служебными характеристиками сварных соединений в условиях низких температур.

В работе [12] авторы подчеркивают, что для повышения уровня статической и усталостной прочности при комнатной и криогенной температурах в сварных соединениях алюминиевых сплавов 1565ч и 1550, особенно больших толщин, необходимо усовершенствовать технологию сварки стыковых соединений.

Таким образом, исходя из вышеизложенного, следует, что для обеспечения строительства газозовов из отечественных алюминиевых сплавов 1565ч и 1550 требуется разработка технологии сварки, а также требований к сварочным материалам и сварным соединениям для конструкций, работающих при криогенных температурах, которые должны быть одобрены РМРС и включены в Правила классификации и постройки судов [11, 13].

Повышение эксплуатационных характеристик ответственных конструкций криогенного назначения при использовании алюминиевых сплавов, содержащих более 5,5% магния, может сдерживаться и тем, что при криогенной температуре прочность их сварных соединений находится практически на одном уровне со значениями прочности при комнатной температуре [14, 15, 16].

Очевидно, что для эффективного использования возможностей более прочного сплава требуется реализация в сварных соединениях низкотемпературного упрочнения, свойственного основному металлу, у которого при температуре 77 К происходит увеличение прочности, достигающее 20–30% от прочности при комнатной температуре. Иными словами, представляется важным, что свойства сварных соединений алюминиево-магниевого сплавов по отношению к основному металлу, оцениваемые коэффициентом прочности, при низких температурах должны обеспечиваться на уровне, присущем свойствам при комнатной температуре.

В сварных соединениях неизбежно образование участков металла с химической, структурной и механической неоднородностью свойств, что приводит к появлению «слабого» участка в сварном соединении. Таким участком может быть область шва, зона сплавления или зона термического влияния; от поведения которого зависят характеристики разрушения сварного соединения в целом.

Нежелательные последствия разупрочнения могут быть предупреждены технологическими мероприятиями (рациональным выбором состава присадочного металла, формированием мелкозернистой структуры металла шва, снижением термического воздействия на свариваемый металл) или конструктивными мероприятиями, направленными на снижение рабочих напряжений до уровня, допускаемого прочностью металла шва [17, 18].

Актуальность диссертационной работы определяется тем, что до настоящего времени отсутствовали промышленные технологии импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом алюминиево-магниевого сплава морского назначения больших толщин, которые наряду с высокой производительностью обеспечивали прочность сварных соединений, в том числе при криогенных температурах, на уровне, близком к прочности основного металла, и заключается в необходимости разработки: технологии сварки листов и плит из алюминиево-магниевого сплава толщиной до 80 мм; требований к сварочным материалам и сварным соединениям для конструкций из этих сплавов, работающих при криогенных температурах, которые должны быть одобрены РМРС для включения в «Правила классификации и постройки морских судов»; нормативно-технической

документации по сварке термически неупрочняемых алюминиевых сплавов 1565ч и 1550 толщиной до 80 мм.

Целью работы является разработка технологии сварки плавлением деформируемых алюминивно-магниевого сплавов 1565ч и 1550, впервые допущенных к применению в системах хранения груза газозовов, обеспечивающей высокий эксплуатационный ресурс и надежность сварных конструкций при криогенных температурах.

Достижению поставленной цели посвящена настоящая диссертационная работа, которая включает разработку технологии сварки сплавов 1565ч и 1550, выбор сварочных материалов, разработку требований к сварочным материалам и сварным соединениям на базе экспериментальных исследований, исследование влияния конструктивных и технологических факторов сварки на механические свойства сварных соединений из алюминиевых сплавов при криогенной и комнатной 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 $77\text{ K} \div 293\text{ K}$.

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 аргонодуговой сварки плавлением деформируемых алюминивно-магниевого сплавов 1565ч и 1550 применительно к морским конструкциям криогенного применения.

5. Установление зависимости механических свойств сварных соединений в диапазоне температур $77\text{ K} \div 293\text{ K}$ 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.

Научный задел, используемый в диссертационной работе, получен автором при непосредственном участии в разделах «Сварка» в рамках выполнения хозяйственных договоров и контракта по Федеральной целевой программе «Развитие гражданской морской техники» на 2009–2016 гг.:

1. ОКР (ФЦП «РГМТ» на 2009–2016 гг.) «Разработка конкурентоспособных криогенных конструкционных материалов из свариваемых коррозионно-стойких алюминиевых сплавов для проектирования и строительства газозовов, работающих в условиях Крайнего Севера» («Криоген»)). Научно-технический отчет НТБ «ЦНИИ КМ «Прометей». 2013. Инв. 10401⁰.

2. НИОКР (Фонд научно-технического и социального развития «ЦНИИ КМ «Прометей»)) «Разработка конструктивно-технологических мероприятий, направленных на обеспечение технических требований, предъявляемых к сварным соединениям из листовых полуфабрикатов алюминиево-магниевого сплава криогенного назначения». Научно-технический отчет НТБ «ЦНИИ КМ «Прометей». 2013. Инв. 10433⁰.

3. НИОКР (Фонд научно-технического и социального развития «ЦНИИ КМ «Прометей»)) «Разработка технологических режимов и освоение совместно с «Алкоа СМЗ» опытно-промышленных образцов тонколистовых и профилированных полуфабрикатов из нового свариваемого коррозионно-стойкого алюминиевого сплава марки 1565ч для маломерных скоростных катеров и судов различного назначения». Научно-технический отчет НТБ «ЦНИИ КМ «Прометей». 2015. Инв. 10758⁰.

Научные положения, выносимые на защиту

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).

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.

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

Результаты, полученные при разработке технологии импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом в защитном газе полуфабрикатов из деформируемых алюминиево-магниевого сплава 1565ч и 1550 в широком диапазоне толщин. Разработанная технология сварки обеспечит высокий эксплуатационный ресурс и надежность сварных конструкций при криогенных температурах.

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 аргонодуговой сварки алюминиевых сплавов 1565ч и 1550 в толщинах 5,0–80,0 мм, разработке технической и нормативно-технической документации, подготовке материалов для патентования и научных публикаций, представлении результатов работы на отечественных и международных конференциях.

Научная новизна результатов, полученных автором диссертации, 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) ($\alpha = \sigma_{\text{в}}^{\text{нТ}} / \sigma_{\text{в}}^{\text{Т}}$), находится в пределах от 1,0 до 1,2; параметр вязкости,

определяемый отношением прочности образца с надрезом к пределу текучести гладкого образца ($\alpha = \sigma_{\text{в}}^{\text{нТ}} / \sigma_{0,2}^{\text{Т}}$), находится в пределах от 1,5 до 2,2. Полученные значения не ниже аналогичных показателей основного свариваемого металла из алюминиево-магниевого 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.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в следующем:

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.

Апробация результатов работы

Результаты работы докладывались на: ежегодной конференции 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 теме диссертации опубликовано 9 научно-технических работ, из них 4 в журналах, рекомендованных ВАК РФ, и 1 патент РФ на изобретение.

Структура и объем диссертационной работы

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

Глава 1. Состояние вопроса по сварке алюминиевых сплавов для конструкций низкотемпературного применения

В настоящей главе сделан обзор отечественной и зарубежной научно-технической информации по направлению диссертационной работы. Проанализированы требования к свойствам алюминиевых сплавов и их сварным соединениям, применяемым в изделиях низкотемпературного применения и конструкциях морского назначения. Рассмотрены существующие технологии сварки плавлением алюминиевых сплавов. По результатам анализа Правил классификации и постройки судов зарубежных классификационных обществ и Российского морского регистра судоходства определены принципиальные основные требования к деформируемым алюминиевым сплавам и сварным соединениям для использования в конструкциях судов-газовозов.

1.1 Назначение сварных конструкций из алюминиевых сплавов, работающих при низких и криогенных температурах

К сварным конструкциям, эксплуатирующимся при криогенных температурах, относятся сосуды давления, детали и узлы летательных аппаратов, трубопроводы, корпуса высоковакуумных камер, а также емкости для хранения и перевозки сжиженного природного газа (СПГ).

Транспортировка морем СПГ раньше была только небольшой частью всей индустрии природного газа, которая требует больших вложений в разработку газовых месторождений, заводов по сжижению, грузовых терминалов и хранилищ. В последнее время рост спроса на СПГ во всем мире привел к активному развитию береговой инфраструктуры и морских перевозок сжиженного газа судами-газовозами. СПГ хранится и перевозится при атмосферном давлении и температуре сжиженного газа 108 К.

Грузовые емкости для перевозки СПГ работают в сложных условиях: низкие температуры, статические нагрузки от находящегося в резервуаре жидкого газа, динамические нагрузки при волнении на море, швартовке, при возможных столкновениях судов или посадке их на мели, циклически действующие нагрузки при заполнении и разгрузке. Металл, из которого изготавливается грузовая емкость, будет находиться в объемном напряженном состоянии, испытывая

статическую и динамическую знакопеременную нагрузку, которая усугубляется наличием концентраторов напряжений в сварных соединениях конструкций.

Свойства сжиженного газа как груза определяют ряд специфических особенностей судов для его перевозки и специальные требования к материалам. Основное требование к транспортировке сжиженного газа – предупреждение его утечки и попадания на элементы конструкции судна – обусловило техническую сложность и высокую стоимость грузовых емкостей для перевозки сжиженного газа и обслуживающих систем.

Грузовые емкости, их опоры и другие детали крепления должны рассчитываться с учетом возможных сочетаний различных нагрузок. Конструкционные материалы для грузовых емкостей, контактирующие с СПГ, должны обладать высокой прочностью и не охрупчиваться при криогенных температурах. Поэтому в качестве таких материалов, как правило, используются нержавеющая сталь, сплав на основе железа с содержанием никеля 36% (инвар) и алюминиевые сплавы [1].

Значительная часть из эксплуатирующихся в настоящее время судов-газовозов (около 41% мирового флота метановозов) имеет вкладные грузовые емкости сферической формы типа «MOSS», которые изготавливаются из алюминиевых сплавов.

Анализ существующих конструкций, материалов и технологий, применяемых для изготовления грузовых емкостей судов-газовозов, разработка альтернативных конструктивно-технологических решений выполнены ФГУП «Крыловский государственный научный центр» совместно с ОАО «Центр технологии судостроения и судоремонта» («ЦТСС») и ООО ПКБ «Петробалт» в рамках выполнения заказа Минпромторга России по ФЦП «Развитие морской гражданской техники» на 2009–2016 гг. [6, 7]. Сравнительный анализ массогабаритных характеристик при изготовлении вкладной цилиндрической емкости из стали и алюминия позволил авторам сделать заключение о возможном снижении веса примерно в 1,5 раза, а также улучшении технологичности и уменьшении стоимости работ при использовании алюминиево-магниевого сплава марки 1561 (АМг61) в сравнении с материалом из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т.

Основным отечественным документом, устанавливающим требования к судовым конструкциям морских сооружений, являются Правила классификации и постройки морских судов [11]. До 2015 года в Правилах РМРС не было предусмотрено использование алюминиевых сплавов в судах-газовозах. В разделе 5 «Алюминиевые сплавы» части XIII «Материалы» отмечено, что «Требования не распространяются на алюминиевые сплавы для конструкций, работающих при низких, криогенных температурах».

В 2015 году в Правила классификации и постройки морских судов был введен новый раздел 10 «Материалы, используемые в системах хранения грузов газовозов» в части XIII «Материалы», в котором допущены к использованию «деформируемые алюминиевые сплавы 1550, 1565ч, 5083». Химический состав и механические свойства этих сплавов отвечают требованиям разработанной нормативно-технической документации, согласованной с РМРС. Сварочные материалы и технология сварки также подлежат одобрению РМРС – должны отвечать требованиям нормативно-технической документации, согласовываемой с РМРС.

1.2 Свариваемые алюминиевые сплавы

Алюминий и его сплавы как конструкционный материал применяются практически во всех отраслях машиностроения: в строительных конструкциях, судостроении, железнодорожном и автомобильном транспорте, летательных аппаратах, нефтяном и химическом машиностроении, электротехнике, криогенной технике.

Алюминиевые сплавы способны без значительного ухудшения своих прочностных, коррозионных и пластических свойств выдерживать температуры ниже 77 К. В отличие от большинства сталей у алюминиевых сплавов не существует порога хладноломкости, сопровождающегося переходом из вязкого состояния в хрупкое. Это обусловлено кристаллическим строением алюминия и его сплавов, которые кристаллизуются в решетке гранцентрированного куба (ГЦК) и не имеют полиморфных превращений. Вязкость при ударном изгибе у алюминиевых сплавов равномерно понижается с падением температуры. При низких температурах у алюминиевых сплавов вязкий «чашечный» излом наблюдается при относительно малых значениях ударной вязкости [1].

Алюминий имеет высокую теплопроводность, благодаря чему его применяют для изготовления теплообменников различных конструкций, в которых из алюминиевого сплава изготавливается внутренний сосуд.

Ю. П. Солнцевым и его соавторами [1] отмечен ряд особых свойств алюминия.

Теплоемкость и теплопроводность алюминия с понижением температуры уменьшаются, причем ниже 173 К они падают более резко. При этом удельная теплоемкость алюминиевых сплавов остается выше, чем у аустенитных сталей.

Температурный коэффициент линейного расширения алюминиевых сплавов выше, чем аустенитной стали. Это способствует увеличению термических напряжений, особенно в жесткозашемленных элементах конструкций в случае их охлаждения от комнатной до рабочей температуры. Поэтому на стадии проектирования конструкции необходимо предусматривать применение компенсаторов деформации.

Статическая и усталостная прочность алюминиевых сплавов с понижением температуры увеличиваются на 35 – 60 % и 20 – 40 %, соответственно, условный предел текучести увеличивается менее интенсивно – на 15 – 25 %.

Пластичность при снижении температуры обычно несколько возрастает или остается на уровне пластичности при комнатной температуре.

Для изготовления деталей и сварных конструкций криогенного назначения могут применяться литейные алюминиевые сплавы [19, 20], деформируемые термически упрочняемые и термически неупрочняемые алюминиевые сплавы [21, 22]. Наиболее широкое применение получили деформируемые термически неупрочняемые алюминиево-магниевого сплавы с содержанием магния до 7 % [21, 23]. Сплавы системы Al-Mg сочетают в себе высокую прочность, пластичность, хорошую свариваемость и коррозионную стойкость [24–27].

За рубежом (США, Япония, Норвегия) предпочтение отдают алюминиево-магниевому сплаву марки 5083 (Mg 4,0 – 4,9 %) в отожженном состоянии (О). Сплав признан МАКО в качестве конструкционного материала для строительства емкостей газозовозов с температурой эксплуатации 108 К. В условиях криогенных температур сплав 5083 обладает наиболее благоприятным сочетанием свойств: в отожженном состоянии (О) и при комнатной температуре (293 К) сплав 5083 имеет

гарантированный предел текучести $\sigma_{0,2} \geq 125$ МПа, а при температуре 108 К – $\sigma_{0,2} \geq 155$ МПа, относительное удлинение составляет $\delta \geq 34$ % [5].

В России для изготовления сварных конструкций криогенного назначения правилами Ростехнадзора допущены деформируемые термически неупрочняемые алюминий-магниево-магниевые сплавы марок 1520 (Mg 1,8 – 2,6 %), 1530 (Mg 3,2 – 3,8 %), 1550 (Mg 4,8 – 5,8 %), 1560 (Mg 5,8 – 6,8 %).

Сплавы низкой прочности марок 1520 и 1530 рекомендованы для применения в слабонагруженных сварных конструкциях, способных работать длительное время в агрессивной коррозионной среде при температурах до 4 К. Сплавы средней прочности марок 1550 и 1560 применяются для изготовления нагруженных деталей, в том числе сварных обечаек, днищ, фланцев и др. Рекомендуемый диапазон температур эксплуатации изделий от 20 до 423 К.

В условиях одноосного растяжения при комнатной температуре сплав марки 1560 по прочностным характеристикам превосходит сплав марки 1550. При понижении температуры испытаний от 293 К до 77 К предел прочности обоих сплавов значительно возрастает, при этом сплавы становятся практически равнопрочными. Предел текучести увеличивается в меньшей степени. Характеристики пластичности, в частности относительное удлинение, у сплава марки 1550 увеличивается в 1,5 - 2 раза, а у сплава марки 1560 – удлинение изменяется в меньшей степени (таблица 1), т.е. при криогенных температурах сплав марки 1550 более пластичен [1].

Т а б л и ц а 1 – Механические свойства алюминиево-магниевых сплавов при комнатной и криогенной температуре (лист отожженный)

Марка сплава	Температура испытания, К	Временное сопротивление σ_B , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	Относительное сужение ψ , %
1520	77	350	130	26	62
	293	190	90	26	64
1550	77	420	160	44	37
	293	290	130	23	42
1560	77	440	200	34	30
	293	340	150	20	25
5083	77	404	150	42	—
	293	305	140	23	—
1565ч [4]	77	478	219	35	—
	293	365	258	20	—

Необходимо отметить, что при неоднократных охлаждениях до температур ниже 77 К в структуре полуфабрикатов из отожженного (О) сплава АМг6 (1560) наблюдается расслоение, делающее их непригодным для применения в условиях жидкого водорода с температурой 20 К. В нагартованном сплаве АМг6 расслоения наблюдаются уже при температурах жидкого кислорода 90 К [28]. Сплавы с более низким содержанием магния обладают высокой устойчивостью против любых видов коррозии как в отожженном, так и в нагартованном состоянии [29–31].

Отечественный сплав марки 1550 (Mg 4,8 – 5,8 %) по своим механическим свойствам, коррозионной стойкости и свариваемости близок зарубежному сплаву-аналогу марки 5083 [32, 33]. Сплав марки 1550 хорошо сваривается дуговыми методами, практически не разупрочняется в околошовной зоне сварного соединения. Прочность стыковых соединений сплава в отожженном состоянии составляет не менее 0,9 от значения временного сопротивления основного металла. Благодаря этому, практически полностью реализуются прочностные свойства полуфабрикатов в сварных конструкциях, обеспечивая их максимальную весовую отдачу. Однако сплавы марок 5083 и 1550 в отожженном состоянии при комнатной температуре имеют невысокие гарантированные прочностные свойства: фактические пределы текучести этих сплавов не превышают 140 МПа.

Известно, что в алюминиево-магниевых сплавах увеличение содержания основного легирующего элемента – магния – повышает прочность и текучесть

сплавов, при этом показатель пластичности – относительное удлинение меняется слабо. Механические свойства сварных соединений также определяются содержанием магния в сплаве [34].

В последние годы ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» совместно с ЗАО «Алкоа Металлург Рус» и ОАО «НИИ стали» разработали новый деформируемый термически неупрочняемый алюминиево-магниевый сплав марки 1565ч [3]. Содержание в сплаве основного легирующего элемента – магния – находится в пределах 5,1 – 6,0 %. Сплав характеризуется повышенными прочностными свойствами при комнатной температуре, превышающими на 20 – 25 % характеристики сплавов марок 5083 и 1550, и пластичностью на уровне сравниваемых сплавов.

Катаные листы и плиты, а также прессованные и кованые полуфабрикаты, из сплава 1565ч могут использоваться как конструкционный материал в судостроении, авиакосмической технике, транспортном машиностроении для сварных конструкций, а также в качестве брони [35]. Сплав 1565ч удовлетворяет основным условиям пригодности материала для использования при криогенных температурах [4].

1.3 Основные критерии оценки пригодности алюминиевых сплавов для работы в условиях низких и криогенных температур

Основой выбора материала для создания надежной конструкции являются его механические свойства, отображающие характер влияния низких температур на показатели деформации и разрушения [36, 37].

Для конструкторов криогенного оборудования первостепенное значение имеет определенное соотношение прочности и пластичности материала.

Можно ожидать, что по мере снижения температуры материалы станут более хрупкими, и в действительности наблюдается снижение пластичности для многих материалов. Будучи очень прочным, материал может быть хрупким – величина поглощенной энергии при ударном испытании такого материала очень мала. В этом случае разрушение происходит без образования трещин, и такой материал в значительной степени подвержен опасности разрушения вследствие высокого уровня локализованных напряжений. Пластичный материал, наоборот, будет

поглощать высокую ударную энергию до образования трещин, и его способность пластически деформироваться обеспечит возможность перераспределения и выравнивания напряжений. Максимальные относительное удлинение и поперечное сужение при испытании гладкого образца на растяжение являются двумя классическими характеристиками пластичности; прочность при ударном испытании характеризует вязкость материала и служит для оценки влияния надреза; вязкость надрезанного образца – третий критерий, который широко используют для оценки возможности применения материалов при криогенных температурах.

В отличие от большинства сталей, у алюминия и его сплавов не существует порога хладноломкости – перехода из вязкого состояния в хрупкое при низких температурах, что обусловлено его кристаллической структурой. При снижении температуры значения временного сопротивления, предела текучести, относительного удлинения, относительного сужения, предела усталости, характеристик вязкости разрушения алюминиевых сплавов возрастают. Причем при понижении температуры предел текучести алюминиевых сплавов растет медленнее, чем временное сопротивление, так как алюминий имеет ГЦК решетку [1, 2, 4].

Сочетание малой температурной чувствительности предела текучести и роста временного сопротивления с понижением температуры при высоком удлинении является фундаментальным свойством металлов с ГЦК решеткой. Этим объясняется их высокая надежность при работе в области низких температур. Поэтому алюминиевые сплавы представляют большой интерес для применения при температурах вплоть до 4 К [1, 36].

Опыт применения алюминиевых сплавов для изготовления конструкций, эксплуатируемых при низких температурах, включая хранение и транспортировку сжиженных природных газов, показал, что наиболее удачным сочетанием прочности, пластичности, свариваемости и коррозионной стойкости обладают термически неупрочняемые сплавы системы Al-Mg.

Отечественными и зарубежными исследователями было получено достаточное количество данных для сравнения поведения алюминиево-магниевого сплавов с разным содержанием магния, что позволяет систематизировать

результаты исследований и выявить характерные особенности сплавов, пригодных для работы в условиях низких и криогенных температур [24–27, 38].

Исследования алюминиевых сплавов разных систем легирования, а также их сварных соединений при низких температурах показали:

- отношение (σ^H_B / σ_B) меняется от 0,3 до 0,6 у сплавов системы Al-Zn-Mg, от 0,6 до 0,9 у сплавов системы Al-Mg-Si;
- отношение $(\sigma^H_B / \sigma_{0,2})$ изменяется от 0,4÷0,6 у сплавов системы Al-Zn-Mg, до 1,4–2,2 у сплавов системы Al-Mg.

Экспериментальные данные позволяют считать материалом, пригодным к использованию в условиях криогенных температур сплав, у которого:

$$(\sigma^H_B / \sigma_B) \approx (0,8–1) \text{ и } (\sigma^H_B / \sigma_{0,2}) > 1.$$

Если отношение $(\sigma^H_B / \sigma_{0,2}) > 1$, это означает, что материал будет «течь» в гладкой части рабочего сечения перед разрушением образца в надрезе и хрупкого разрушения не произойдет [24, 38, 39].

Результаты работ [36, 38, 39] показали, что механические свойства алюминиево-магниевого сплава в интервале температур 77 К ÷ 293 К изменяются так же, как у алюминия: временное сопротивление и предел текучести возрастают, но предел текучести возрастает в меньшей степени, чем временное сопротивление, и отношение $\sigma_{0,2} / \sigma_B$ снижается. Удлинение при понижении температуры до 77 К монотонно повышается. Вязкость в надрезе $\sigma_B^H / \sigma_{0,2}$ превышает значение 1,0 во всем температурном диапазоне.

Таким образом, свойства алюминиевого сплава, предназначенного для работы в условиях низких и криогенных температур, должны удовлетворять следующим требованиям:

1. С понижением температуры испытания временное сопротивление, предел текучести и относительное удлинение сплава должны увеличиваться, причем разница между временным сопротивлением и пределом текучести сплава $(\sigma_B - \sigma_{0,2})$ должна возрасти при снижении температуры испытания.

2. Рост механических свойств катаного материала (листы и плиты) в продольном и поперечном направлениях при низкотемпературных испытаниях должен быть идентичным.

3. Отношение прочности разрывного образца с надрезом к прочности гладкого образца – (σ_B^H/σ_B) в диапазоне температур 77 К – 293 К должно иметь значения в интервале 0,8–1,0.

4. Прочность образцов с надрезом должна быть выше значений предела текучести при всех температурах: $\sigma_B^H/\sigma_{0,2} \geq 1,0$.

С целью получения сравнительных данных о склонности металла к хрупкому разрушению в исследовательской практике зачастую проводятся испытания на ударную вязкость образцов с полукруглым надрезом (КСУ).

Определение прочности, пластичности, ударной вязкости, изучение характера изломов образцов, испытанных в интервале температур 77 К – 293 К, позволяет проводить качественное сопоставление различных материалов и их преимущественную пригодность для данной конструкции.

Для надежной работы конструкций при криогенных температурах необходимо обеспечение прочных и плотных соединений узлов и деталей. Для изготовления крупногабаритных резервуаров, баков и контейнеров применяют сварку, поэтому исследования свариваемости алюминиевых сплавов являются обязательными при решении вопроса об их использовании в технике криогенных температур [22, 38, 39].

Сварка плавлением сопровождается кристаллизацией расплавленной ванны, образованием интерметаллидных фаз, распадом пересыщенных твердых растворов. В околошовной зоне происходит интенсивный рост зерна, вследствие чего может снижаться пластичность и вязкость металла. Состояние и структура околошовной зоны могут оказаться решающими при оценке свариваемости металла.

Основными видами внутренних дефектов, образующихся при сварке плавлением алюминиевых сплавов, являются трещины, непровары, межваликовые несплавления, пористость, вольфрамовые и окисные включения. Наличие этих дефектов дополнительно усложняет работу конструкций при низких температурах. Многократные подварки и периодические нагревы снижают усталостную прочность основного металла и сварных соединений, так как ведут к увеличению зерна и коагуляции фаз на границах [40, 41].

Оценка свариваемости конструкционных сплавов для криогенного применения включает анализ уровня механических свойств сварного соединения и

основного металла, определение склонности к образованию дефектов, прежде всего трещин в металле шва и зоне термического влияния, определение чувствительности сварного соединения к концентраторам напряжений и склонности к хрупкому разрушению [22, 37].

Для оценки пригодности материала к использованию в сварных конструкциях криогенного применения определяется коэффициент прочности сварных соединений и чувствительность металла различных зон сварных соединений к изменению температуры в интервале 77 К – 293 К. Если чувствительность к надрезу металла различных зон сварных соединений и основного материала идентичны, сплав перспективен для криогенного применения [37].

1.4 Сварка алюминия и его сплавов

Для алюминия и его сплавов применяют практически все промышленные способы сварки плавлением. К основным методам сварки относятся: аргонодуговая сварка неплавящимся электродом с ручной подачей присадочной проволоки, механизированная сварка в защитном газе (традиционная и импульсная), автоматическая сварка неплавящимся электродом, плазменная сварка, лазерно-дуговая (комбинированная сварка). Каждый способ сварки имеет свои особенности, которые необходимо учитывать для наиболее эффективного их использования при изготовлении конструкций различного назначения.

Главными вопросами, представляющими интерес при разработке технологии сварки алюминиевых деформируемых полуфабрикатов, в том числе больших толщин, направленных на обеспечение стабильности процесса, качественного формирования сварных соединений, а также увеличения производительности сварочных работ, являются следующие:

- выбор рода тока, защитного газа (аргона, гелия или их смеси), сварочных материалов [40, 42–47];
- выбор формы разделки свариваемых кромок [48–51], технологических вариантов и технических приемов их заполнения [52];
- использование форсированных режимов сварки на токах более 650 А, а также электродов (неплавящихся или плавящихся) большого диаметра [53–56];

- применение предварительного или сопутствующего подогрева кромок и послесварочной обработки [57];
- выбор или разработка нового сварочного оборудования [58–66];
- исследование свариваемости сплавов и свойств сварных соединений [14, 15, 38, 39, 41, 64, 68, 69];
- выбор методов контроля качества сварных соединений [70];
- производительные методы сварки [57, 71].

Сварка в инертных газах – наиболее распространенный способ сварки, применяющийся при изготовлении сварных конструкций из алюминиевых сплавов. Сварка выполняется неплавящимся вольфрамовым электродом (ручная и механизированная) или плавящимся электродом (полуавтоматическая и автоматическая).

Выбор вида сварки в инертных газах определяется толщиной свариваемого металла, конструкцией изделия и масштабами производства.

В качестве сварочных материалов используются защитный газ (аргон высшего сорта по ГОСТ 10157, гелий высшей чистоты или их смеси) и неплавящийся электрод (вольфрамовые прутки марки ЭВЧ по ГОСТ 23949).

1.4.1 Ручная сварка в защитных газах неплавящимся электродом

При ручном способе сварки возникают трудности, связанные с поддержанием постоянства длины дуги. Колебания дугового промежутка отражаются на основных параметрах режима – величине тока и напряжении, что, в свою очередь, оказывает влияние на глубину проплавления металла и скорость плавления электрода. Качество швов, выполненных ручным способом, во многом зависит от квалификации сварщика, условия работы которого в случае сварки толстостенных конструкций усложняются необходимостью предварительного и сопутствующего подогревов свариваемого соединения [34, 72].

Несмотря на низкую производительность ручной сварки ее применение в процессе изготовления конструкций ответственного назначения, например, при создании авиакосмической техники весьма актуально. В работе [61] разработана технология ручной аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом для изготовления днищ топливных баков летательных аппаратов из алюминиево-

магниевого сплава АМг6. Выполняются стыковые соединения плит размерами 1100×2600 и 1490×2600 мм толщиной 70 мм.

Специалистами компании МТИ и объединения Motoren und Turbinen (Германия) разработан и запатентован способ сварки неплавящимся электродом на постоянном токе прямой полярности в смеси защитных газов 90He + 10Ar, применимый для сварки изделий из алюминиевых сплавов толщиной ≥ 5 мм. При данном способе температура дуги повышается настолько, что оксидный слой частично испаряется и частично разламывается на фрагменты, которые под действием дуги и расплавленного металла удаляются с поверхности соединения. Высокая температура дуги устраняет необходимость в предварительном подогреве свариваемых деталей. Указанная защитная газовая смесь при зажигании дуги легко ионизируется, что дает возможность надежно зажигать дугу и изменять ее длину при сварке в пределах 0,5–8 мм без ее обрыва [42].

1.4.2 Автоматическая сварка неплавящимся электродом

Автоматическую сварку алюминиевых сплавов неплавящимся электродом выполняют на переменном токе в среде защитных газов в нижнем положении. Авторами [54] успешно осуществлена автоматическая сварка неплавящимся электродом в аргоне стыковых соединений из алюминиевого сплава марки 1561 (АМг61) толщиной 100 мм. Для достижения этой цели был модернизирован серийный автомат АДС–1000–2: увеличена скорость подачи электродной проволоки до 360 м/ч; применена специальная водоохлаждаемая горелка для сварки в защитных газах; добавлены устройства для управления расходом защитного газа.

Повышения проплавляющей способности сварочной дуги можно достичь путем использования неплавящихся электродов большого диаметра и увеличением силы сварочного тока на прямой полярности, что позволяет выполнить двустороннюю сварку алюминиево-магниевого сплава толщиной до 75 мм без разделки кромок.

ОАО «Электромеханика» (г. Ржев, Тверская обл.) разработан комплекс СКПД-2500, предназначенный для сварки продольных и кольцевых швов неплавящимся погруженным электродом изделий из алюминиевых сплавов, а

также титана и стали [65]. Данный способ сварки позволяет выполнить сварку изделий толщиной 6–55 мм за один проход без разделки свариваемых кромок.

Разрабатываются новые конструкции неплавящихся электродов позволяющие улучшить технологические показатели процесса дуговой сварки погруженным электродом и одновременно увеличить ресурс работы электрода [56].

Гелиево-дуговая сварка вольфрамовым электродом алюминиевых сплавов характеризуется высокой концентрацией энергии, увеличивающей глубину проплавления и скорость сварки. Проволока в процессе сварки является электрически нейтральной и подается специальным подающим механизмом в зону анодного пятна дуги на поверхности свариваемого изделия. Применение гелия в качестве защитного газа повышает глубину проплавления в 1,5 раза по сравнению с аргоном [73]. Этот способ сварки не требует сложной разделки кромок. Высокая проплавляющая способность позволяет выполнять без разделки кромок одностороннюю сварку плит толщиной до 30 мм, и двустороннюю – толщиной до 70 мм.

Наряду с этим способ выдвигает ряд требований к технологии сборки заготовок и их сварке. Гелиево-дуговую сварку необходимо производить при небольшом дуговом промежутке, постоянство которого должна обеспечивать система автоматического регулирования напряжения дуги, что зависит от стабильности работы источника питания. Сварка выполняется на постоянном токе прямой полярности и только в автоматическом режиме.

Автоматическая сварка неплавящимся электродом трехфазной дугой применяется для увеличения производительности и уменьшения количества проходов в многослойных швах при сварке конструкций из алюминиевых сплавов больших толщин [34, 74, 75].

Плазменно-дуговая сварка – сварка алюминиевых сплавов плазменной сваркой (сжатой дугой) на переменном токе промышленной частоты, обеспечивает хорошую очистку металла при сохранении достаточно высокой стойкости вольфрамового электрода. При плазменной сварке на постоянном токе обратной полярности применяют горелки с усиленным принудительным охлаждением вольфрамового электрода.

Основными характеристиками, отличающими плазменную дугу от обычной электрической дуги, являются:

- более высокая температура (30000°C – плазменная дуга; $5000\text{--}7000^{\circ}\text{C}$ – дуга, горящая в среде аргона);
- меньший диаметр дуги;
- цилиндрическая форма дуги (в отличие от обычной конической);
- давление плазменной дуги на металл в 6–10 раз выше, чем у обычной;
- возможность поддержания дуги на малых токах (от 10 А).

Преимуществом плазменной сварки является высокая скорость, значительное сокращение зоны термического влияния, стабильность процесса и жесткость дуги, благодаря чему не требуется контроль и поддержание постоянства длины дуги, что облегчает выполнение ручной сварки.

На ГУП ПО «Уралвагонзавод» (г. Нижний Тагил) с целью повышения качества сварки железнодорожных цистерн для транспортировки сжиженных газов (O_2 , H_2 , N_2) применили плазменную сварку для внутреннего котла цистерны, изготавливаемого из алюминиевого сплава (АМцС, АМг5) [57]. Для зачистки кромок под сварку внедрена магнито-абразивная обработка, существенно повысившая прочностные показатели шва. Установлено, что при плазменной трехпроходной сварке с электромагнитным перемешиванием достаточно применять его только при третьем проходе – переплавлении обратного валика; в результате величина КСУ с 31 Дж/см^2 выросла до 33 Дж/см^2 при нормируемом значении 25 Дж/см^2 . Для удаления выпуклости сварного шва вместо фрезерования применяли прокатку, что даже без последующей термообработки благоприятно сказывалось на механических свойствах соединения.

Плазменно-дуговой сваркой на переменной полярности можно соединять листы алюминиевого сплава толщиной 6–16 мм без разделки кромок. Сварной шов получается узким, имеет однородное строение и по своей прочности близок к основному металлу [76].

В [77] установлено, что прочность сварных соединений сплава 1460 толщиной 3–10 мм, выполненных плазменной сваркой, превышает прочность соединений, полученных многопроходной аргонодуговой сваркой. Применение плазменной

сварки по сравнению с аргонодуговой позволяет сократить в 2,5–3,0 раза протяженность зоны термического влияния.

В работе [78] показаны преимущества способа плазменной сварки проникающей дугой при изготовлении труб и листов толщиной 10 мм из низко- и высоколегированной стали, а также алюминия без подготовки кромок.

В результате экспериментальных работ, проведенных на предприятиях ОАО «Криогенмаш» и ООО «Технологический центр ТЕНА», созданы новое оборудование и новый способ сварки алюминиевых сплавов динамической плазмой [79]. Динамическая плазма создается за счет пульсации напряжения и скорости истечения плазмы из плазмообразующего канала плазмотрона.

В «ЦНИИ КМ «Прометей» разработана технология и выпущена нормативно-техническая документация на автоматическую плазменно-дуговую сварку алюминиевых сплавов толщиной от 6 до 20 мм [80–83]. Технология сварки обеспечивает достижение высоких свойств сварных соединений алюминиевых сплавов [84]. Кроме работ сотрудников «ЦНИИ КМ «Прометей», следует отметить значительный вклад специалистов ЦНИИТС в разработку оборудования и продвижение плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов [85, 86].

Сварочная дуга, получаемая в плазмотроне, более устойчивая и эластичная, чем трехфазная горящая от вольфрамовых электродов, поэтому при ее применении точность сборки кромок и точность позиционирования плазмотрона меньше влияют на качество швов. В настоящее время плазменно-дуговой сваркой изготавливаются конструкции из алюминиевых сплавов толщиной до 20 мм [86, 87].

При производстве воздухоразделительных установок на ГОУ ВПО «ТулГУ», предназначенных для получения жидких газов аргона, кислорода, азота и др. из воздуха, используются коррозионно-стойкие стали типа 18-10 и алюминиевые сплавы АМг5, АМцС, способные сохранять свои свойства при криогенных температурах [88].

1.4.3 Сварка плавящимся электродом

Преимущества процесса сварки плавящимся электродом – хорошее перемешивание металла ванны, меньшая вероятность получения в металле шва крупных окисных включений, высокая производительность при сварке металла большой толщины.

При сварке алюминиевых сплавов плавящимся электродом источником тепла является дуга, возбуждаемая между изделием и электродной проволокой, подаваемой в зону дуги со скоростью, равной скорости ее плавления. Сварку плавящимся электродом можно производить в автоматическом режиме (специальными автоматами) или полуавтоматическом (автоматическая подача электродной проволоки). При сварке алюминиевых сплавов в качестве защитного газа используют аргон или смесь аргона с гелием (например, 50% Ar + 50% He). Сварку алюминия ведут на постоянном токе обратной полярности, что обеспечивает надежное разрушение окисной пленки на свариваемых кромках и хорошее формирование шва. Постоянство параметров дуги (силы тока и напряжения) поддерживается путем ее саморегулирования или принудительного регулирования (при автоматической сварке).

Питание дуги при сварке плавящимся электродом необходимо осуществлять от источников постоянного тока с жесткой или пологопадающей внешней вольтамперной характеристикой.

Сварка в узкий зазор обладает рядом достоинств, связанных с пониженным тепловложением, уменьшением в 2–3 раза количества наплавленного металла и относительно небольшим объемом сварочной ванны, снижением содержания водорода, что обуславливает уменьшение образования межваликовых несплавлений и расслоений [89].

1.4.4 Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом

Импульсное изменение тока вызывает интенсивные гидродинамические колебания расплавленного металла в сварочной ванне, что оказывает положительное воздействие на ванну жидкого металла, способствуя получению более мелкой структуры металла шва, плавных очертаний валиков швов с мелкочешуйчатым строением. Также происходит лучшее дробление окисных пленок и более полное протекание реакции взаимодействия поверхностной влаги,

имеющейся на электродной проволоке, с металлом на стадии формирования капли. Эти особенности импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом крайне важны с точки зрения сокращения пористости в металле швов и предупреждения дефектов, вызванных залеганиями окисных пленок и несплавлениями.

Существующее на рынке оборудование для импульсно-дуговой сварки способно обеспечить удовлетворительное качество сварных соединений. Ряд зарубежных и отечественных производителей сварочного оборудования работают над улучшением принципа формирования импульсов тока, что обеспечит адаптивное дозирование величины энергии на этапе формирования капли расплавленного электродного металла и управляемый каплеперенос [59].

Проведенные исследования показали перспективность применения способа импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом в инертных газах алюминиевых сплавов, в том числе толстолистовых полуфабрикатов (50 мм и более) [60].

Благодаря пространственной устойчивости импульсного разряда применение способа импульсно-дуговой сварки позволяет избежать неприятного явления – блуждания катодного пятна по стенкам разделки, особенно при сварке по узкощелевому зазору, как это часто наблюдается при обычной дуговой сварке плавящимся электродом. Это обеспечивает равномерное сплавление валиков со свариваемыми кромками и предыдущим слоем, а также значительно упрощает ведение самого процесса сварки.

Применительно к изготовлению крупногабаритных топливных емкостей летательных аппаратов из высокопрочного алюминиевого сплава марки 1201 толщиной 40 мм и сплава марки 1560 (АМг6) толщиной 70 мм разработана технология автоматической импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом и комплекс сварочного оборудования, обеспечивающих высокий уровень свойств сварных соединений [64, 90, 91]. Работы представлены группой специалистов НПО «Техномаш», НПО «Композит», ООО «Авиаспецмонтаж», ФГУП «Государственный космический научно-производственный центр имени М. В. Хруничева» и Самарский завод «Прогресс».

Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом не требует больших затрат на подготовку производства, так как может базироваться на стандартном

сварочном оборудовании. При прохождении импульса тока резко возрастают электродинамические силы пинч-эффекта, сжимающие расплавленный металл и перемещающие его вдоль оси дуги. Регулируя частоту импульсов и амплитуду тока, можно активно воздействовать на процесс переноса металла в дуговом промежутке, получая мелкокапельный перенос при малом эффективном токе. Сварные соединения обладают высокими значениями прочностных и пластических характеристик. Внедрение технологии импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом вместо ручной аргонодуговой сварки обеспечивает снижение количества внутренних дефектов в сварных швах на 30–40% при одновременном увеличении производительности сварочных работ в 4–5 раз [90, 91].

1.4.5 Гибридная сварка алюминиевых сплавов

В последнее время появляется все больше информации о гибридном способе лазерно-дуговой (лазер + MIG сварка) сварки алюминиевых сплавов. Схема лазерно-дуговой сварки представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Схема лазерно-дуговой сварки.

Лазерно-дуговая сварка – полностью автоматизированный процесс, сочетающий в себе преимущества двух испытанных сварочных процессов – лазерного луча и дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа.

Лазерный луч благодаря высокой плотности энергии, расплавляет металл внутри небольшого пятна нагрева, что дает глубокий и узкий провар. Процесс дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа образует широкое пятно нагрева и вводит в общую сварочную ванну присадочный материал, который заполняет образованную лазерным лучом воронку и обеспечивает надежное соединение кромок. В результате получают сварные швы с глубоким

проплавлением и высокой прочностью. Способ лазерно-дуговой сварки позволяет сварить детали без разделки кромок толщиной 30 мм за один проход [92].

Разработкой технологии и оборудования для гибридной лазерно-дуговой сварки алюминиевых сплавов, а также разнородных металлов (алюминиевый сплав и сплав титана, алюминиевый сплав и сплав меди), в настоящее время успешно занимается группа специалистов из Института лазерных и сварочных технологий СПбГПУ [93].

1.4.6 Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов

Сварка трением с перемешиванием (СТП) является разновидностью способов сварки давлением, при которой формирование непрерывной структурной связи в сварном соединении обеспечивается при совместном действии локального нагрева и пластического деформирования металла шва.

Материал свариваемых кромок нагревается за счет теплоты, выделяющейся при его трении с рабочими поверхностями вращающегося сварочного инструмента, до пластичного состояния, перемешивается и перемещается в зону, освобождающуюся позади движущегося инструмента, с последующим охлаждением и затвердеванием пластифицированного металла.

Процесс формирования шва в результате нагрева, перемещения (перемешивания), затвердевания и охлаждения металла протекает в замкнутом объеме, ограниченном опорным уступом и технологической подкладкой, в условиях совместного действия нагрева и давления, т. е. требует реализации определенных энергосиловых параметров (тепловложения и прикладываемых усилий) [94].

За рубежом СТП алюминиевых сплавов применяется во многих отраслях промышленности для изготовления конструкций различного назначения, в частности в судостроении – производство сварных панелей и строительство катеров-катамаранов, нефтедобывающих платформ, рефрижераторов, посадочных платформ для вертолетов, мачт и бонов [95, 96].

Большое количество работ посвящено выбору режимов сварки – скорости вращения инструмента и скорости сварки, влияющих на качество сварных соединений. Указанные параметры зависят от марки свариваемого сплава (серии 2000, 5000 и 7000) и его толщины [97–99]. При правильно подобранных параметрах

сварки сварные соединения показывают высокие механические свойства и удовлетворительную пластичность.

В «ЦНИИ КМ «Прометей» создан инструмент [100], специализированное оборудование на базе фрезерного станка и разработана технология сварки трением с перемешиванием стыковых соединений из алюминиевых сплавов различных систем легирования толщиной от 2 до 10 мм и выпущена соответствующая нормативно-техническая документация [101, 102].

1.5 Механические свойства сварных соединений алюминиевых сплавов при комнатной и криогенной температурах

Эффективное использование алюминиевого сплава в конструкциях криогенного назначения требует реализации в сварных соединениях эффекта низкотемпературного упрочнения, свойственного основному металлу при снижении температуры, которое при температуре 77 К может достигать 20–30% в зависимости от химического состава сплава.

Сварные соединения алюминиевых сплавов, выполненные сваркой плавлением, характеризуются наличием химической, структурной и механической неоднородности металла в различных зонах сварного соединения (металл шва, металл зоны термического влияния, основной металл). Существенные отличия свойств в этих зонах приводят к появлению «слабого» участка в сварном соединении (в частности в области шва, зоне сплавления или зоне термического влияния), от поведения которого зависят характеристики разрушения в целом.

В работах, посвященных исследованиям механических свойств сварных соединений алюминиевых сплавов в условиях криогенных температур, отмечается повышение прочности сварных соединений при снижении температуры [38].

Однако низкотемпературное упрочнение основного металла и его сварных соединений может быть неодинаковым в зависимости от химического состава алюминиевого сплава. Для сварных соединений сплава АМг5 низкотемпературное упрочнение аналогично основному металлу; равнопрочность обеспечивается как при комнатной, так и при криогенной температурах [41]. В то же время, сварные соединения более легированных алюминиевых сплавов характеризуются низкотемпературным упрочнением в неодинаковой степени с основным металлом [103].

Эффективность применения деформируемых алюминиево-магниевых сплавов в сварных конструкциях криогенного назначения определяется достигаемым уровнем прочностных свойств их сварных соединений, который существенно зависит от следующих факторов: состав основного металла, способ сварки (плавлением или в твердой фазе), состав присадочного материала и температура эксплуатации [17].

Анализ свойств основного металла и сварных соединений листов толщиной 5 и 7 мм из сплава 1565ч в отожженном состоянии (О), выполненных аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом с применением различных присадочных проволок, показывает, что наиболее высокие прочностные свойства при нормальной температуре испытаний достигаются при использовании сварочного материала марок СвАМг61 и СвАМг63 по ГОСТ 7871 [104–106], химический состав которых наиболее близок к основному металлу по содержанию основных легирующих элементов, в частности по магнию 5,5– 6, %.

В работе [103] проведены исследования сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов трех систем легирования – Al-Mg-Mn (АМг6Н), Al-Cu-Mn (1201) и Al-Cu-Li (1460), с целью установления закономерностей изменения физико-механических свойств и особенностей разрушения сварных соединений в широком температурном интервале от 300 до 20 К. При аргонодуговой сварке неплавящимся электродом использовали сварочную проволоку, близкую по химическому составу основному металлу.

Автором [103] установлено, что значения временного сопротивления сварных соединений сплавов АМг6Н, 1201 и 1460, при одноосном растяжении в условиях комнатной температуры, составляли соответственно 330, 350 и 400 МПа. Прочность основного металла при этом была на 20–25% выше, чем у сварных соединений (рисунок 2), т. е. коэффициент прочности сварных соединений составляет не более 0,8. Снижение температуры испытания до 77 К на 10–20% повышает прочность основного металла. Значения временного сопротивления сварных соединений по сравнению с комнатной температурой увеличиваются только на 5–10%, оставаясь ниже, чем у основного металла. Коэффициент прочности сварных соединений не превышает 0,7.

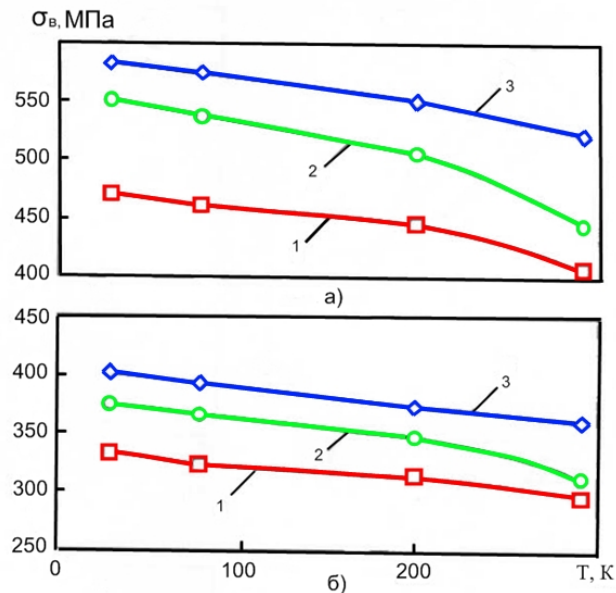


Рисунок 2 – Влияние низких температур на временное сопротивление образцов алюминиевых сплавов АМг6Н (1), 1201 (2) и 1460 (3) (а) и их сварных соединений (б) [101].

В различных зонах сварных соединений сплавов АМг6Н, 1201 и 1460 номинальное разрушающее напряжение в условиях внецентренного растяжения повышается на 10–20% при понижении температуры испытаний от 300 до 20 К. Меньшей склонностью к низкотемпературному упрочнению отличается сплав АМг6Н, что автор [103] связывает со значением диаметра атома магния (0,3120 нм) – основного легирующего элемента сплава АМг6Н. Меньшее значение диаметра атома меди (0,256 нм), содержащегося в сплавах 1201 и 1460, по сравнению с магнием способствует более активному движению дислокаций, и при снижении температуры испытаний обеспечивается равномерное распределение поля напряжений. У всех сплавов существует общая закономерность снижения удельной работы распространения трещины (УРРТ) при изменении температуры испытаний. Во всех зонах сварных соединений УРРТ снижается при понижении температуры испытания и зависит от химического состава сплава. Наибольшие значения УРРТ при 20 К имеют сварные соединения сплава 1460. Независимо от марки сплава минимальными значениями показателей сопротивления разрушению при всех значениях температуры испытаний характеризуется зона сплавления шва с основным металлом, что обусловлено неоднородностью структуры, а именно, различием в размерах частиц и расстоянии между ними в данной зоне соединения.

Результаты многочисленных исследований алюминиевых сплавов и их сварных соединений, выполненных сваркой плавлением, представлены в [38]. Экспериментально доказано, что при криогенных температурах коэффициент прочности сварных соединений алюминиевых сплавов зависит от системы легирования сплава и его состояния (отожженное, нагартованное и т. д.), и может составлять 0,6–0,85. При этом наиболее высокий коэффициент прочности достигается при сварке сплавов в отожженном состоянии.

Легирование скандием оказывает сильное и многообразное влияние на структуру и свойства алюминиевых сплавов. Скандий – сильный модификатор литой зеренной структуры и антирекристаллизатор, но основное практическое значение введения скандия в алюминиевые сплавы заключается в возможности повышения их прочностных свойств, за счет сохранения нерекристаллизованной структуры, измельчения субзеренной структуры и упрочняющего воздействия дисперсных частиц, содержащих Sc. Так при добавке до 0,4% Sc в алюминиевые сплавы каждые 0,1% Sc способствуют повышению временного сопротивления в среднем на 50 МПа [107].

Введение скандия в сварочные проволоки различной степени легирования магнием оказывает положительное влияние на структуру металла шва, его механические свойства и склонность к образованию горячих трещин. Например, введение 0,5% Sc и 0,2% Zr (Zr усиливает положительное влияние Sc на структуру и свойства сплавов) в присадку, содержащую 6,5% Mg, обеспечивает формирование субдендритной структуры металла шва, повышение его прочности и текучести, а также повышение прочности сварного соединения в целом [108, 109].

Испытания на статический изгиб показали, что сварные соединения алюминий-магниевого сплава способны выдерживать пластическую деформацию при изгибе до параллельности сторон (180°) независимо от способа сварки, состава присадочного материала и состояния основного металла [68, 103, 106].

Повторное воздействие термических циклов сварки (например, подварок при исправлении дефектов) может приводить к снижению прочности сварных соединений. Так четырехкратная подварка уменьшает прочность сварных соединений сплава АМг5 на 10–20%, а пластичность, характеризуемую углом

изгиба, в 2–2,5 раза. Формирование усиления сварного шва, независимо от температуры испытания, упрочняет сварное соединение в среднем на 10%, по сравнению с соединениями со снятым усилением сварного шва [41].

Показателем способности материала к местной пластической деформации в присутствии жесткого концентратора напряжений, является чувствительность к надрезу, оцениваемая отношением прочности надрезного образца при растяжении к пределу текучести ($\sigma_b^H/\sigma_{0,2}$). Прочность сварных образцов с кольцевой выточкой по металлу шва большинства деформируемых и литейных алюминиевых сплавов, независимо от состояния материала после сварки, увеличивается при снижении температуры. При криогенной температуре прочность надрезных образцов такая же или выше, чем при комнатной температуре. Наиболее высокие значения отношения $\sigma_b^H/\sigma_{0,2}$ имеют алюминий-магнийевые сплавы (≥ 2), что свидетельствует об их высокой вязкости [38].

Низкая чувствительность алюминий-магниево-марганцевых сплавов к концентраторам напряжений при криогенных температурах подтверждается авторами [4]. Специалистами проведены испытания плоских гладких образцов (тип 1 по ГОСТ 22706) и образцов с V-образным надрезом; глубина надреза – 1,5 мм, угол раскрытия надреза – 45°, радиус в вершине надреза – 0,1 (тип 3 по ГОСТ 22706). Установлено, что прочность образцов с надрезом при температуре 77 К выше, чем прочность гладких образцов при комнатной температуре, и значительно выше предела текучести при температурах 293 К, 203 К, 77 К. Отношение $\sigma_B^H/\sigma_{0,2}$ находилось в пределах 1,37–1,67, что говорит о хорошей вязкости и сопротивлении хрупкому разрушению.

Наиболее полно свойства сварных соединений, выполненных аргонодуговой сваркой применительно к изделиям криогенной техники, приведены для алюминиево-магниевого сплава марки 1550 (АМг5) толщиной 8–18 мм в работе [41]. Отмечается, что характер изменения свойств сварного соединения и основного металла – сплава марки 1550 с понижением температуры аналогичен (прочностные характеристики – временное сопротивление σ_b и предел текучести $\sigma_{0,2}$ – возрастают; относительное удлинение δ_5 сначала увеличивается, а затем несколько уменьшается, оставаясь выше значений при комнатной температуре; относительное сужение Ψ уменьшается). С понижением температуры критический

коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} для основного металла сначала несколько возрастает, затем снижается; для сварного соединения наблюдается некоторый рост K_{IC} (рисунок 3). Эти данные свидетельствуют о том, что трещиностойкость сплава марки 1550 при снижении температуры до 4 К не ниже, чем при комнатной температуре.

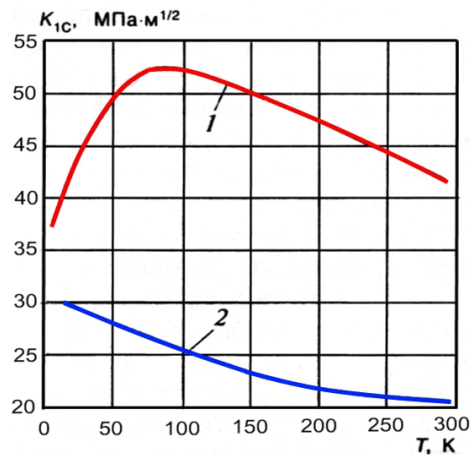


Рисунок 3 – Зависимость критического коэффициента интенсивности напряжения K_{IC} сплава 1550 от температуры T :

1 – основной металл; 2 – сварное соединение.

Диаграммы малоциклового усталости образцов сплава марки 1550 и его сварных соединений при мягком циклическом нагружении с частотой 5 цикл/мин показывают, что снижение температуры испытаний от комнатной до 77 К приводит к увеличению долговечности, при этом долговечность сварных образцов на 1–2 порядка меньше, чем основного металла (рисунок 4).

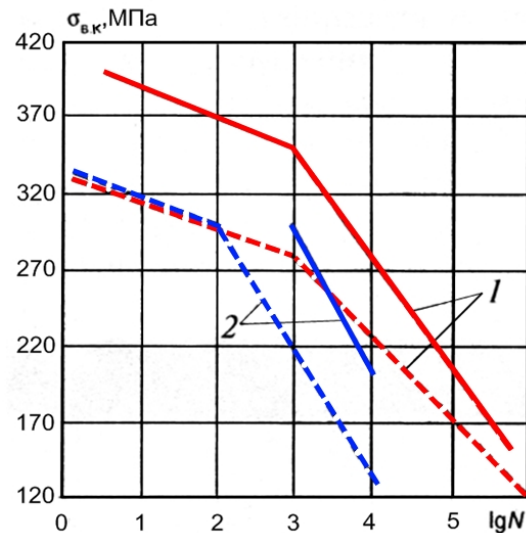


Рисунок 4 – Кривые малоциклового усталости сплава 1550 (образцы с надрезом) при различных температурах Т:

— — — — — $T=77$ К; — — — — — $T=293$ К; 1 – основной металл; 2 – сварное соединение.

При испытаниях образцов с концентратором напряжений на низкотемпературную термическую усталость (охлаждение образцов жидким азотом с последующим отогревом в потоке теплого воздуха), установлено, что сварное соединение сплава 1550 более чувствительно к теплосменам, чем основной металл – разупрочнение металла в процессе термоциклирования происходит быстрее.

Специалистами [12] алюминиево-магниевые сплавы 1550 и 1565ч рекомендованы для их использования при проектировании криогенной техники. В частности отмечено, что для возможности применения сплавов в конструкциях емкостей для перевозки сжиженного природного газа необходимо проведение соответствующей корректировки Правил РМРС.

Важным для темы настоящего диссертационного исследования является констатация авторов [12] при обсуждении результатов статического и усталостного растяжения образцов о недостаточности достигаемых свойств в сварных соединениях алюминиевых сплавов больших толщин, при этом подчеркивается, что разрушение протекает преимущественно по металлу шва.

Эти сварные соединения сплавов были выполнены ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» по существующей технологии, установленной требованиями ОСТ5Р.9153, в том числе в части выбора сварочных материалов, конструктивных

элементов подготовки кромок под сварку, технологических указаний по сварке, что, вероятно, является недостаточным для достижения наилучших свойств сварных соединений и требует оптимизации технологического процесса.

Приведенные результаты исследований сварных соединений послужили важным импульсом в проведении работ, направленных на совершенствование технологического процесса выполнения сварных соединений, достижение стабильной технологии сварки больших толщин из алюминиево-магниевых сплавов, предназначенных для низкотемпературного применения.

1.6 Требования классификационных обществ к материалам и сварным соединениям из алюминиевых сплавов

Основополагающим документом для разработки проектов и эксплуатации судов-газовозов является стандарт безопасности «Международный кодекс постройки и оборудования судов, перевозящих сжиженные газы наливом» (Кодекс IGC), который регламентирует требования к конструкции, классификации и материалам.

Все ведущие морские классификационные общества имеют собственные Правила для конструирования и классификации судов этого класса, которые во многом основаны на Кодексе IGC, особенно в части требований к материалам для танков.

Правилами морских классификационных обществ Lloyd's Register of Shipping (Регистр Ллойда, L'R), BV (Bureau Veritas, Франция), ABS (Американское бюро судоходства), DNV (Det Norske Veritas, Норвегия), PMPC (Российский морской регистр судоходства) установлены требования к материалам морского применения; и, помимо положений Кодекса, содержат собственные дополнения и разъяснения. Материалы для морских конструкций должны испытываться и сертифицироваться по правилам МАКО.

Требования к методам испытаний и характеристикам полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, применяемых для постройки морских судов, содержатся в соответствующих разделах Правил классификации и постройки морских судов каждого классификационного общества. Как правило, этот раздел носит название «Материалы и сварка. Металлические материалы. Алюминиевые сплавы» (как в Правилах L'R).

1.6.1 Требования L'R и BV к материалам и сварным соединениям корпусных конструкций из алюминиевых сплавов морского назначения и низкотемпературных применений

В соответствии с Lloyd's Register Rulefinder производство, испытания, инспекции и документация для алюминиевых сплавов должны соответствовать общим требованиям к металлическим материалам для судостроения (Правила II – Материалы и сварка, часть I – Металлические материалы) [111], где содержатся требования к химическим составам, статическим механическим характеристикам, допускам на размеры и методам испытаний полуфабрикатов из деформируемых алюминиевых сплавов серий 5XXX и 6XXX, применяемых для корпусов судов, надстроек и трубопроводов в общем судостроении.

Материалом, предназначенным для изготовления грузовых цистерн и камер для хранения сжиженных газов, а также для других низкотемпературных применений, является сплав марки 5083 в отожженном состоянии. Требования распространяются на полуфабрикаты толщиной до 50 мм.

Механические свойства катаных полуфабрикатов сплава 5083 в отожженном состоянии толщиной до 50 мм приведены в таблице 2.

Т а б л и ц а 2 – Минимальные механические свойства полуфабрикатов из алюминиевого сплава марки 5083 [109]

Марка	Состояние поставки	Предел текучести $R_{p0,2}$, min Н/мм ²	Временное сопротивление R_m , min Н/мм ²	Удлинение, $\delta=5,65\sqrt{S_0}$, %
5083	O/H111	125	275	15
П р и м е ч а н и е . Величины приведены для толщин ≤ 50 мм, а толщины ≥ 50 мм будут предметом специального рассмотрения.				

Виды испытаний основного материала – растяжение и статический изгиб при температуре окружающей среды образцов, отобранных в поперечном направлении проката.

Объем испытаний алюминиевых полуфабрикатов, предназначенных для производства грузовых цистерн и сосудов высокого давления с рабочей температурой ниже минус 55°C, – один образец от каждой пластины.

Требования к сварным соединениям и к сварке сформулированы в соответствующих разделах части «Сварка».

Правила устанавливают требования к качеству сварных соединений корпусных конструкций из алюминиевых сплавов, которые оцениваются разрушающими и неразрушающими методами контроля.

Разрушающие методы контроля включают следующие критерии:

- обеспечение временного сопротивления сварных соединений сплава 5083 не ниже 275 МПа;

- обеспечение пластичности сварного соединения, определяемой углом загиба на 180° на оправке диаметром, равном шести толщинам основного металла.

Неразрушающий контроль сварных соединений корпусных конструкций из алюминиевых сплавов может производиться радиографическим, ультразвуковым, капиллярным или визуальным методами.

Требования к швам охватывают сварные соединения из алюминиевых сплавов толщиной до 50 мм.

Требования Bureau Veritas – Rules on Materials and Welding for the Classification of Marine Units (Правила BV) относятся к алюминиевым сплавам, используемым в строительстве корпусов, надстроек и других морских сооружений, применительно к изделиям с толщинами в пределах от 3 до 50 мм включительно [111].

Применение этих условий к изделиям из алюминиевых сплавов, не входящих в этот предел толщин, требует предварительной договоренности с BV.

Материалы, предназначенные для производства грузовых цистерн или резервуаров для хранения сжиженных газов и для другого применения при низких температурах, должны быть изготовлены из сплава 5083 в отожженном состоянии. Механические свойства для проката толщиной $3 \leq t \leq 50$ мм приведены в таблице 3.

Т а б л и ц а 3 – Механические свойства для проката $3 \text{ мм} \leq t \leq 50 \text{ мм}$ [111]

Марка	Состояние поставки	Предел текучести $R_{p0,2}$, Н/мм ² , min	Временное сопротивление R_m min, Н/мм ²	Относительное удлинение, %		
				Толщина t (мм)	L_5	L_{10}
5083	О/Н111	125	275–350	$t < 12,5$	16	
				$t > 12,5$		15

Виды и объем испытаний основного материала и сварных соединений аналогичны требованиям Lloyd's Register.

1.6.2 Анализ требований Российского морского регистра судоходства (РМРС) к материалам и сварным соединениям, применяемым в морских конструкциях и конструкциях систем хранения груза газозовозов

Анализ требований к материалам и сварным соединениям, применяемым в конструкциях систем хранения грузов газозовозов, выполнен на основе положений, изложенных в нормативных документах РМРС в части XIII «Материалы» и XIV «Сварка» [11], а также в части IV «Грузовые емкости» [13].

Проектирование грузовых емкостей необходимо осуществлять с использованием модельных испытаний, проверенных аналитических методик и методов анализа для определения уровня напряжений, усталостной долговечности и характеристик распространения трещин (п. 1.1 части IV [13]).

Допускаемые напряжения, возникающие в стенках грузовых емкостей, являются в каждом случае предметом специального рассмотрения РМРС.

В основу расчета допускаемых напряжений (п. 5 части IV «Грузовые емкости» [13]) положены спецификационные минимальные механические характеристики при комнатной температуре (R_m – спецификационный минимальный предел прочности при комнатной температуре и R_{eH} – спецификационный минимальный предел текучести при комнатной температуре).

Для сварных соединений конструкций из алюминиевых сплавов следует использовать соответствующие значения R_{eH} или R_m в состоянии после отжига.

Указанные характеристики должны соответствовать минимальным спецификационным механическим свойствам материалов, включая наплавленный металл сварных швов.

При условии специального рассмотрения РМРС могут быть учтены более высокие значения предела текучести и предела прочности при низкой температуре.

Температура, при которой определялись свойства материалов, должна быть указана в Свидетельстве.

1.6.2.1 Требования к материалам. Методы испытаний и нормируемые характеристики деформируемых алюминиевых сплавов

Общие требования к полуфабрикатам из конструкционных материалов (листы, профили и поковки), в частности из алюминиевых сплавов типа 5083 (в соответствии с международными и национальными стандартами) в отожженном состоянии и аустенитных сплавов Fe–Ni (36% Ni), для грузовых емкостей и расчетных температур от 273 до 108 К заключаются в следующем:

- максимальная толщина – 25 мм;
- испытание на ударный изгиб не требуется;
- применение толщин более 25 мм является в каждом случае предметом специального рассмотрения РМРС;
- предельные значения химического состава должны быть одобрены РМРС.

Часть IX «Материалы и сварка» [13] устанавливает требования, распространяющиеся на листовую и профильный прокат, трубы, поковки и отливки, предназначенные для изготовления грузовых емкостей, технологических сосудов под давлением, грузовых и технологических трубопроводов, вторичных барьеров, а также на сварные конструкции указанных изделий, в том числе на листовую и профильный прокат из судостроительной стали согласно главы 3.2 части XIII «Материалы» Правил классификации, предназначенной для изготовления конструкций, воспринимающих низкую температуру, но не являющихся частью вторичного барьера.

В настоящем разделе обзора проанализированы требования, касающиеся применения полуфабрикатов из алюминиевых сплавов.

Разделом 10 «Материалы, используемые в системах хранения грузов газозовов» части XIII «Материалы» [11] допущены к использованию «деформируемые алюминиевые сплавы 1550, 1565ч, 5083». Химический состав и механические свойства должны отвечать требованиям согласованной с РМРС технической документации. Сварочные материалы и технология сварки также

подлежат одобрению РМРС и должны отвечать требованиям согласованной с РМРС технической документации.

В то же время в издании 2015 года разделом 5 «Алюминиевые сплавы» части XIII «Материалы» [11], указано, что «Требования не распространяются на алюминиевые сплавы для конструкций, работающих при низких, криогенных температурах», хотя в перечне сплавов морского применения приведены сплавы 1550 и 5083, но не внесен отечественный сплав 1565ч, не прошедший полностью процедуру одобрения РМРС.

Применяемые алюминиевые сплавы в конструкциях систем хранения грузов газозовов должны соответствовать требованиям раздела 5 «Алюминиевые сплавы» части XIII «Материалы» Правил классификации [11].

Перечень основных требований к полуфабрикатам из деформированных алюминиевых сплавов 1550, 1565ч, 5083 в отожженном состоянии для грузовых емкостей и расчетных температур от 108 К до 273 К включает следующие позиции.

1. Изготовление, испытания, освидетельствование и документация должны удовлетворять требованиям части XIII «Материалы» Правил классификации [11] и части IX «Материалы и сварка» Правил классификации [13] и согласованным стандартам.

2. Предельные значения химического состава алюминиевых сплавов 1550, 1565ч, 5083 должны быть одобрены РМРС. Регистр может допустить материалы с иным химическим составом и/или иными механическими свойствами.

3. Временное сопротивление, предел текучести и относительное удлинение алюминиевого сплава конкретной категории должны быть указаны в документации, подлежащей одобрению РМРС.

4. Испытания на ударный изгиб не требуется.

5. Испытание на статический изгиб может не проводиться для основного материала, однако требуется при испытании сварных соединений.

6. Применение толщин более 25 мм является в каждом случае предметом специального рассмотрения РМРС.

В соответствии с разделом 10 части XIII «Материалы» Правил классификации в издании 2015 года [11] деформируемые алюминиевые сплавы 1550, 1565ч и 5083, предназначенные к применению в системах хранения груза

газовозов, должны отвечать требованиям согласованной с РМРС технической документации.

Нормируемыми характеристиками для деформируемых алюминиевых сплавов различных категорий являются механические свойства материала по пределу текучести ($R_{0,2}$, min), временному сопротивлению (R_m , min) и относительному удлинению, определяемые при комнатной температуре. Уровень нормируемых механических характеристик определяется требованиями НТД предприятия-изготовителя и подлежит согласованию с РМРС.

Для судостроительных алюминиевых сплавов марок 5083, 1550 и 1561 эти требования в зависимости от состояния и толщины материала приведены в таблице 4.

Сплав 1565ч является близким аналогом сплава 1561, с одним и тем же уровнем механических свойств, поэтому следует ожидать, что сертификационные требования к сплаву 1565ч будут находиться на уровне сплава 1561 (таблица 4).

Т а б л и ц а 4 – Механические свойства деформируемых алюминиевых сплавов 5083, 1550, 1561 в отожженном состоянии (требования Правил РМРС таблица 5.1.3-1 [11]) и сплава 1565ч (ТУ 1-3-209-2013, ТУ 1-802-466-2013, ТУ 1-3-210-2013)

Категория	Состояние поставки	Толщина t , мм	Предел текучести $R_{p0,2}$, Н/мм ² , min	Временное сопротивление R_m , Н/мм ² , min	Относительное удлинение, %	
					$A_{50\text{ мм}}$	A_{5d}
5083	О	$3 \leq t \leq 50$	125	275 – 350	16	14
1550	О/Н112	$3 \leq t \leq 12,5$	125	275	15	–
		$12,5 < t \leq 50$	110	255	–	12
1561	О/Н112	$3 \leq t \leq 12,5$	175	335	12	–
		$12,5 < t \leq 50$	175	335	–	10
1565ч	О/Н112	$3 \leq t \leq 12,5$	175	335	15	–
		$12,5 < t \leq 50$	175	310	12	–

1.6.2.2 Требования к сварным соединениям. Виды испытаний и нормируемые характеристики

Требования раздела 3 части IX «Материалы и сварка» [13], как правило, распространяются на стали и могут составлять основу для приемочных испытаний других материалов, в том числе алюминиевых сплавов.

Порядок и объем испытаний сварной стыковой пробы:

– испытания на растяжение образцов, вырезанных поперек сварного шва;

- испытания на изгиб образцов с поперечным швом и расположением в зоне растяжения верхней части или корня шва либо испытание на боковой изгиб;
- испытания на ударный изгиб образцов с надрезом, если испытания оговорены требованиями РМРС;
- анализ макроструктуры на предмет наличия дефектов, таких как непровары, каверны, включения, поры или трещины;
- анализ микроструктуры и определение твердости по требованию РМРС.

Общим требованием к испытаниям является то, что результаты, полученные при проведении испытаний, должны удовлетворять требованиям РМРС, в части стали: испытания на растяжение сварных соединений – временное сопротивление должно быть не менее требуемого для основного металла. Допускается по специальному согласованию с РМРС временное сопротивление металла сварного шва меньше временного сопротивления основного металла, если при испытании на растяжение образца, вырезанного поперек сварного шва, временное сопротивление будет не менее предписанного временного сопротивления металла сварного шва. В любом случае для сведения необходимо указывать место разрушения. Испытания на ударный изгиб сварных образцов с надрезом, если оговорено РМРС, должны проводиться при температуре, предписанной для основных свариваемых материалов. Результаты испытаний на ударный изгиб по металлу шва величина работы удара должна быть не менее 27 Дж; по линии сплавления и зоне термического влияния должны удовлетворять требованиям к основному материалу. Испытания на изгиб проводятся на оправке диаметром, равным четырем толщинам образца, при этом не должно быть трещин при угле изгиба 180° , если не оговорено иное [13].

В части алюминиевых сплавов, используемых в системах хранения грузов газовозов, требования к испытаниям сварных соединений отсутствуют. Специалистами «ЦНИИ КМ «Прометей» с непосредственным участием автора настоящей диссертации в рамках выполнения темы «Криоген» разработан и согласован с РМРС проект требований к отечественным алюминиевым сплавам 1565ч и 1550 и сварным соединениям, являющийся основой для разработки Предложений по включению в Правила РМРС.

Требования включают испытания сварных соединений на растяжение и статический изгиб. Нормируемыми характеристиками являются временное сопротивление стыковых соединений алюминиевых сплавов и угол изгиба на оправке установленного диаметра, которые должны соответствовать требованиям таблицы 4.9.3.6 части XIV «Сварка» Правил классификации [11] (таблица 5). Испытания образцов должны проводиться при комнатной температуре.

Т а б л и ц а 5 – Требования РМРС к механическим свойствам стыковых сварных соединений алюминиевых сплавов 5083, 1550, 1561 и 1565ч (с учетом предложений)

Категория сварочного материала	Цифровой код основного металла для испытаний	Временное сопротивление R _m , МПа	Испытание на статический изгиб	
			Диаметр оправки, мм	Угол загиба ¹ , град.
Международные сплавы				
RC/WC	5083	275	6t	180
Национальные сплавы ²				
R2/W2	1550	275	6t	180
R3/W3	1561*	305	6t	
R3/W3	1565ч**	305	6t	
R4/W4	1565ч**	335	6t	

Примечание.
¹При оценке результатов испытаний следует руководствоваться следующим:
на поверхности образца не должно быть ни одной единичной трещины протяженностью в любом направлении более 3 мм; трещины на кромках образца могут не приниматься во внимание в том случае, если их появление не было обусловлено наличием несплавлений.
²Для сварных соединений толщиной до 12,5 мм включительно.
t – толщина образца при испытаниях
*– Сплав 1561 приведен для сравнения
** – Новый сплав 1565ч

По согласованию с РМРС испытания на ударный изгиб сварных соединений из алюминиевых сплавов могут не проводиться. РМРС может потребовать другие виды испытаний.

Сварочные материалы, предназначенные для сварки грузовых емкостей, должны быть признаны РМРС и должны соответствовать согласованным с РМРС стандартам.

Для деформируемых алюминиевых сплавов применительно к способам сварки в защитных газах неплавящимся электродом и плавящимся электродом должны применяться сварочные материалы, указанные в таблице 6.

Т а б л и ц а 6 – Практические области применения присадочных материалов, одобренных РМРС [11]

Марка сварочного материала			Судостроительные алюминиевые сплавы				
Обозначение	Код химического состава	Категория	5083	1550	1561	1565ч	1575
5356	AlMg5	RC/WC	+				
СвАМг5	AlMg5	R2/W2		+			
СвАМг61	AlMg6 Mn1	R3/W3			+	+	
Св1597	AlMg6Mn1Sc	R4/W4			+	+	+

П р и м е ч а н и е . Сплав 1565ч, аналог сплава 1561, включен в таблицу, так как одобрен РМРС для применения в конструкциях систем хранения груза газозовозов.

Процедура одобрения присадочного материала включает определение химического состава наплавленного металла, испытания стыковых соединений на статическое растяжение, статический изгиб, анализ макроструктуры.

Результаты химического анализа наплавленного металла по основным легирующим элементам и примесям не должны выходить за рамки ограничений, установленных изготовителем. Химический состав наплавленного металла подлежит согласованию с РМРС.

В соответствии с требованиями п. 4.9.3 части XIV «Сварка» [11], испытания стыковых соединений должны включать для каждого положения сварки по одной стыковой пробе толщиной от 10 до 12 мм, и дополнительно одна проба толщиной от 20 до 25 мм должна быть сварена только в нижнем положении.

Характеристика сварных проб для испытаний:

- тип шва – стыковой для каждого положения шва;
- основной металл – каждая применяемая категория;
- сварочный материал – каждая применяемая категория;
- способ сварки – каждый применяемый способ сварки;
- направление сварки должно соответствовать направлению проката;
- диапазон толщин устанавливается по согласованию с РМРС;

– вид неразрушающего контроля – радиографический или ультразвуковой контроль по усмотрению изготовителя или РМРС. Для вкладных грузовых емкостей 100% стыковых сварных швов с полным проваром должны подвергаться неразрушающему контролю.

Оценка качества сварных соединений корпусных конструкций из алюминиевых сплавов должна выполняться на основе уровней качества, соответствующих требованиям стандарта ИСО 10042 или других признаваемых РМРС международных и национальных стандартов:

- при контроле внешним осмотром и измерением в соответствии с указаниями стандарта ИСО 1004;
- при контроле капиллярным методом в соответствии с указаниями стандарта ИСО 23277;
- при контроле радиографическим методом в соответствии с указаниями стандарта ИСО 10675-2 с расшифровкой изображений на радиографических снимках для следующих видов внутренних дефектов: поры, твердые (окисные) включения, металлические вольфрамовые включения, несплавления, непровары, трещины.

Таким образом, для использования алюминиевых сплавов 1565ч и 1550 при строительстве газозов требуется проведение комплекса сравнительных исследований, которые позволят обосновать требования к основным материалам, сварочным материалам и сварным соединениям.

Выводы по главе 1

1. Алюминиевые сплавы находят широкое применение для изготовления сварных конструкций, работающих в условиях криогенных температур, и способны выдерживать температуры ниже 77 К без деградации прочностных, коррозионных и пластических свойств, так как не имеют порога хладноломкости, сопровождающегося переходом из вязкого состояния в хрупкое, благодаря кристаллическому строению – гранецентрированной кубической решетке (ГЦК) и отсутствию полиморфных превращений.

2. Алюминиево-магниевый сплав марки 5083 в отожженном состоянии ($\sigma_b = 275$ МПа) признан МАКО в качестве материала, предназначенного для строительства корпусных конструкций морского назначения и низкотемпературных применений, вплоть до криогенных температур. Корпусные конструкции изготавливаются способами сварки плавлением в защитных газах, преимущественно аргонодуговой сваркой неплавящимся и плавящимся электродом, с применением сварочных проволок марок 5356 и 5183 (система легирования AlMg5Mn и AlMg4,8Mn0,8). Прочность стыковых сварных соединений сплава 5083 при комнатной температуре не ниже гарантированной прочности основного металла.

3. В отечественной промышленности при изготовлении изделий криогенной техники широкое распространение получил алюминиево-магниевый сплав 1550. Сплав применяется в отожженном состоянии и характеризуется следующими свойствами, для листовых полуфабрикатов: временное сопротивление не менее 275 МПа, предел текучести не менее 125 МПа, относительное удлинение не менее 15%. Прочность стыковых сварных соединений сплава 1550 при комнатной температуре не ниже гарантированной прочности основного металла.

4. ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» совместно с ЗАО «Алкоа Металлург Рус» и ОАО «НИИ стали» разработан перспективный деформируемый термически неупрочняемый алюминиево-магниевый сплав марки 1565ч ($\sigma_b = 335$ МПа) характеризующийся прочностными свойствами на 20–25% превышающими свойства сплавов 5083 и 1550, при одинаковой пластичности с этими сплавами.

5. Правила классификации и постройки морских судов РМРС в редакции 2015 года в части XIII «Материалы» дополнены новым разделом 10 (п. 10.2.3),

регламентирующим только принципиальное применение в системах хранения груза газозовов деформируемых алюминиевых сплавов марок 1550, 1565ч, 5083 без изложения конкретных требований к механическим свойствам сплавам, методам и объему испытаний, сварочным материалам и технологиям сварки, что требует проведения соответствующей корректировки Правил РМРС.

6. Анализ технического уровня изготовления сварных крупногабаритных конструкций из алюминиевых сплавов, в частности резервуаров и емкостей для хранения и транспортирования сжиженного природного газа, выполненный по зарубежным и отечественным публикациям, показывает, что за рубежом (преимущественно во Франции, Японии и Германии) с конца 1970-х, а в России с 1980–1990-х годов наиболее применяемыми и развивающимися способами сварки являются аргонодуговая сварка неплавящимся и плавящимся электродом.

7. Основными факторами влияния на механические свойства сварных соединений алюминиевых сплавов являются система легирования и состояние поставки основного металла, способ сварки, определяющий структуру металла шва и тепловложение, система легирования присадочного материала, конструктивная форма соединения, наличие термической и механической обработки до и после сварки.

8. Прочность сварных соединений алюминиевых сплавов при криогенных температурах увеличивается на 5–10%, оставаясь ниже, чем у основного металла. При этом коэффициент прочности сварных соединений зависит от системы легирования сплава и его состояния, и составляет, как правило, 0,6–0,85 от прочности основного материала при криогенной температуре. Наиболее высокий коэффициент прочности достигается при сварке сплавов в отожженном состоянии.

9. По результатам испытаний в ФГУП «Крыловский государственный научный центр» основного металла и сварных соединений сплавов 1550 и 1565ч, выполненных в «ЦНИИ КМ «Прометей» в соответствии с имеющейся на сегодняшний день нормативно-технической документацией по сварке корпусных конструкций из алюминиевых сплавов, рекомендовано обратить внимание на отработку стабильной технологии сварки больших толщин.

Глава 2. Материалы, оборудование и методика исследования

2.1 Основные и сварочные материалы

В качестве основного материала в работе использованы катаные листы и плиты из деформируемых алюминиево-магниевых сплавов 1565ч и 1550 в отожженном состоянии.

Толщина полуфабрикатов – 5, 7, 10, 20, 40, 60 и 80 мм.

Полуфабрикаты сплава 1565ч изготовлены по ТУ 1-802-466, ТУ 1-3-209 (листы) и ТУ 1-3-210 (плиты).

Полуфабрикаты сплава 1550 выпускаются по ГОСТ 21631 (лист) и ГОСТ 17232 (плита).

Механические свойства и химический состав алюминиевых сплавов отвечают требованиям нормативно-технической документации. Механические свойства алюминиево-магниевых сплавов марок 1565ч и 1550 в отожженном состоянии, использованных в работе, приведены в таблице 7. Химический состав – в таблицах 8 и 9.

Т а б л и ц а 7 – Механические свойства сплавов 1565ч и 1550 (сертификационные данные)

Марка сплава	Толщина, мм	Временное сопротивление σ_B , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
1565чМ	7	348	220	15,9
	10	342	198	14,3
	20	351	175	22,9
	40	350	196	17,7
	60	334	175	14,0
	80	318	154	12,1
1550М	5	303	155	16,7
	10	325	149	25,2
	20	302	148	23,5
	40	303	152	18,7
	60	320	140	26,0
	80	290	139	15,7

Т а б л и ц а 8 – Химический состав полуфабрикатов из алюминиевого сплава 1550 (сертификационные данные)

Толщина полуфабриката, мм	Легирующие элементы, масс.%									Прочие элементы	
	Al	Mg	Mn	Zn	Cu	Be	Ti	Fe	Si	Каждый	Сумма
5	Осн.	5,33	0,44	0,083	0,086	0,0003	0,037	0,33	0,14	0,05	0,1
10	Осн.	5,33	0,44	0,083	0,086	0,0003	0,037	0,33	0,14	0,05	0,1
20	Осн.	5,35	0,44	0,074	0,065	0,0002	0,033	0,27	0,14	0,05	0,1
40	Осн.	5,31	0,44	0,082	0,085	0,0003	0,037	0,33	0,15	0,05	0,1
60	Осн.	5,31	0,44	0,082	0,085	0,0003	0,037	0,33	0,15	0,05	0,1
80	Осн.	5,28	0,44	0,082	0,085	0,0003	0,037	0,33	0,15	0,05	0,1

Т а б л и ц а 9 – Химический состав полуфабрикатов из алюминиевого сплава 1565ч (сертификационные данные)

Толщина полуфабриката, мм	Легирующие элементы, масс.%														Прочие элементы	
	Al	Mg	Mn	Zn	Cu	Zr	Cr	Ti	V	B	Be	Ni	Fe	Si	Каждый	Сумма
7	Осн.	5,49	0,74	0,45	0,083	0,092	0,094	0,073	0,013	0,0011	0,0002	0,007	0,19	0,11	0,05	0,1
10	Осн.	5,62	0,74	0,45	0,077	0,099	0,098	0,077	0,014	0,002	0,0001	0,006	0,20	0,12	0,05	0,1
20	Осн.	5,66	0,74	0,45	0,078	0,098	0,098	0,078	0,014	0,0015	0,0001	0,006	0,21	0,12	0,05	0,1
40	Осн.	5,62	0,74	0,45	0,077	0,099	0,098	0,077	0,014	0,002	0,0001	0,006	0,20	0,12	0,05	0,1
60	Осн.	5,62	0,74	0,45	0,077	0,099	0,098	0,077	0,014	0,002	0,0001	0,006	0,20	0,12	0,05	0,1
80	Осн.	5,64	0,74	0,45	0,78	0,098	0,097	0,069	0,014	0,0015	0,0001	0,006	0,21	0,12	0,05	0,1

Сварочные материалы. Для сварки сплавов марок 1565ч (аналог сплава 1561) и 1550 в исследованиях использовали присадочные материалы, совместимые по химическому составу с основным металлом (таблица 6).

Химический состав присадочных материалов приведен в таблице 10.

Т а б л и ц а 10 – Химический состав сварочной проволоки

Марка сплава	Диаметр проволоки, мм	Легирующие элементы, масс. %					Примеси		Al
		Mg	Mn	Ti	Zr	Sc	Fe	Si	
СвАМг5	1,6	5,36	0,75	0,1	–	–	0,3	0,13	Осн.
	5,0	5,36	0,75	0,1	–	–	0,3	0,13	Осн.
СвАМг61	1,6	6,41	0,9	0,024	0,044	–	0,27	0,16	Осн.
	5,0	5,6	0,86	0,024	0,05	–	0,3	0,14	Осн.
Св1597	4,0	6,08	0,54	0,01	0,18	0,39	0,12	0,05	Осн.

Для сварки сплава 1550 в работе использовался присадочный материал СвАМг5, для сварки сплава 1565ч – присадочный материал СвАМг61 и Св1597.

Для ручной аргонодуговой сварки неплавящимся электродом использовали прутки длиной 650–700 мм из сварочной проволоки диаметром 4,0–5,0 мм.

Для полуавтоматической аргонодуговой сварки использовали сварочную проволоку диаметром 1,6 мм; проволока поставляется после химической обработки, намотанной на кассеты.

В качестве неплавящегося электрода использовали вольфрамовые прутки марки ЭВЧ по ГОСТ 23949 диаметром 4–5 мм. Защитный газ – аргон высшего сорта по ГОСТ 10157.

Подготовка материалов к сварке. Подготовку кромок под сварку производили механическим способом. Непосредственно перед началом сварки свариваемые кромки и поверхности под наплавку очищали механическим способом в соответствии с требованиями ОСТ5Р.9153 «Соединения сварные корпусных конструкций. Дуговая сварка алюминиевых сплавов в защитных газах. Основные положения».

Прутки присадочного материала для АрДС подвергались химическому способу очистки в соответствии с ОСТ5.9153: травление при температуре 60–70°C в течение 5–8 минут в растворе едкого натра с последовательной промывкой в горячей и холодной проточной воде; осветление в 25%-ном растворе азотной кислоты до удаления темных пятен и разводов с последовательной промывкой в холодной и

горячей воде до полного удаления остатков осветляющего раствора и сушка при температуре 60–80°C до полного удаления влаги.

Присадочная проволока, предназначенная для механизированной сварки (ИДСПЭ), поставляется с химически обработанной поверхностью, в кассетах в вакуумной упаковке, в соответствии с требованиями ГОСТ 7871 и не требует дополнительной очистки. Упаковка вскрывалась непосредственно перед сваркой.

2.2 Способы сварки и оборудование

В настоящей работе применялись наиболее распространенные при изготовлении корпусных конструкций из деформируемых алюминиевых сплавов, в том числе работающих при криогенных температурах, технологические процессы аргонодуговой сварки (АрДС и ИДСПЭ). Для сравнительной оценки влияния способа сварки (плавлением или в твердой фазе) на свойства сварных соединений при комнатной и криогенной температурах выполнена сварка трением с перемешиванием (СТП) алюминиевых полуфабрикатов толщиной 5 и 10 мм.

АрДС – ручная дуговая сварка неплавящимся (вольфрамовым) электродом в среде аргона на переменном токе. Наиболее распространенный способ при изготовлении конструкций из алюминиево-магниевого сплава с использованием серийного, имеющего опыт применения сварочного оборудования – сварочный аппарат FAL Tig-400 AC/DC.

ИДСПЭ – механизированная (полуавтоматическая) дуговая сварка сплошной проволокой в среде аргона, на постоянном токе обратной полярности в импульсном режиме, сварочный аппарат Multi 500KW

СТП (сварка трением с перемешиванием) – сварка в твердой фазе полуфабрикатов из деформируемых алюминиевых сплавов. Сварочное оборудование – специализированная установка, созданная на базе консольно-фрезерного универсального станка модели 6Т13, в комплекте с инструментальной и гидравлической сборочно-сварочной оснасткой, обеспечивающей необходимую точность сближения свариваемых кромок и их равномерное прижатие к технологической пластине [100–102].

2.3 Типы сварных соединений

Варианты конструктивно-технологического исполнения стыковых соединений из алюминиево-магниевого полуфабриката выбирали в зависимости от толщины свариваемых деталей и способов сварки:

- стыковое двустороннее соединение с односторонним прямолинейным скосом двух кромок свариваемых деталей толщиной 5, 7 и 10 мм, выполняемое АрДС;
- стыковое двустороннее соединение с двумя симметричными криволинейными скосами двух кромок свариваемых деталей толщиной 20, 40 и 60 мм, выполняемое ИДСПЭ;
- стыковое одностороннее соединение без скоса свариваемых кромок толщиной 5 и 10 мм, выполняемое СТП.

2.4 Изготовление проб для исследований наплавленного металла

Сварные пробы изготовлены многослойной наплавкой валиков алюминиевыми сварочными проволоками марок СвАМг5, СвАМг61 и Св1597 на массивную подложку из алюминиевого сплава толщиной 50 мм и размером 250×200 мм способами сварки плавлением – АрДС и ИДСПЭ. Размеры проб обеспечивали возможность протекания процессов сварки в устойчивом режиме. Высота наплавленного металла составляла 70 ± 5 мм (рисунок 5).

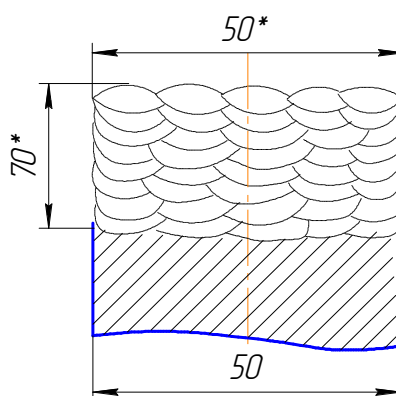


Рисунок 5 – Схема сварной пробы наплавленного металла.

Основные параметры режимов наплавки валиков приведены в таблице 11.

Т а б л и ц а 11 – Параметры режима наплавки валиков многослойного шва

Способ сварки	Параметры режима наплавки				Диаметр сопла, мм	Количество слоев	Количество валиков в слое
	Ток, А	Диаметр вольфрамового электрода, мм	Диаметр присадки, мм	Расход аргона, л/мин			
АрДС	200-220	4	4	8 – 9	12	23 – 26	7 – 8
ИДСПЭ	230-250	–	1,6	12 – 14	22	20 – 22	6 – 7

2.5 Изготовление сварных стыковых проб

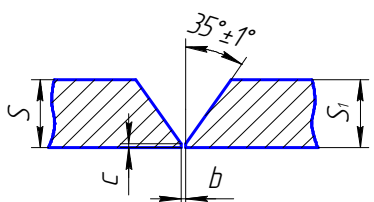
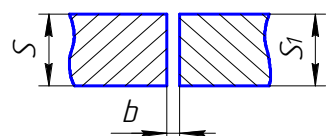
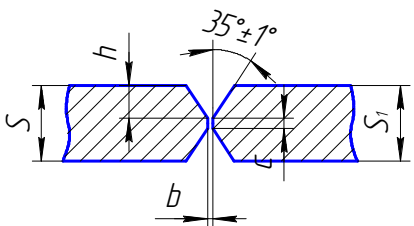
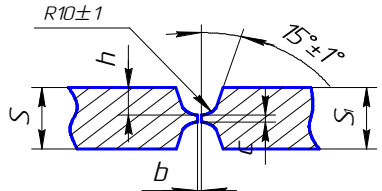
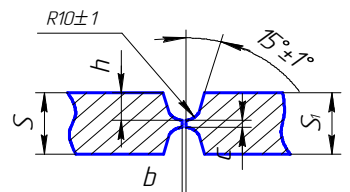
Сварка стыковых соединений сплавов 1565ч и 1550 выполнена способами АрДС и ИДСПЭ с применением сборочно-сварочной оснастки в нижнем положении двусторонним швом с полным проплавлением свариваемых кромок. Конструктивные элементы сварного шва выбирались с учетом требований существующей нормативной документации на сварку алюминиевых сплавов ГОСТ 14806 и ОСТ5Р.9153.

Сварка трением с перемешиванием (СТП) выполнена по технологии и на оборудовании, разработанными во ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» [100–102].

Размер сварных проб 500×500 мм.

Конструктивные элементы подготовленных под сварку кромок представлены в таблице 12.

Т а б л и ц а 12 – Конструктивные элементы подготовки кромок под сварку стыковых соединений алюминий-магниевого сплавов марок 1550 и 1565ч

Толщина S , мм	Условное обозначение сварного соединения	Способ сварки	Конструктивные элементы подготовленных кромок	Размеры, мм			
				S	b	c	h
5-7	С21 (ГОСТ14806)	АрДС, ИДСПЭ		$S=S_1$	0^{+1}	$2^{\pm 1}$	—
10					0^{+2}	$3^{\pm 1}$	—
5 – 10	Типа С2	СТП		$S=S_1$	$0^{+0,3}$	$c=S$	—
20	С25 (ГОСТ14806)	ИДСПЭ		$S=S_1$	0^{+2}	$8^{\pm 1}$	$8^{\pm 1,5}$
40	С26 (ГОСТ14806)	ИДСПЭ		$S=S_1$	0^{+2}	$8^{\pm 1}$	$17^{\pm 1,5}$
60 80	С26 (ГОСТ14806)	ИДСПЭ		$S=S_1$	0^{+2}	$8^{\pm 1}$	$26^{\pm 1,5}$ $36^{\pm 1,5}$

Выбор режимов аргодуговой сварки (АрДС и ИДСПЭ) для каждой толщины полуфабрикатов, осуществлен экспериментально на образцах-свидетелях, с учетом требований ОСТ5Р.9153. Параметры режима сварки алюминиевых сплавов марок 1565ч и 1550 в диапазоне толщин от 5 до 80 мм приведены в таблице 13.

Режимы сварки трением с перемешиванием приведены в таблице 14.

Т а б л и ц а 13 – Режим аргодуговой сварки неплавящимся электродом и плавящимся электродом стыковых соединений алюминиево-магниевых сплавов марок 1565ч и 1550

Способ сварки	Условное обозначение сварного соединения	Толщина, мм	Режим сварки							
			Ток, А	Частота импульсов тока, Гц	Диаметр неплавящегося электрода, мм	Диаметр присадочного материала, мм	Расход аргона, л/мин	Скорость подачи проволоки, м/мин	Средняя скорость сварки, м/ч	Число проходов
АрДС	С21 (ГОСТ 14806)	5	150-170	-	4-5	4	8-9	-	5-20	3-4
		7	180-200	-	5	4	8-9	-		4-5
		10	300-350	-	6	4	10-12	-		5-6
ИДСПЭ	С21 (ГОСТ 14806)	5	120-125	2	—	1,6	16-18	4,5	55	2-3
		10	1-3 проходы 130-135	3,1	—	1,6	20-22	5,0-5,5	50	4-5
			Последующие 180-200					7,0-7,6	55	
	С25 (ГОСТ 14806)	20	1-3 проходы 140-150	3,1	—	1,6	20-22	5,7-6,0	50	12-15
			Последующие 200-210					7,3-7,5	55	
	Типа С26 (ГОСТ 14806)	40	1-3 проходы 135-140	3,1	—	1,6	23-25	5,4-5,7	53	30-35
			Последующие 210-220					7,5-7,8	55	
	Типа С26 (ГОСТ 14806)	60-80	1-3 проходы 140-165	3,3	—	1,6	23-25	5,7-6,5	53	47-52 63-70
			Последующие 210-220					7,5-7,8	55	

Таблица 14 – Режимы сварки трением с перемешиванием алюминиево-магниевого сплава 1565ч и 1550

Наименование параметров сварки	Значения параметров сварки	
	5 мм	10 мм
Частота вращения ω , об/мин	700	550
Диаметр уступа D , мм	14,0	20,0
Скорость сварки V , мм/мин	200	120
Угол наклона α , °	0,5	0,7
Глубина внедрения h , мм	0,12	0,2
Диаметр наконечника d , мм	5,0	10,0
Длина наконечника L_n , мм	4,85	9,80
Величина зазора, мм	<0,25	<0,5

2.6 Контроль качества сварных соединений

Контроль сварных соединений выполнен в соответствии с требованиями ОСТ5Р.9413 внешним осмотром и измерением и радиографическим контролем (РГК).

Сварные соединения алюминиевых сплавов не должны иметь недопустимых дефектов типа трещин, несплавлений, непроваров, пор и включений вольфрама. Поверхности швов должны быть умеренно гладкими, блестящими и не иметь подрезов и наплывов.

Контроль внешним осмотром поверхности сварных соединений в объеме 100% показал отсутствие недопустимых дефектов. Поверхность наплавленного металла каждого валика характеризуется равномерной чешуйчатостью и качественным сплавлением с основным металлом.

Геометрические размеры конструктивных элементов сварного шва (ширина и высота усиления) соответствуют требованиям ОСТ5Р.9153 и ГОСТ 14806.

Для обнаружения внутренних дефектов сварных соединений (непроваров, пор, вольфрамовых и окисных включений), проведен РГК сварных соединений в 100% объеме в соответствии с требованиями ОСТ5Р.9413 к сварным соединениям I категории. Оборудование – аппарат ERESKO 65 MF3. Радиографическая пленка марки AGFA Structurix D4.

По результатам РГК все сварные соединения оценены баллом 3 и 2, т.е. на радиограммах сварных соединений отсутствуют дефекты, размеры и суммарная длина которых превышают значения, приведенные в таблице 15.

Т а б л и ц а 15 – Критерии оценки стыковых сварных соединений I категории по ОСТ5Р.9413

Минимальная толщина свариваемых кромок, мм	Предельные размеры пор и включений, мм			Предельная длина допустимых скоплений и суммарная длина всех допустимых дефектов (в том числе скоплений) для любого участка радиограмм длиной 100 мм, мм	
	Диаметр	Ширина	Длина	Балл 3	Балл 2
До 5 вкл.	1,5	1,0	2,0	5	12
Св. 5 до 10 вкл.	2,0	1,5	3,0	8	18
Св. 10 до 20 вкл.	3,0	2,0	4,0	10	24
Св. 20 до 40 вкл.	4,0	3,0	5,0	15	30
Св. 40 до 80 вкл.	5,0	5,0	5,0	15	30

2.7 Методики исследования

2.7.1 Определение химического состава наплавленного металла

Количественный анализ химического состава наплавленного металла определен фотографическим методом спектрального анализа в соответствии с требованиями [112].

Оборудование – спектрометр «Optima 7300 DV» и ИСП/эшелле спектрометр прямого отсчета с источником индуктивно-связанной плазмы модели PS1000.

Замеры проводили на шлифах, вырезанных из наплавленного металла, в точках соответствующих рабочим зонам цилиндрических образцов (рисунок 6).

Количество шлифов 10 шт.

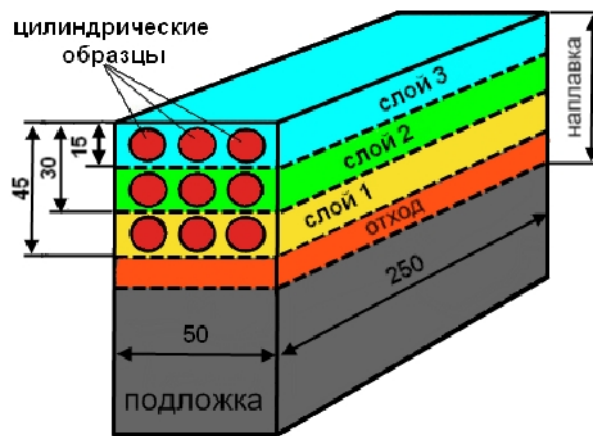


Рисунок 6 – Схема разделки многослойной наплавки.

2.7.2 Металлографические исследования

Анализу структуры подвергались образцы наплавленного металла, а также образцы сварных соединений, в поперечном сечении которых располагался сварной шов.

Анализ макроструктуры проводили на образцах со шлифованной поверхностью (R_z 6,3 мкм) с последующим травлением в растворе едкого натра (NaOH). Анализ микроструктуры проводили на образцах с полированной поверхностью (R_z 2,5 мкм) с последующим химическим травлением во французском реактиве (смеси кислот HCl, H₂SO₄, HF). Изучение структуры металла выполнено на световом оптическом микроскопе фирмы Unimet (модель Union 7565) в комплекте с цифровой камерой Epson 3000Z, при увеличениях от 12 до 400 крат.

Количество образцов из проб наплавленного металла – 10 шт.

Количество образцов из сварных стыковых проб – 50 шт.

2.7.3 Измерение твердости

Измерение твердости наплавленного металла и в металле сварных соединений по Виккерсу (HV) проводили по ГОСТ 2999 на образцах со шлифованной поверхностью.

Испытательное оборудование – твердомер Zwick/Roell ZHV.

Шаг между точками измерений составлял 1–2 мм; нагрузка на инденторе 5 кгс (49Н).

Для образцов каждого состава присадочного материала линия измерений располагалась по центру сечения каждого из исследуемых слоев наплавленного металла (рисунок 7).

Количество образцов наплавленного металла – 10 шт.

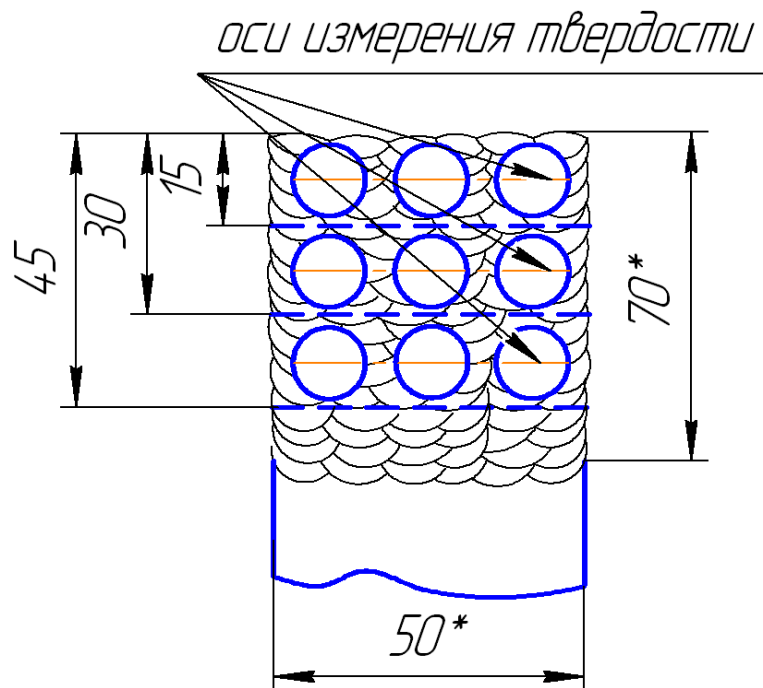


Рисунок 7 – Схема измерения твердости в наплавленном металле.

В сварных стыковых соединениях толщиной 5, 7, 10, 20 мм измерение твердости проводили по центральной линии поперечного сечения. Для сварных соединений толщиной 40 и 60 мм измерение твердости проводили по центральной линии поперечного сечения, а также на расстоянии 10 мм от лицевой и корневой поверхностей.

Количество образцов – 36 шт.

2.7.4 Испытания на статическое растяжение

Механические свойства наплавленного металла определены при статическом растяжении пропорциональных цилиндрических пятикратных ($l_0 = 5,65\sqrt{F_0}$) образцов – гладких (тип III по ГОСТ 1497) и с кольцевой выточкой по центру рабочей части цилиндрического образца (Типа III по ГОСТ 22706). Эскизы образцов представлены на рисунке 8. Образцы с кольцевой выточкой использованы для определения чувствительности материала к надрезу при комнатной и

криогенных температурах испытаний: диаметр образца в надрезе – 5 мм, угол раскрытия надреза – 45° , радиус в вершине надреза – 0,1 мм.

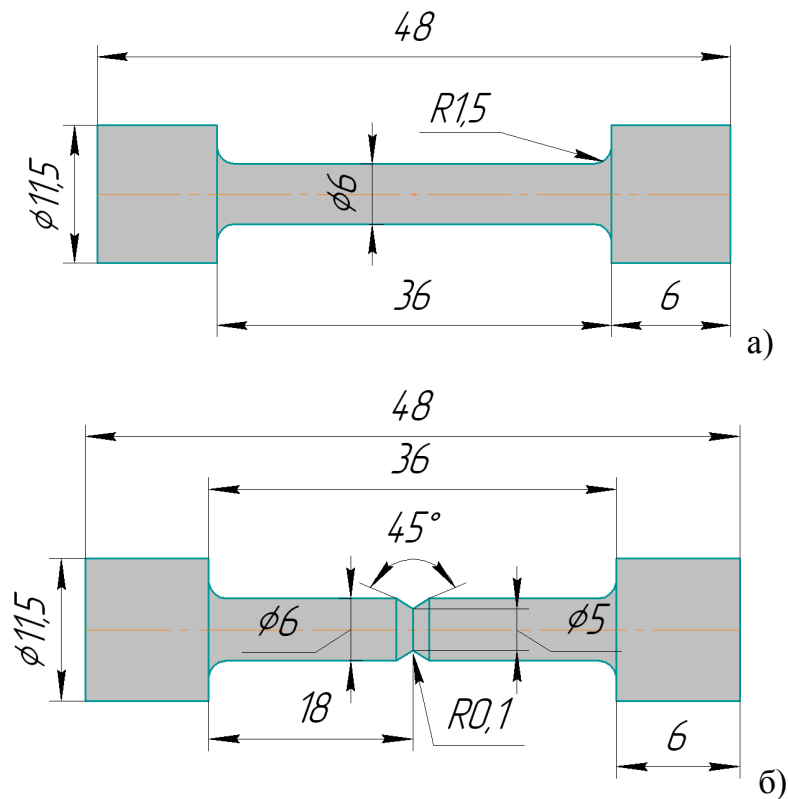


Рисунок 8 – Цилиндрические образцы для испытания наплавленного металла на статическое растяжение при комнатной и криогенных температурах:

а – гладкий; б – с кольцевой выточкой.

Образцы изготавливали из темплетов, вырезанных вдоль наплавки из трех исследуемых зон – слоев, на расстоянии 15, 30 и 45 мм от поверхности наплавки (рисунок 6). При испытании гладких цилиндрических образцов определяли σ_B , $\sigma_{0,2}$ и δ_5 , с кольцевой выточкой – σ_B^H .

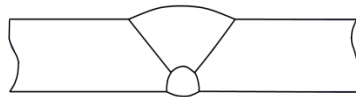
Общее количество испытанных образцов – 216 шт.

Предел прочности сварных соединений алюминиево-магниевых полуфабрикатов сплавов марок 1565ч и 1550 определяли при испытании на статическое растяжение плоских образцов с поперечным расположением сварного шва по ГОСТ 6996 в условиях комнатной и криогенной температур.

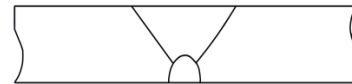
Испытывали образцы сварных соединений, конструктивное исполнение которых предусматривало (рисунок 9):

- наличие или отсутствие выпуклости сварного шва (образец тип XIII по ГОСТ 6996);
- дополнительную наплавку технологических валиков по границе сплавления металла шва с основным металлом (образец тип XIII по ГОСТ 6996).

С усилением сварного шва



Со снятым усилением сварного шва



С конструктивно-технологическим оформлением шва

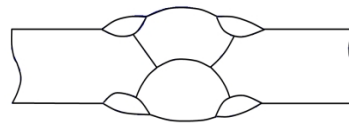


Рисунок 9 – Конструктивное исполнение образцов сварных соединений
алюминиево-магниевого сплава 1565ч и 1550.

Общее количество образцов сварных соединений – 600 шт.

Эскизы образцов представлены на рисунке 10.

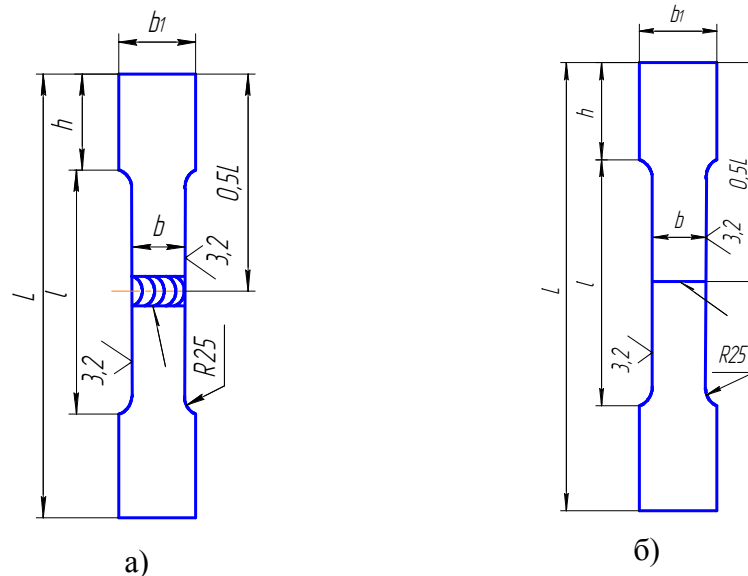


Рисунок 10 – Образцы для испытаний сварных соединений сплавов 1550 и 1565ч на статическое растяжение: а – с усилением сварного шва, и с дополнительной наплавкой технологических валиков по границе сплавления; б – со снятым усилением сварного шва.

Изменение механических свойств по толщине свариваемых полуфабрикатов в металле различных зон сварного соединения (металл шва, металл ЗТВ, основной металл), оценивали по результатам испытаний гладких цилиндрических образцов

(рисунок 8, а) на статическое растяжение при комнатной температуре (293 К). Образцы вырезались вдоль направления сварки из металла шва и металла ЗТВ в соответствии со схемой разделки (рисунок 11). Общее количество образцов – 36 шт.

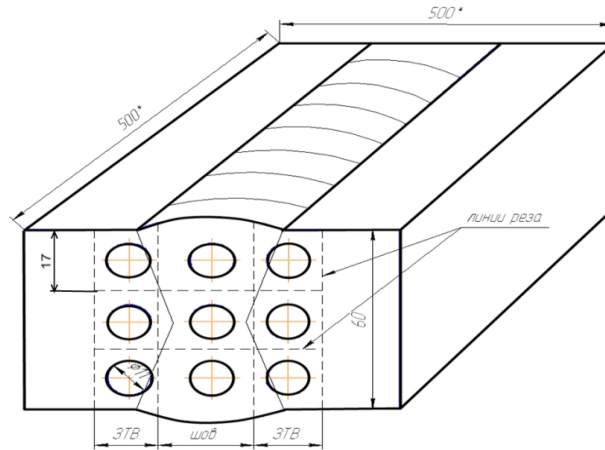


Рисунок 11 – Схема вырезки цилиндрических образцов из сварных соединений толстолистовых полуфабрикатов сплавов 1550 и 1565ч.

Охлаждение образцов до температур 77 К и 108 К осуществляли в парах жидкого азота; до температуры 203 К, при помощи диоксида углерода CO_2 (сухой лед). Температуру контролировали термоэлектрическим преобразователем (хромель – копель) с измерителем-регулятором микропроцессорным одноканальным типа ТРМ-1.

Все испытания образцов наплавленного металла и сварных соединений на растяжение проведены на испытательной машине Instron 5585NJ.

2.7.5 Испытания на ударный изгиб

Испытания на ударный изгиб образцов наплавленного металла (тип VI по ГОСТ 6996) и образцов сварных соединений (тип VII по ГОСТ 6996), проведены в соответствии с ГОСТ 9454, ГОСТ 22848, ГОСТ 6996. Ударная вязкость КСЧ определялась при криогенных и комнатной температурах (77 К, 108 К, 203 К и 293 К).

Испытательное оборудование – копер Metrocom 2130KM-03. Скорость движения маятника в момент удара $5 \pm 0,5$ м/с, номинальная потенциальная энергия маятника 300 Дж.

Общее количество образцов из наплавленного металла – 100 шт.

Схема вырезки образцов из проб наплавленного металла и эскиз образца представлены на рисунке 12.

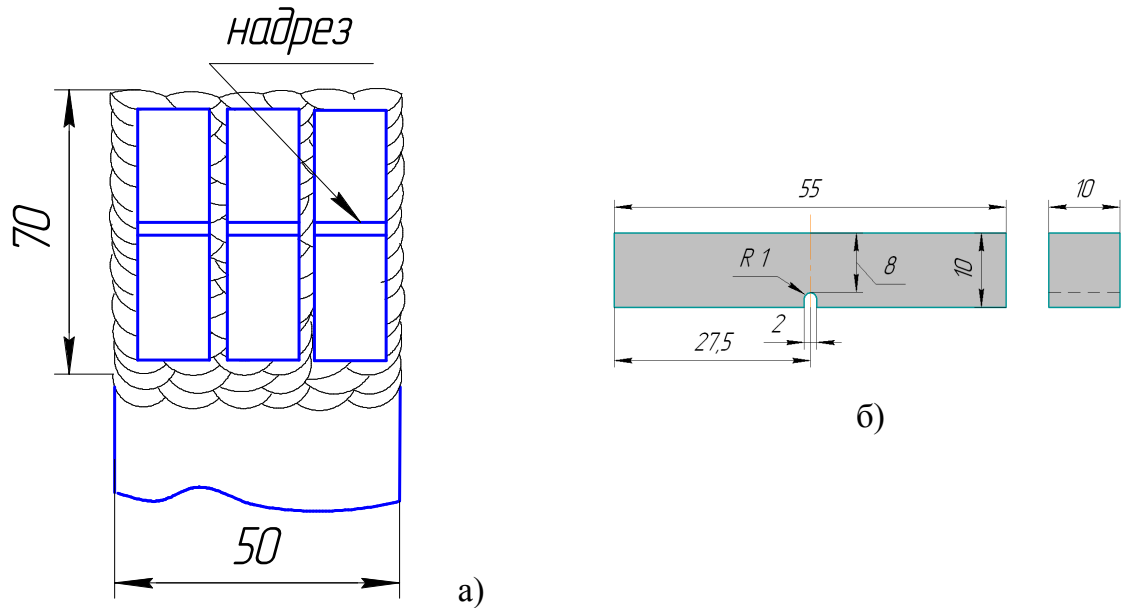


Рисунок 12 – Схема вырезки образцов из наплавленного металла для испытаний на ударный изгиб (а), образец на ударный изгиб (б).

Испытания на ударный изгиб металла различных зон сварных соединений проведены при температурах 108 К и 293 К на образцах с поперечным расположением шва. Испытаниям подвергали образцы с надрезом по металлу шва, границе сплавления, зоне термического влияния (5 мм от границы сплавления) и основного металла (рисунок 13). Образцы изготавливали из сварных проб выполненных различными способами сварки – АрДС, ИДСПЭ и СТП. Схема вырезки и эскиз представлены на рисунке 14.

Общее количество образцов из сварных соединений – 480 шт.

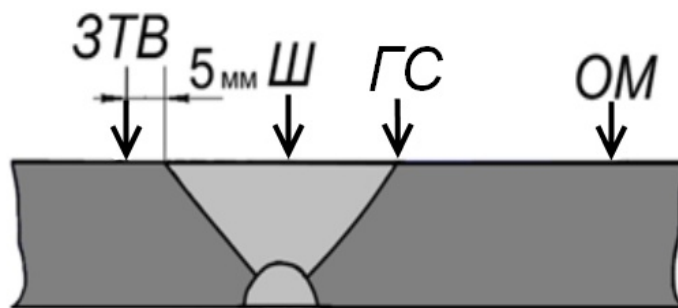


Рисунок 13 – Место надреза для испытаний на ударный изгиб (КСУ), где:

Ш – металл шва; ГС – граница сплавления;

ЗТВ – зона термического влияния; ОМ – основной металл.

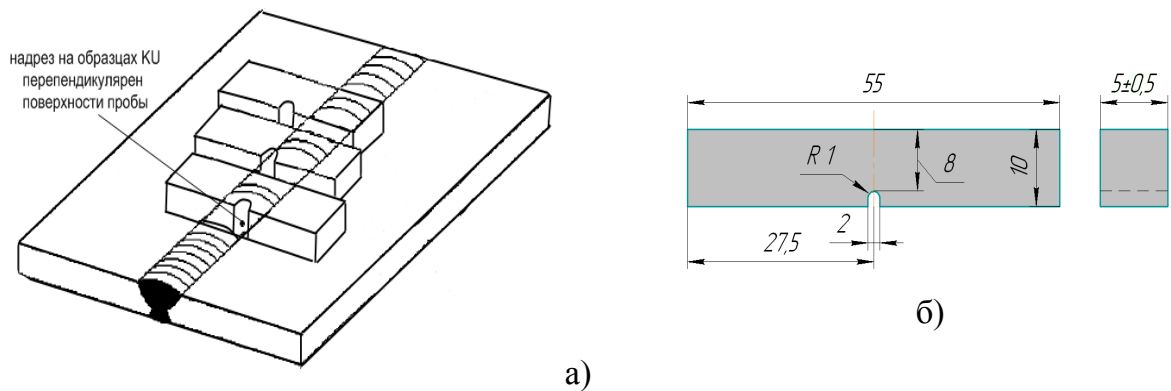


Рисунок 14 – Схема вырезки (а) и эскиз образца (б) для испытаний металла различных зон сварных соединений на ударный изгиб.

Охлаждение образцов до температур 77 К и 108 К осуществляли в парах жидкого азота; до температуры 203 К, при помощи диоксида углерода CO_2 (сухой лед). Температуру контролировали термоэлектрическим преобразователем (хромель – копель) с измерителем-регулятором микропроцессорным одноканальным типа ТРМ-1.

В настоящей работе для проведения сравнительного анализа полученных результатов испытаний на ударный изгиб наплавленного металла и сварных соединений с результатами работ других исследователей [4, 41, 68, 104] использовались образцы с U-образным надрезом (рисунок 12, б и 14, б).

2.7.6 Испытания сварных соединений на статический изгиб

Образцы для испытаний изготавливали из сварных соединений в соответствии с методикой изложенной в Правилах РМРС (рисунок 2.2.5.1 части XIII «Материалы» [11]). Усиление сварного шва по обеим поверхностям образцов снимали механическим способом со слоем основного металла на глубину не менее 0,1 мм, шероховатость поверхности после обработки по параметру R_z составляла 6,3 мкм.

Из сварных соединений полуфабрикатов толщиной более 20 мм изготавливали по несколько образцов толщиной 20 мм, таким образом, чтобы перекрывалась все толщина шва.

Испытания проводили при комнатной температуре на испытательной машине Р-5 с применением специализированной оснастки, общий вид которой представлен на рисунок 15.

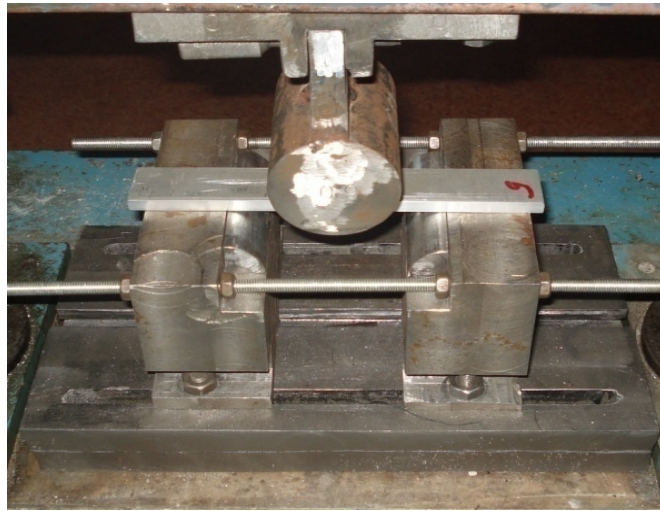


Рисунок 15 – Оснастка к испытательной машине Р-5 для проведения испытаний на статический изгиб.

Диаметр изгибающей оправки (D) равен шести толщинам образца, расстояние между опорами $D+2t$ (t – толщина образца, мм). Скорость нагружения образца была постоянной и составляла не более 5 мм/мин. Испытания проводили до угла изгиба 180° или до появления первой трещины. В растянутой зоне располагали как лицевую, так и обратную поверхность шва. Измерение угла изгиба проводили на образцах в нагруженном состоянии.

Из сварных соединений полуфабрикатов толщиной более 20 мм изготавливали несколько образцов толщиной 20 мм, таким образом, чтобы перекрывалась все толщина шва.

Количество испытанных образцов - 190 шт.

2.7.7 Усталостные испытания сварных соединений

Сварные образцы изготовлены ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» по разработанной технологии аргонодуговой сварки неплавящимся и плавящимся электродом.

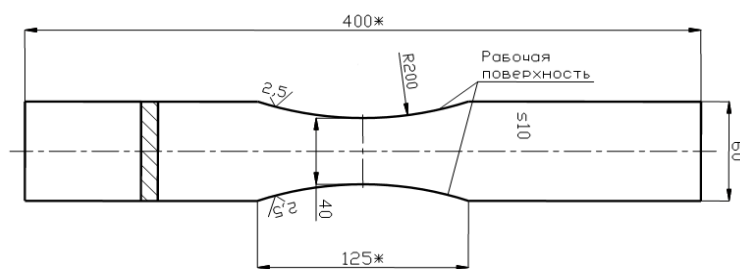
Испытания образцов при циклическом растяжении и обработка экспериментальных результатов проведены специалистами и по методике ФГУП «Крыловский государственный научный центр» в лаборатории испытаний прочности и ресурса натурных конструкций в ходе выполнения совместных работ по теме «Криоген» [113].

Оборудование: универсальные испытательные машины МУП-20 и МУП-50, и специальная тензоизмерительная система, состоящая из тензорезисторов группы качества А или Б, усилителя типа УИМ-2 и персонального компьютера типа Notebook NP 8500. Диапазон измеряемых деформаций $\pm 1430 \text{ млн}^{-1}$. Относительная погрешность измерения деформаций более $\pm 300 \text{ млн}^{-1}$ не превосходит $\pm 6,6\%$.

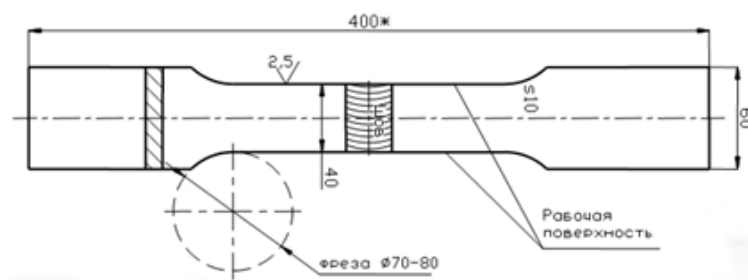
Количество образцов для усталостных испытаний приведено в таблице 16. Эскизы образцов для испытаний представлены на рисунках 16 и 17.

Т а б л и ц а 16 – Количество образцов для усталостных испытаний сварных соединений сплавов 1550 и 1565ч

Марка сплава	Толщина, мм	Среда испытаний	Количество образцов
1550	10	воздух	8
		морская вода	8
	40	воздух	8
1565ч	10	воздух	8
		морская вода	8
	20	воздух	8
	40	воздух	8



а)



б)

Рисунок 16 – Образцы для усталостных испытаний основного металла (а) и сварных соединений (б) толщиной 10 мм.

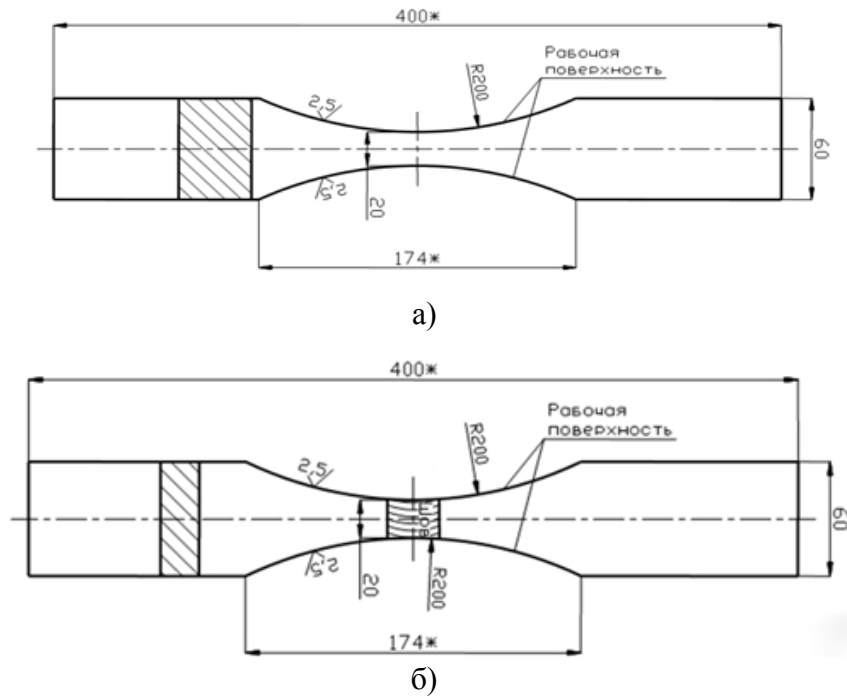


Рисунок 17 – Образец для усталостных испытаний основного металла (а) и сварных соединений (б) толщиной 20 и 40 мм.

Испытания проводились на воздухе и в коррозионной среде (синтетическая морская вода). К образцу прикладывалась циклическая синусоидальная растягивающая нагрузка. Величина максимальной нагрузки цикла $P_{\max}$ принималась соответствующей выбранному уровню нагружения. Минимальная нагрузка цикла $P_{\min}$ выбиралась минимально возможной, обеспечивающей стабильную работу испытательной машины. Частота нагружения составляла около 10 Гц. Нагружение образца продолжалось до его полного разрушения.

Число циклов нагружения образцов фиксировалось по счетчику испытательной машины.

Полученные результаты испытаний были приведены к одинаковому циклу нагружения с коэффициентом асимметрии $r = 0,1$.

2.7.8 Испытания сварных соединений на вязкость разрушения

Сварные образцы изготовлены ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» по разработанной технологии импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом.

Испытания образцов и обработка экспериментальных результатов проведены специалистами и по методике ФГУП «Крыловский государственный научный центр» в лаборатории испытаний прочности и ресурса натурных конструкций в ходе выполнения совместных работ по теме «Криоген» [113].

Испытательное оборудование: универсальная гидравлическая машина МУП-20; канал измерения линейных перемещений (раскрытия трещины) с датчиком типа ДД-100-10-00; канал измерения линейных перемещений РL № 1; термометр сопротивления из платины и меди ТС-0295 с диапазоном измерения температуры от минус 180°С до плюс 200°С.

Образцы изготовлены из сварных проб толщиной 40 мм с нанесением начального машинного надреза по центру шва, границе сплавления, зоне термического влияния и основному металлу. Эскиз образцов представлен на рисунке 18.

Общее количество образцов – 64 шт.

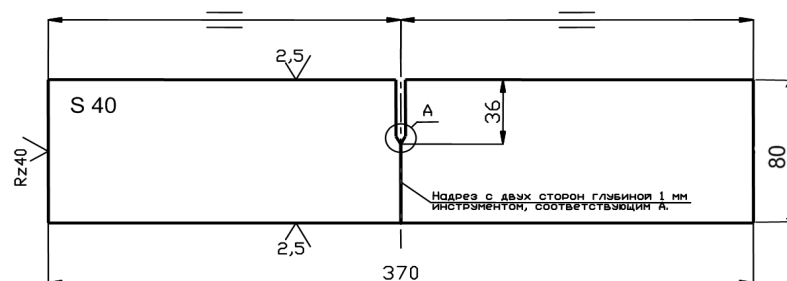


Рисунок 18 – Образец для испытаний сплавов 1565ч и 1550 и сварных соединений на трещиностойкость.

Перед началом испытаний в образцах выращивалась начальная усталостная трещина, при комнатной температуре при циклическом трехточечном изгибе на испытательной машине МУП-20 при частоте нагружения примерно 10 Гц. Параметры усталостного нагружения назначались с учетом требований стандартов BS7448-1 и ASTM E399. Суммарная глубина начальной трещины 1 (машинный надрез плюс выращенная усталостная трещина) составляла, как правило, от 37 до 39 мм.

Испытания проводили при комнатной (293 K) и криогенной температурах (108 K).

Охлаждение образцов производили в специальной камере с жидким азотом и выдержкой не менее 22 минут для получения равномерного распределения температуры по толщине образца. Учитывая, что в процессе установки на машину

и нагружения образец на воздухе нагревается, и его температура будет повышаться, образцы охлаждались до температуры 98 К.

Образец устанавливался на испытательную машину, на нем закреплялись датчики измерения раскрытия трещины и прогиба, и начиналось нагружение (рисунок 19). Нагружение каждого образца проводилось с постоянной скоростью перемещения плунжера примерно 0,5 мм/мин, что обеспечивало выполнение требований стандарта ASTM E399.

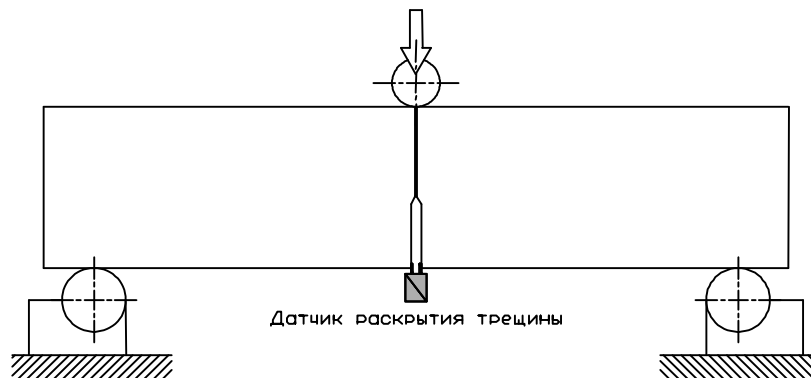


Рисунок 19 – Схема нагружения образца при испытаниях на трещиностойкость.

В процессе испытаний выполнялась дискретная запись на персональный компьютер значений нагрузки P , кН, раскрытия трещины на поверхности образца δ , мм, и прогиба образца V , мм, с частотой сканирования 250 Гц.

Полученные массивы экспериментальных данных в дальнейшем подвергались обработке для построения диаграмм «нагрузка P – перемещение берегов трещины (раскрытие трещины) на поверхности образца δ » и «нагрузка P – прогиб образца в середине пролета V ».

Полученные диаграммы « $P - \delta$ » для образцов из сплавов 1565ч и 1550 соответствуют диаграмме типа IV по ГОСТ25.506 и типа VI по Британскому стандарту BS 7448-1. Для такого типа диаграмм критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} , кН/мм^{3/2}, подсчитывается по формуле:

$$K_{IC} = \frac{P_Q L}{q b^{3/2}} f(l/b)$$

$$f\left(\frac{l}{b}\right) = 2,9 \cdot \left(\frac{l}{b}\right)^{1/2} - 4,6 \cdot \left(\frac{l}{b}\right)^{3/2} + 21,8 \cdot \left(\frac{l}{b}\right)^{5/2} - 37,6 \cdot \left(\frac{l}{b}\right)^{7/2} + 38,7 \cdot \left(\frac{l}{b}\right)^{9/2}, \text{ где}$$

L – расстояние между опорами, мм;

b – высота сечения образца, мм;

q – толщина образца (для образца с канавками – толщина по дну канавок), мм;
 l – глубина начальной трещины (машинный надрез плюс выращенная усталостная трещина) от поверхности образца, мм;
 P_Q – значение нагрузки, определяемое методом 5%-ной секущей, кН;
 K_{1C} – критическое значение коэффициента интенсивности напряжений, Н/мм^{3/2};
 $f(l/b)$ – поправочная функция.

Определение нагрузки P_Q производилось на диаграмме « $P - \delta$ » (рисунок 20, а) проводилась секущая «2», у которой котангенс угла наклона к оси раскрытия трещины δ на 5% больше, чем у касательной «1» к линейному участку диаграммы. Точка пересечения секущей «2» с диаграммой определяет величину P_Q .

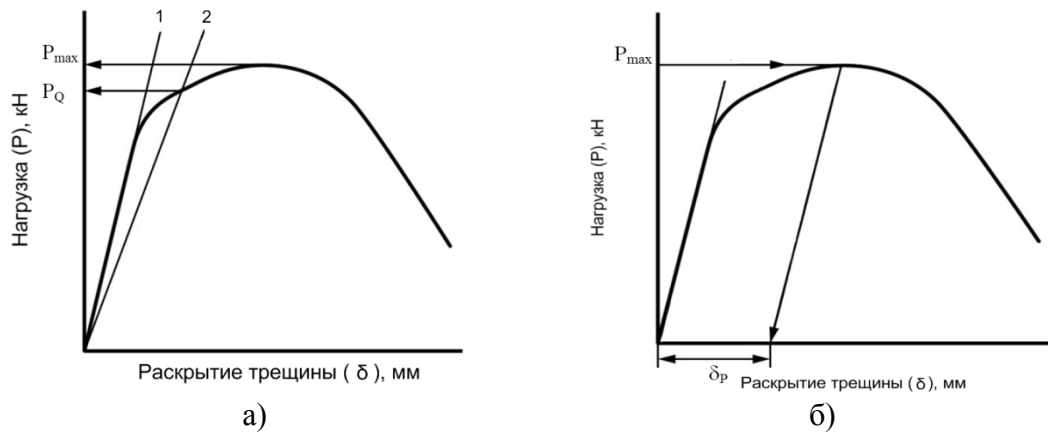


Рисунок 20 – Схема определения нагрузки P_Q . (а) и пластической составляющей раскрытия трещины δ_p (б).

Оценку корректности полученных результатов проводили по контрольным соотношениям:

$$P_{MAX} / P_Q \leq 1,1 \text{ и } q > 2,5 (K_{1C}/\sigma_{0,2})^2$$

В соответствии с требованием ГОСТ25.506, при не выполнении условий корректности необходимо дополнительно оценить значение CTOD (критического раскрытия трещины δ_c) и критическое значение J-интеграла.

Значения CTOD (критического раскрытия трещины) вычислялись по замеренным на поверхности образца значениям раскрытия трещины (δ , мм), по формуле Британского стандарта BS 7448-1:

$$\delta_c = \left[\frac{P_{MAX} L}{q b^{3/2}} \cdot f\left(\frac{l}{b}\right) \right]^2 \frac{(1 - \mu^2)}{2 \sigma_{0,2} E} + \frac{0,4 \cdot (b - l) \cdot \delta_p}{0,4 \cdot b + 0,6 \cdot l + z}, \text{ где}$$

δ_c – критическое раскрытие трещины, мм;

P_{MAX} – максимальная нагрузка при нагружении образца, кН;

L – расстояние между опорами, мм;

E – модуль нормальной упругости, Н/мм²;

q – толщина образца (для образца с канавками – толщина по дну канавок), мм;

b – высота сечения образца, мм;

$f(l/b)$ – поправочная функция;

μ – коэффициент Пуассона;

$\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести материала, МПа;

l – глубина начальной трещины (машинный надрез плюс выращенная усталостная трещина) от поверхности образца, мм;

z – расстояние точки замера δ (точки крепления датчика) от поверхности образца, мм

δ_p – пластическая составляющая раскрытия трещины, мм (рисунок 20, б).

Критические значения J-интеграла, Н/мм, также определены по формуле Британского стандарта BS 7448-1:

$$J_C = \left[\frac{P_{MAX} L}{q b^{3/2}} \cdot f\left(\frac{l}{b}\right) \right]^2 \frac{(1 - \mu^2)}{E} + \frac{2U_p}{q(b-l)}, \text{ где}$$

U_p – пластическая часть площади, кН×мм, диаграммы «Р - V» (рисунок 21).

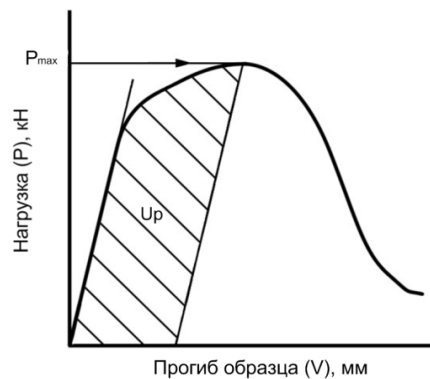


Рисунок 21 – Схема определения пластической составляющей (U_p) J-интеграла.

2.7.9 Экспериментальные и расчетные характеристики, полученные при проведении испытаний

Наплавленный металл:

σ_B^T – временное сопротивление гладкого образца при температуре испытания (МПа);

σ_B^{HT} – временное сопротивление образца с надрезом при температуре испытания (МПа);

$\sigma_{0,2}^T$ – условный предел текучести гладкого образца при температуре испытания (МПа);

σ_B^{293K} – временное сопротивление гладкого образца при комнатной температуре испытания (МПа);

$\sigma_{0,2}^{293K}$ – условный предел текучести гладкого образца при комнатной температуре испытания (МПа);

δ – относительное удлинение;

Ударная вязкость KCU – Дж/мм²;

Сварные соединения:

$\sigma_B^{ом T}$ – временное сопротивление основного металла при температуре испытания (МПа);

$\sigma_B^{св T}$ – временное сопротивление сварного соединения при температуре испытания (МПа);

$K_{пр} = \sigma_B^{св.T} / \sigma_B^{ом T}$ – коэффициент прочности сварных соединений.

Ударная вязкость KCU – Дж/мм²

Угол изгиба сварных соединений – град.

K_{IC} – критическое значение коэффициента интенсивности напряжений (вязкость разрушения), Н/мм^{3/2}.

δ_C (CTOD) – критическое раскрытие трещины, мм.

J_C – критическое значение J-интеграла, Н/мм.

2.7.10 Математико-статистическая обработка результатов

Результаты экспериментальных исследований, в частности механические свойства сварных соединений сплавов марок 1565ч и 1550, изготовленных сваркой плавлением с применением присадочного материала марок СвАМг61 и СвАМг5, соответственно, а также наплавленного металла, выполненного выбранными

присадочными материалами, в диапазоне температур 77 К – 293 К использованы для проведения сравнительного анализа свойств, установления закономерностей их изменения и взаимосвязи.

Качественная оценка влияния факторов на механические свойства проведена по методике [114] с целью разработки и оптимизации условий выполнения сварных соединений из алюминиево-магниевого сплава.

Влияние конструктивных и технологических факторов сварочного воздействия на механические свойства сварных соединений из алюминиевых сплавов при криогенных температурах оценено по следующим показателям:

- формирование уровня свойств металла, наплавленного присадочными материалами, предназначенными для выполнения сварных соединений;
- формирование уровня свойств сварных соединений из алюминиевых сплавов.

Условные обозначения факторов по показателям для наплавленного металла показаны на схеме (рисунок 22).

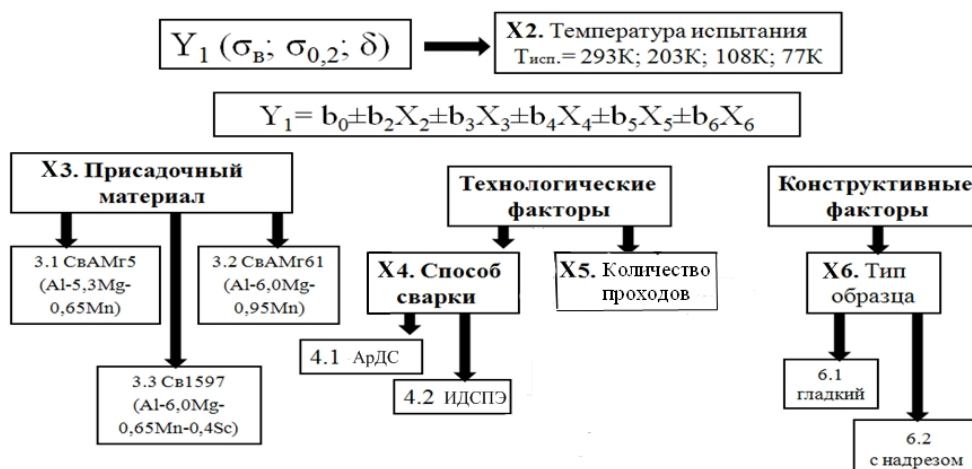


Рисунок 22 – Конструктивные и технологические факторы влияния на механические свойства наплавленного металла.

Условные обозначения факторов по показателям для сварных соединений показаны на схеме (рисунок 23).

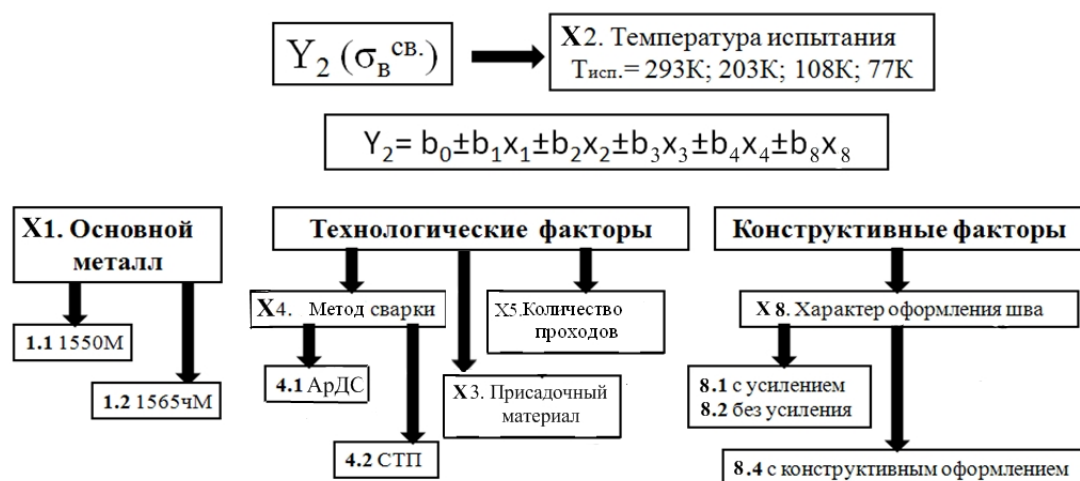


Рисунок 23 – Конструктивные и технологические факторы влияния на механические свойства сварных соединений алюминиевых сплавов.

Оценка выполнена по параметрическому критерию Фишера (F) в сравнении его с табличным критическим значением ($F_{\text{крит.}}$) при 5%-уровне значимости ($\alpha=0,05$). Рассеяние экспериментальных данных оценивали по среднеквадратичному отклонению (СКО) – квадратный корень из дисперсии - $[x] = \sqrt{S^2[x]}$.

Расчетный критерий Фишера определяли при однофакторном дисперсионном анализе экспериментальных данных по формуле $F = \frac{S_1^2}{S_2^2}$, где:

S_1^2 – дисперсия, характеризующая рассеяние под влиянием изучаемых факторов;

S_2^2 – внутренняя дисперсия характеризует внутреннее рассеяние, связанное с неоднородностью материалов и случайными колебаниями условий испытаний.

Ход вычислений показан в таблице 17.

Т а б л и ц а 17 – Схема однофакторного дисперсионного анализа

Источник вариации	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Дисперсия
Между зонами вырезки	$Q_1 = \sum_{i=1}^m n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2$	$k_1 = m - 1$	$S_1^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2$
Внутри зон вырезки	$Q_2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2$	$k_2 = \sum_{i=1}^m n_i - m$	$S_2^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^m n_i - m} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2$
Общая	$Q = Q_1 + Q_2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x})^2$	$k = \sum_{i=1}^m n_i - 1$	$S^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^m n_i - 1} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x})^2$
Примечание. $\bar{x}$ – общее среднее; m – общее число мест вырезки; $\bar{x}_i$ – среднее значение для одного места вырезки; n_i – общее число образцов.			

Если дисперсионное отношение $F = \frac{S_1^2}{S_2^2}$ окажется меньше табличного значения ($F_{\text{крит.}}$), найденного для числа степеней свободы $k_1 = m - 1$; $k_2 = \sum_{i=1}^m n_i - m$ и уровня значимости $\alpha=0,05$, то исследуемый фактор не оказывает значимого влияния на механические свойства, т.е. нулевая гипотеза не отклоняется.

Если справедливо неравенство $F > F_{\text{крит.}}$, то нулевая гипотеза отвергается [114].

Математико-статистическая обработка экспериментальных данных выполнена по программе, разработанной «ЦНИИ КМ «Прометей» (АСНИ «Материал» подсистема «Качество») с привлечением однофакторного дисперсионного и многофакторного регрессионного анализов. Расчеты проведены при помощи программы Microsoft Excel 2007.

Результатом статистического анализа является обобщающее уравнение регрессии, которое устанавливает взаимосвязь между механическими свойствами металла и факторами сварки в порядке уменьшения их значимости, в виде формулы $Y = b_0 \pm b_i X_i$.

Выводы по главе 2

1. Приведены сертификационные данные по механическим свойствам и химическому составу основных алюминиево-магниевых сплавов 1565ч и 1550, присадочных материалов марок СвАМг5, СвАМг61, Св1597.

Способы сварки и оборудование – ручная аргонодуговая сварка неплавящимся (АрДС), механизированная импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом в среде аргона (ИДСПЭ) и сварка трением с перемешиванием (СТП).

2. Изложены методы подготовки основных и присадочных материалов к сварке и технологии изготовления сварных проб, предназначенных для проведения исследований наплавленного металла и стыковых сварных соединений при температурах 77 К, 108 К, 208 К и 293 К.

3. Представлены методики исследования наплавленного металла и сварных стыковых соединений включающие: неразрушающие методы контроля; металлографические исследования; механические испытания (статические и динамические) при температурах 77 К, 108 К, 208 К и 293 К; усталостные испытания; математико-статистическую обработку результатов испытаний.

В настоящей главе представлены исследования, проведенные с целью оценки влияния повторных сварочных нагревов, возникающих при многопроходной сварке, на структуру, состав и свойства наплавленного металла каждой категории и с целью установления зависимости механических свойств образцов от химического состава присадочного материала, наличия концентратора напряжений ($K_t = 5$ [41]) и температуры испытаний в диапазоне 77 К – 293 К.

Исследования состава, структуры и механических свойств наплавленного металла выполнены на основе металлографического анализа макро- и микроструктуры, измерении твердости, статических и динамических испытаний при комнатной и криогенных температурах. Образцы для исследований изготовлены во ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей».

Количественный анализ химического состава наплавленного металла показал, что фактическое содержание основных легирующих элементов и примесей (Fe и Si) находится в пределах, регламентированных нормативной технической документацией на сварочные материалы (таблица 18).

Т а б л и ц а 18 – Содержание легирующих элементов в зонах исследования наплавленного металла

Марка проволоки/ способ сварки	Зона исследо- вания	Легирующие элементы, масс. %								Примеси	
		Al	Mg	Mn	Zr	Ti	Cr	Zn	Sc	Fe	Si
СвАМг5/ АрДС	ГОСТ 7871	Осн.	4,8- 5,8	0,5- 0,8	–	0,1- 0,2	–	<0,2	–	0,4	0,4
	1 слой	Осн.	5,2	0,80	–	0,020	–	–	–	0,25	0,10
	2 слой	Осн.	5,1	0,80	–	0,016	–	–	–	0,23	0,10
	3 слой	Осн.	5,1	0,70	–	0,018	–	–	–	0,22	0,12
СвАМг5/ ИДСПЭ	1 слой	Осн.	5,5	0,80	–	0,019	–	–	–	0,30	0,05
	2 слой	Осн.	5,3	0,80	–	0,022	–	–	–	0,30	0,10
	3 слой	Осн.	5,5	0,80	–	0,018	–	–	–	0,26	0,09
СвАМг61/ АрДС	ГОСТ 7871	Осн.	5,5- 6,5	0,8- 1,1	0,002- 0,12	–	–	<0,2	–	0,4	0,4
	1 слой	Осн.	5,8	0,92	0,005	–	–	–	–	0,23	0,15
	2 слой	Осн.	5,7	0,87	0,01	–	–	–	–	0,24	0,15
	3 слой	Осн.	5,8	0,90	0,10	–	–	–	–	0,22	0,15
СвАМг61/ ИДСПЭ	1 слой	Осн.	6,0	0,85	0,05	–	–	–	–	0,26	0,15
	2 слой	Осн.	6,1	0,87	0,10	–	–	–	–	0,25	0,12
	3 слой	Осн.	5,8	0,87	0,09	–	–	–	–	0,22	0,12
Св1597/ АрДС	ТУ 1-809- 1018-2007	Осн.	5,5- 6,5	0,5- 0,8	0,05- 0,25	0,01- 0,05	0,1-0,2	0,1	0,36- 0,50	0,15	0,10
	1 слой	Осн.	5,9	0,55	0,17	0,01	0,1	0,1	0,33	0,13	0,05
	2 слой	Осн.	5,7	0,58	0,17	0,01	0,095	0,09	0,36	0,12	0,06
	3 слой	Осн.	5,7	0,57	0,19	0,02	0,09	0,09	0,36	0,12	0,05

Влияния на химический состав металла непосредственного сварочного воздействия и повторных термических циклов сварки при обоих способах наплавки (АрДС и ИДСПЭ) не выявлено.

3.1.2 Металлографические исследования

Макроструктура поперечного сечения сварных многослойных проб (рисунок 24), характеризуется равномерным чередованием слоев валиков по ширине и высоте наплавки, что свидетельствует о стабильности параметров режима сварки – величине сварочного тока, скорости сварки, количестве защитного газа и равномерной подаче присадочного материала.

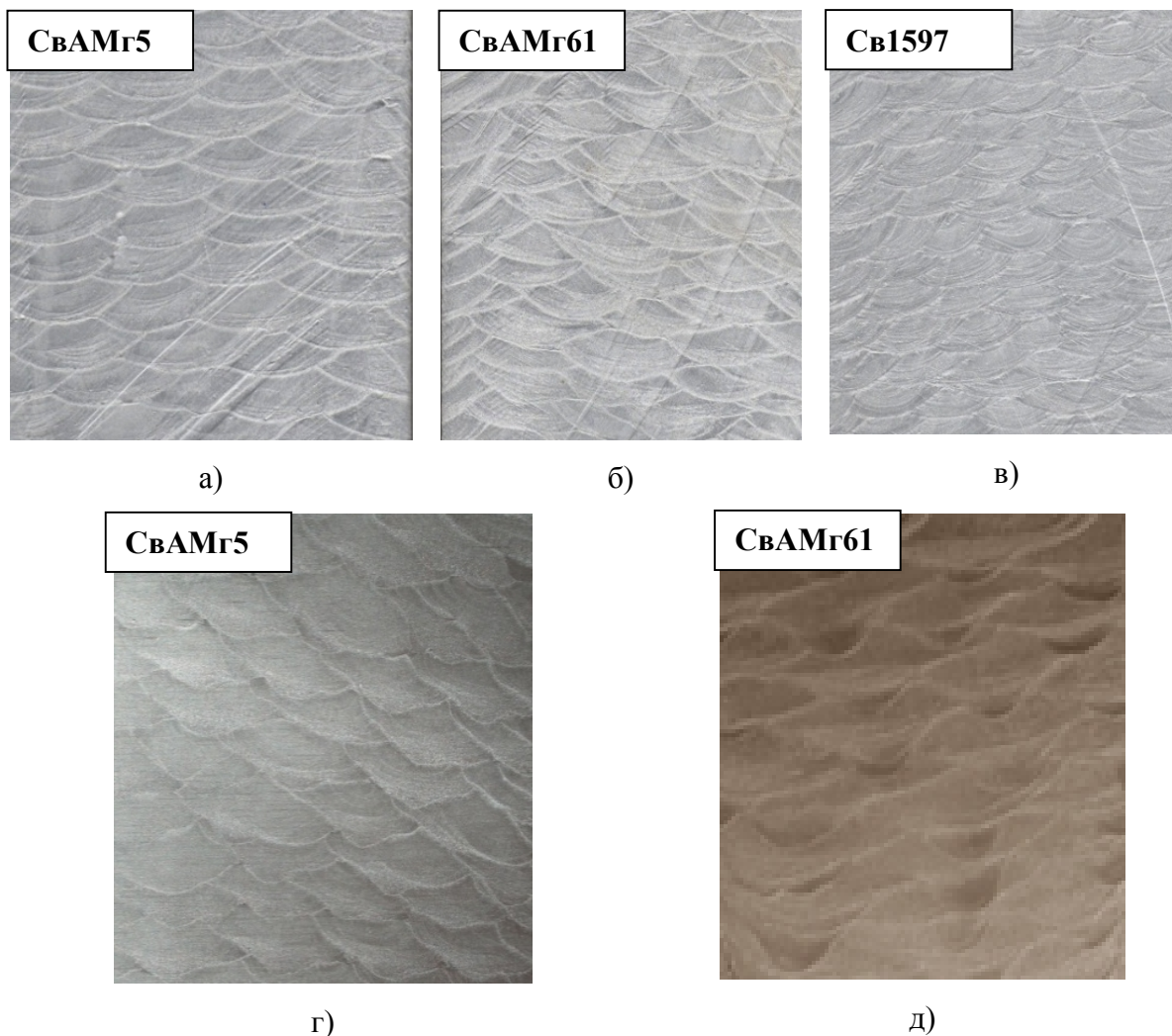


Рисунок 24 – Макроструктура наплавленного металла ($\times 10$), где а, б, в – ручная аргонодуговая сварка неплавящимся электродом (АрДС); г, д – импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом в среде аргона (ИДСПЭ).

В наплавленном металле не обнаружено недопустимых по размерам и количеству дефектов типа пор, вольфрамовых или окисных включений, межваликовых несплавлений.

Металлографические исследования металла, наплавленного присадочными материалами СвАМг5 и СвАМг61, не выявили заметных отличий структуры в зависимости от способа сварки и области исследования. Металл характеризуется типичной для алюминиево-магниевого сплава литой кристаллической структурой дендритного строения с выделениями упрочняющей фазы различной степени дисперсности (рисунок 25 а, б, в, г).

Металлу, наплавленному сварочной проволокой марки Св1597 (рисунок 25, д), присуща литая мелкозернистая структура с равномерным

распределением выделений упрочняющих фаз (типа Al_3Sc), как по границам, так и внутри зерен, что предполагает возможность достижения более высоких прочностных свойств сварных соединений [107, 108, 115].

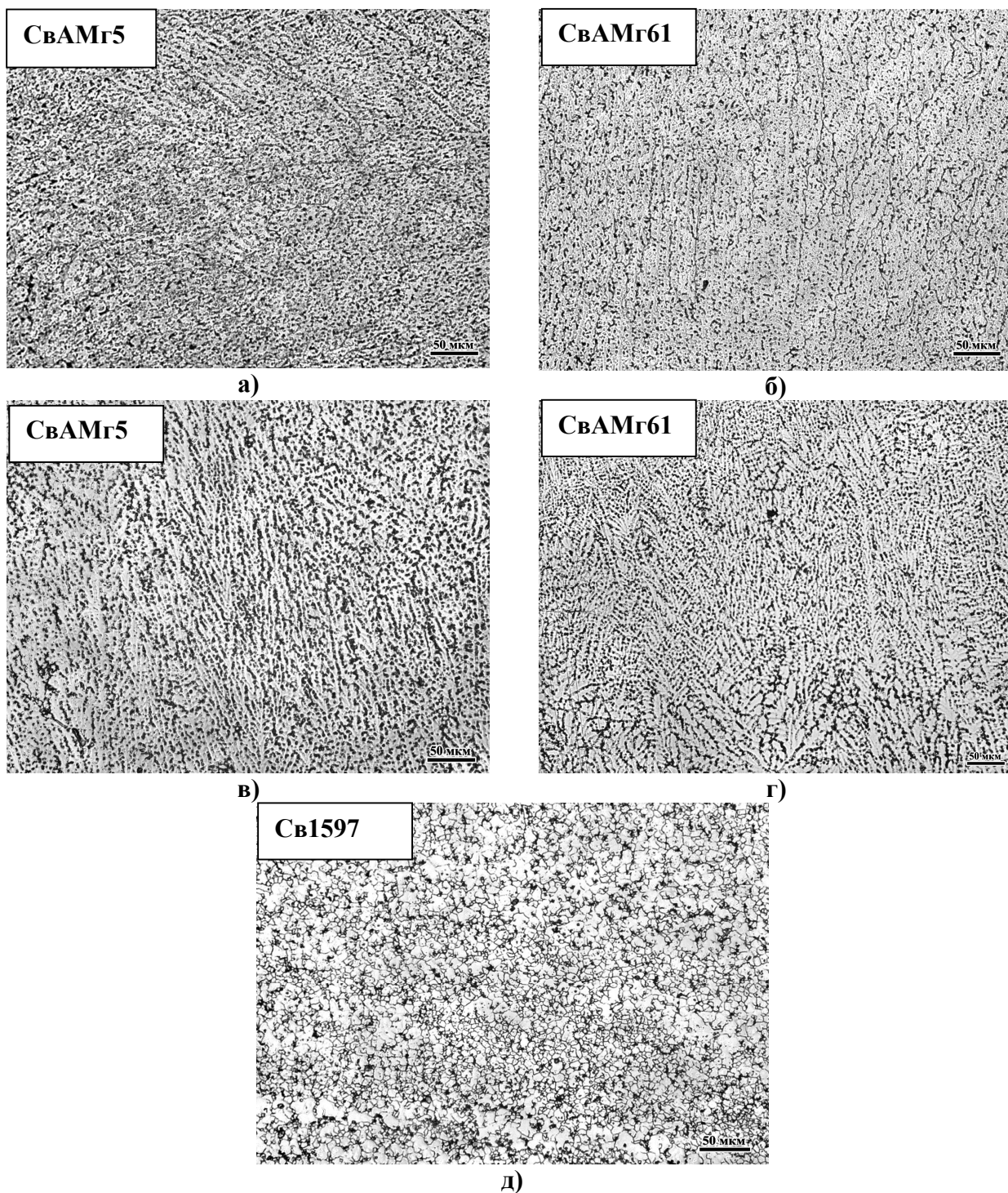


Рисунок 25 – Микроструктура наплавленного металла ($\times 200$), где: а, б, д – ручная аргонодуговая сварка неплавящимся электродом (АрДС); в, г – импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом в среде аргона (ИДСПЭ).

Представленная структура металла соответствует структуре в рабочей зоне цилиндрических образцов, предназначенных для испытаний на статическое растяжение (рисунок 6).

3.1.3 Оценка неоднородности свойств

Оценка неоднородности механических свойств наплавленного металла дана по результатам измерения твердости по Виккерсу (HV) для каждого состава присадочного материала. Измерения проводили по центральной линии поперечного сечения каждого из исследуемых слоев (рисунок 8), шаг между точками составлял 2 мм, нагрузка на инденторе 5 кгс (49Н). Испытательное оборудование – твердомер Zwick/Roell ZHV. Испытания проведены в «ЦНИИ КМ «Прометей».

Значения твердости металла, наплавленного ручной аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом присадочной проволокой СвАМг5 и СвАМг61, находятся в пределах 85–90 и 95–100 HV, соответственно (рисунок 26). Разброс значений, как внутри слоя, так и между слоями не превышал 3–5%.

Твердость металла, наплавленного проволокой Св1597, на 20% выше твердости металла, наплавленного присадочной проволокой СвАМг5, и на 15% – металла, наплавленного присадочной проволокой СвАМг61.

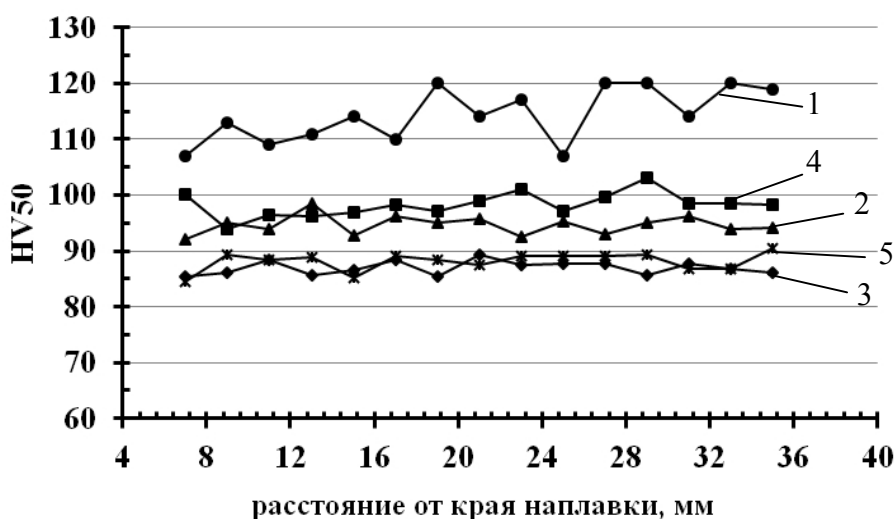


Рисунок 26 – Характер распределения твердости в поперечном сечении проб наплавленного металла, выполненных:

АрДС с присадочной проволокой Св1597 (1), СвАМг61 (2), СвАМг5 (3);

ИДСПЭ с присадочной проволокой СвАМг61 (4), СвАМг5 (5).

Значения твердости металла, наплавленного полуавтоматической аргонодуговой сваркой плавящимся электродом сварочной проволокой марок СвАМг5 и СвАМг61, в исследованных зонах находятся на уровне значений, соответствующих твердости металла, наплавленного ручной аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом: 92–96 НV для СвАМг61 и 85–90 НV для СвАМг5 (рисунок 26).

Анализ результатов измерения твердости металла, наплавленного ручной аргонодуговой сваркой, с результатами измерений в металле, наплавленном механизированной импульсно-дуговой сваркой, показал, что значения твердости лежат в одном диапазоне – разброс не превышает 3–5% – и зависят от марки сварочной проволоки.

Таким образом, по результатам измерений твердости можно сказать, что способ наплавки (сварки) практически не влияет на свойства наплавленного металла.

3.1.4 Механические свойства наплавленного металла

Учитывая то, что металл шва может оказаться наиболее «слабым» участком в сварном соединении, при выборе присадочного материала для изготовления сварных конструкций криогенного назначения из алюминиевых сплавов и разработке технологии сварки, направленной на обеспечение качества сварных соединений, важными факторами являются:

- определение температурной зависимости механических свойств наплавленного (литого) металла в диапазоне температур 77 К– 293 К;
- изучение влияния низкой температуры на вязкость материала, особенно на чувствительность к надрезу наплавленного металла, который может содержать различные концентраторы напряжений сварочного происхождения (вольфрамовые и окисные включения, поры, непровары).

Результаты испытаний представлены в таблицах 19 и 20.

Таблица 19 – Результаты испытаний на статическое растяжение гладких цилиндрических образцов наплавленного металла

Марка присадочной проволоки	Способ сварки	Место вырезки образца	Температура испытания, К	Механические свойства, мин. – макс. сред.		
				σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
СвАМг5	АрДС	нижний слой	293	<u>262-302</u> 287	<u>152-159</u> 155	<u>8,0-16,5</u> 12,7
			203	<u>292-293</u> 292	<u>152-158</u> 155	<u>14,5-16,2</u> 15,3
			108	<u>352-357</u> 354	<u>167-171</u> 169	<u>10,3-11,5</u> 10,9
			77	<u>337-342</u> 340	<u>177-178</u> 177	<u>9,0-9,1</u> 9,0
		средний слой	293	<u>286-309</u> 294	<u>151-154</u> 152	<u>11,8-19,8</u> 14,9
			203	<u>292-309</u> 295	<u>150-156</u> 154	<u>14,0-22,7</u> 18,3
			108	<u>355-363</u> 358	<u>169-171</u> 170	<u>12,8-16,4</u> 14,6
			77	<u>340-389</u> 365	<u>176-180</u> 177	<u>9,7-14,6</u> 12,1
		верхний слой	293	<u>289-311</u> 299	<u>151-152</u> 151,5	<u>15,2-21,0</u> 17,4
			203	<u>291-307</u> 302	<u>150-155</u> 153	<u>14,2-17,5</u> 15,8
			108	<u>348-370</u> 358	<u>167-168</u> 167,5	<u>9,8-14,6</u> 11,2
			77	<u>359-382</u> 370	<u>172-188</u> 180	<u>11,3-13,7</u> 12,5
СвАМг5	ИДСПЭ	нижний слой	293	<u>296-308</u> 304	<u>153-155</u> 154	<u>15,5-22,7</u> 20,1
			108	<u>342-360</u> 349	<u>173-180</u> 177	<u>11,0-17,0</u> 13,6
		верхний слой	293	<u>294-309</u> 300	<u>151-160</u> 156	<u>15,3-22,7</u> 18,4
			108	<u>347-374</u> 365	<u>163-181</u> 175	<u>17,4-20,4</u> 18,9
СвАМг61	АрДС	нижний слой	293	<u>282-323</u> 302	<u>161-168</u> 165	<u>10,8-15,2</u> 12,4
			203	<u>309-317</u> 313	<u>163-168</u> 165	<u>11,3-14,3</u> 12,5
			108	<u>345-370</u> 357	<u>174-176</u> 175	<u>8,8-15,0</u> 11,9
			77	<u>360-375</u> 367	<u>185-186</u> 185	<u>4,5-8,0</u> 5,1
		средний слой	293	<u>314-321</u> 315	<u>161-165</u> 163	<u>9,3-17,5</u> 13,2
			203	<u>300-303</u> 301	<u>160-164</u> 162	<u>8,0-10,2</u> 9,1
			108	<u>355-360</u> 357	<u>176-180</u> 178	<u>9,0-14,6</u> 11,5
			77	<u>360-392</u> 384	<u>185-189</u> 188	<u>5,1-6,5</u> 5,8

Продолжение таблицы 19

Марка присадочной проволоки	Способ сварки	Место вырезки образца	Температура испытания, К	Механические свойства, мин. – макс. сред.		
				σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
СвАМг61	АрДС	верхний слой	293	<u>294-306</u> 302	<u>157-162</u> 160	<u>10,5-14,1</u> 12,6
			203	<u>301-307</u> 303	<u>159-165</u> 163	<u>12,3-12,8</u> 12,4
			108	<u>350-363</u> 356	<u>175-180</u> 177	<u>9,9-11,8</u> 10,8
			77	<u>350-380</u> 369	<u>183-188</u> 185	<u>5,1-5,6</u> 5,4
СвАМг61	ИДСПЭ	нижний слой	293	<u>280-320</u> 300	<u>171-174</u> 172	<u>7,7-12,0</u> 11,3
			108	<u>331-334</u> 332	<u>201-203</u> 202	<u>4,2-6,6</u> 5,4
		средний слой	293	<u>329-330</u> 329	<u>167-174</u> 170	<u>13,3-15,7</u> 14,5
			108	<u>350-362</u> 356	<u>196-198</u> 197	<u>8,9-10,8</u> 9,8
		верхний слой	293	<u>310-340</u> 325	<u>166-168</u> 167	<u>12,5-19,2</u> 16,8
			108	<u>322-378</u> 350	<u>184-192</u> 187	<u>7,1-14,0</u> 10,6
Св1597	АрДС	нижний слой	293	<u>308-371</u> 354	<u>217-222</u> 220	<u>4,5-14,2</u> 10,3
			203	<u>360-366</u> 364	<u>227-238</u> 230	<u>9,2-13,3</u> 11,1
			108	<u>380-415</u> 391	<u>245-260</u> 253	<u>3,3-4,0</u> 3,5
			77	<u>385-405</u> 395	<u>266-305</u> 285	<u>4,2-5,3</u> 4,6
		средний слой	293	<u>312-365</u> 340	<u>221-230</u> 224	<u>5,0-10,2</u> 6,8
			203	<u>350-393</u> 370	<u>225-265</u> 247	<u>8,3-9,7</u> 9,0
			108	<u>349-400</u> 374	<u>243-271</u> 253	<u>3,2-4,8</u> 4,1
			77	<u>359-395</u> 378	<u>240-307</u> 273	<u>3,5-5,1</u> 4,1
		верхний слой	293	<u>347-385</u> 370	<u>216-229</u> 225	<u>11,0-15,5</u> 13,2
			203	<u>347-370</u> 360	<u>230-244</u> 236	<u>6,5-12,4</u> 10,1
			108	<u>360-427</u> 393	<u>239-268</u> 248	<u>7,2-12,2</u> 9,7
			77	<u>360-431</u> 394	<u>271-289</u> 284	<u>4,6-7,1</u> 5,3

Таблица 20 – Результаты испытаний на статическое растяжение цилиндрических образцов с кольцевой выточкой наплавленного металла

Марка присадочной проволоки	Способ сварки	Место вырезки образца	Температура испытания, К	Временное сопротивление, σ_b^H , МПа <u>мин. – макс.</u> сред.
СвАМг5	АрДС	нижний слой	293	<u>322-326</u> 324
			203	<u>330-334</u> 332
			108	<u>373-377</u> 375
			77	<u>354-397</u> 376
		средний слой	293	<u>343-349</u> 345
			203	<u>348-351</u> 350
			108	<u>370-399</u> 388
			77	<u>384-416</u> 400
		верхний слой	293	<u>332-341</u> 335
			203	<u>348-352</u> 350
			108	<u>385-396</u> 391
			77	<u>408-432</u> 419
СвАМг61	АрДС	нижний слой	293	<u>337-340</u> 339
			203	<u>311-371</u> 341
			108	<u>362-367</u> 365
			77	<u>360-391</u> 383
		средний слой	293	<u>326-331</u> 328
			203	<u>347-350</u> 348
			108	<u>337-360</u> 352
			77	<u>350-385</u> 372
		верхний слой	293	<u>321-328</u> 325
			203	<u>337-350</u> 344
			108	<u>337-373</u> 360
			77	<u>341-400</u> 370

Продолжение таблицы 20

Марка присадочной проволоки	Способ сварки	Место вырезки образца	Температура испытания, К	Временное сопротивление, $\sigma_{вн}$, МПа
				мин. – макс. сред.
Св1597	АрДС	нижний слой	293	<u>371-378</u> 374
			203	<u>385-405</u> 398
			108	<u>399-415</u> 408
			77	<u>380-401</u> 390
		средний слой	293	<u>380-415</u> 397
			203	<u>406-410</u> 408
			108	<u>415-421</u> 417
			77	<u>386-403</u> 395
		верхний слой	293	<u>395-425</u> 413
			203	<u>410-432</u> 425
			108	<u>401-413</u> 406
			77	<u>408-416</u> 412

Для объективной качественной оценки механических свойств наплавленного металла проведена математико-статистическая обработка экспериментальных данных.

В первую очередь проверяли, как влияет на механические свойства наплавленного металла место вырезки образца. Нулевая гипотеза заключалась в следующем – для каждого состава присадочного материала при одной температуре испытания место вырезки образца не влияет на механические свойства наплавленного металла (т. е. средние значения $\sigma_{вн}$, $\sigma_{0,2}$, δ во всех слоях равны).

Результаты статистического анализа влияния места вырезки образца на механические свойства наплавленного металла по каждому составу присадочного материала и способу сварки представлены в таблицах 21–23.

Т а б л и ц а 21 – Результаты статистического анализа временного сопротивления (σ_b) наплавленного металла в зависимости от места вырезки образца при $\alpha=0,05$.

Марка сварочной проволоки	Способ сварки	Температура испытания, К	Расчетное значение F	Табличное значение $F_{крит.}$	Среднее значение σ_b , МПа	СКО
СвАМг5	АрДС	293	0,86	4,26	294	13,2
		203	0,39	9,55	297	8,5
		108	0,14	9,55	356	7,7
		77	1,03	9,55	358	22,6
	ИДСПЭ	293	0,31	7,71	302	6,7
		108	2,25	7,71	357	14,3
СвАМг61	АрДС	293	1,38	9,55	306	11,6
		203	5,11	9,55	306	6,1
		108	0,006	9,55	356	9,2
		77	0,01	9,55	370	13,6
	ИДСПЭ	293	1,18	9,55	318	21,1
		108	0,56	9,55	346	21,1
Св1597	АрДС	293	0,43	9,55	354	26,5
		203	0,21	9,55	364	16,6
		108	0,17	9,55	386	29,9
		77	0,19	9,55	389	27,6

Т а б л и ц а 22 – Результаты статистического анализа условного предела текучести ($\sigma_{0,2}$) наплавленного металла в зависимости от места вырезки образца при $\alpha=0,05$.

Марка сварочной проволоки	Способ сварки	Температура испытания, К	Расчетное значение F	Табличное значение $F_{крит.}$	Среднее значение $\sigma_{0,2}$, МПа	СКО
СвАМг5	АрДС	293	1,1	4,25	152	1,36
		203	0,18	9,55	153	3,5
		108	0,85	9,55	169	1,72
		77	0,1	9,55	178	5,3
	ИДСПЭ	293	0,13	7,7	155	3,13
		108	0,11	7,7	176	6,7
СвАМг61	АрДС	293	0,76	4,25	162	3,9
		203	0,48	9,55	163	3,5
		108	0,74	9,55	177	2,5
		77	0,36	9,55	186	2,2
	ИДСПЭ	293	1,4	9,55	170	3,3
		108	2,10	9,55	195	4,0
Св1597	АрДС	293	0,31	9,55	223	6,1
		203	0,10	9,55	237	20,9
		108	0,01	9,55	251	19,3
		77	0,02	9,55	281	17,4

Т а б л и ц а 23 – Результаты статистического анализа относительного удлинения (δ) наплавленного металла в зависимости от места вырезки образца при $\alpha=0,05$.

Марка сварочной проволоки	Способ сварки	Температура испытания, К	Расчетное значение F	Табличное значение $F_{\text{крит.}}$	Среднее значение δ , %	СКО
СвАМг5	АрДС	293	1,7	4,4	15,1	3,7
		203	0,34	9,55	16,5	3,3
		108	0,57	9,55	12,5	2,5
		77	1,45	9,55	11,2	2,4
	ИДСПЭ	293	0,27	7,7	19,2	3,6
		108	4,3	7,7	16,3	4,2
СвАМг61	АрДС	293	0,11	4,25	12,7	3,1
		203	3,41	9,55	11,3	2,5
		108	0,17	9,55	11,0	2,3
		77	0,63	9,55	5,4	0,6
	ИДСПЭ	293	1,7	9,55	13,4	3,8
		108	1,6	9,55	8,6	3,4
Св1597	АрДС	293	0,63	9,55	10,1	4,6
		203	0,38	9,55	10,6	2,4
		108	0,14	9,55	5,7	3,5
		77	0,32	9,55	4,6	2,1

Анализ показал, что во всех рассмотренных случаях расчетный критерий Фишера значительно меньше табличного критического значения ($F < F_{\text{крит.}}$), что свидетельствует о равенстве средних значений механических свойств между слоями в наплавках, где дисперсии равны и принадлежат одной генеральной совокупности. То есть, с вероятностью 95% можно утверждать, что место вырезки образца, а, следовательно, и многократные нагревы при многопроходной сварке, не влияют на прочностные и пластические свойства наплавленного металла при заданной температуре испытаний. Нулевая гипотеза – верна.

На следующем этапе проведена оценка влияния способа сварки (АрДС и ИДСПЭ) на механические свойства наплавленного металла, выполненного присадочным материалом СвАМг5 и СвАМг61, при комнатной (293 К) и криогенной (108 К) температурах. Результаты анализа представлены в таблице 24.

Т а б л и ц а 24 – Результаты статистического анализа механических свойств наплавленного металла в зависимости от способа сварки при $\alpha=0,05$.

Присадочный материал	Оцениваемый параметр	Температура испытания, К	Расчетное значение F	Табличное значение $F_{\text{крит.}}$	Среднее значение	СКО
СвАМг5	Временное сопротивление, МПа	293	1,99	4,49	298	11,7
		108	0,01	4,49	357	11,0
	Условный предел текучести, МПа	293	1,3	4,49	154	2,8
		108	1,6	4,9	171	5,6
	Относительное удлинение, %	293	1,1	4,9	16,9	3,2
		108	1,8	4,9	14,3	3,5
СвАМг61	Временное сопротивление, МПа	293	2,1	4,7	310	18,6
		108	0,47	4,49	357	9,2
	Условный предел текучести, МПа	293	3,39	4,9	166	3,7
		108	2,4	4,9	181	9,7
	Относительное удлинение, %	293	0,58	4,5	14,3	3,7
		108	0,12	4,9	9,1	4,2

По результатам расчета (таблица 24) видно, что во всех случаях значения расчетного критерия Фишера значительно ниже критического значения ($F < F_{\text{крит.}}$) следовательно, способ сварки (АрДС или ИДСПЭ) не оказывает существенного влияния на механические свойства наплавленного металла.

Промежуточный вывод. Выполненный статистический анализ результатов экспериментальных данных показал, что влиянием повторных сварочных нагревов при многопроходной сварке и способом сварки на свойства наплавленного металла можно пренебречь и признать существенными только химический состав присадочного материала, температуру испытаний и наличие искусственного концентратора напряжений.

Результаты статистического анализа могут быть представлены обобщающим эмпирическими уравнениями регрессии, которые устанавливают взаимосвязь между механическими свойствами металла и факторами влияния:

$$\sigma_b = 223 + 14,1X_2 + 15,8X_3 + 11,2X_4 - 7,0X_5 + 39,7X_6 \text{ (МПа);}$$

$$\sigma_{0,2} = 92 + 10,8X_2 + 34,7X_3 + 4,8X_4 - 0,8X_5 \text{ (МПа);}$$

$$\delta = 20,4 - 1,6X_2 + 4,3X_3 + 0,9X_4 + 0,96X_5 \text{ (%), где:}$$

X_2 – температура испытания (293 К – 0; 108 К – 1);

X_3 – марка присадочного материала (СвАМг5 – 0; СвАМг61 – 1; Св1597 – 3);

X_4 – способ сварки (АрДС – 0; ИДСПЭ – 1);

X_5 – область вырезки образца (верхний слой – 0; средний слой – 1; нижний слой – 2);

X_6 – тип образца наплавленного металла (гладкий – 0; с кольцевой выточкой – 1).

На рисунке 27 представлены диаграммы изменения механических свойств металла наплавленного СвАМг5, СвАМг61 и Св1597.

При комнатной температуре свойства наплавленного металла определяются химическим составом присадочного материала, в частности содержанием основных легирующих элементов (магния) и элементов модификаторов (марганец, скандий, цирконий). При комнатной температуре для металла, наплавленного присадочными материалами марок СвАМг5, СвАМг61 и Св1597, средние значения составляют: для временного сопротивления – 298, 306 и 354 МПа, условного предела текучести – 154, 166 и 223 МПа, относительного удлинения – 17,2, 14,3 и 10,1%, соответственно (рисунок 27, а, б, в).

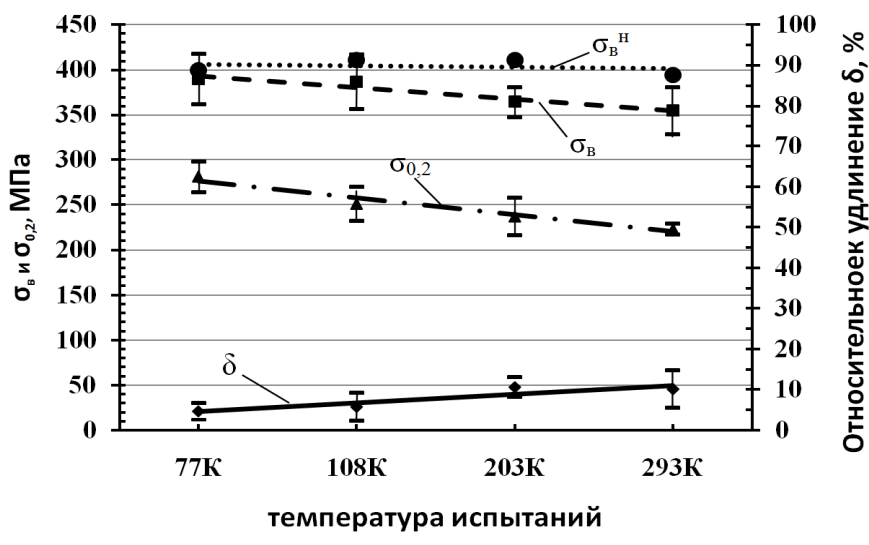
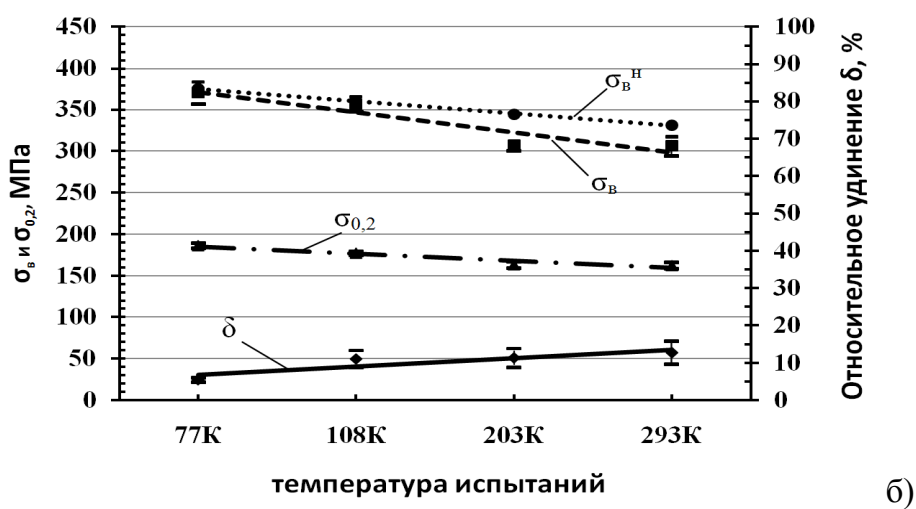
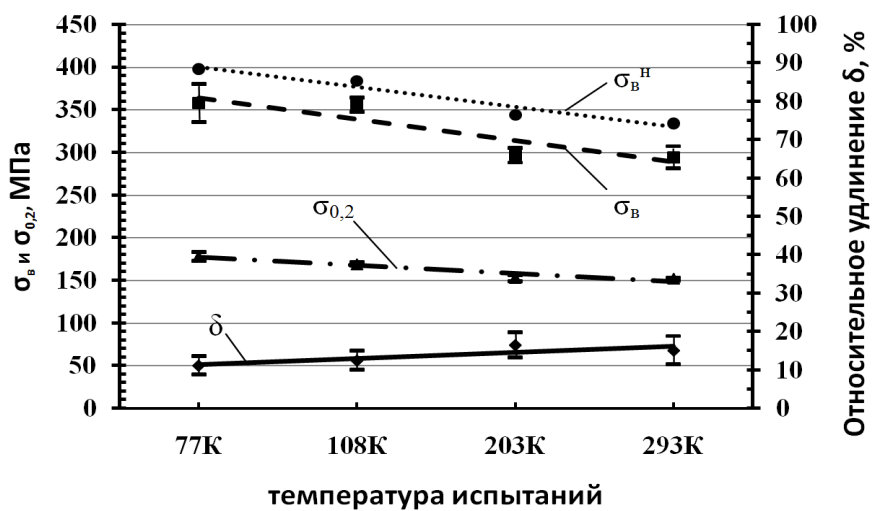


Рисунок 27 – Зависимость механических свойств наплавленного металла (АрДС) от температуры испытаний, по средним значениям: а – наплавленный металл СвАМг5; б – наплавленный металл СвАМг61; в – наплавленный металл Св1597.

Наблюдается одинаковая закономерность изменения свойств наплавленного металла для всех исследованных составов присадочного материала из алюминиево-магниевого сплавов, с понижением температуры испытаний: прочностные характеристики (временное сопротивление и условный предел текучести) возрастают, а показатель пластичности (относительное удлинение) снижается. Установленная зависимость характерна для литейных алюминиевых сплавов [38].

Характер и темп низкотемпературного упрочнения наплавленного металла для СвАМг5 и СвАМг61 по показателям временного сопротивления составляет 17–20% при температуре 77 К. Металл, наплавленный проволокой марки Св1597, имеет временное сопротивление на 10–15%, а условный предел текучести на 25–30% выше, чем металл, наплавленный проволоками СвАМг5 и СвАМг61, в диапазоне температур 293 К – 77 К (рисунок 27, а, б, в). При этом темп роста прочности металла, наплавленного Св1597, с понижением температуры в 2 раза ниже, чем у менее прочных сплавов СвАМг5 и СвАМг61. Рост условного предела текучести менее интенсивен, чем временного сопротивления.

С понижением температуры испытаний относительное удлинение (показатель пластичности) монотонно снижается и при температуре 77 К составляет 40–75% от значений, соответствующих комнатной температуре, в зависимости от состава присадочного материала. Минимальный темп снижения относительного удлинения характерен для менее прочного сплава (СвАМг5), его значения при 77 К находятся на уровне значений более прочного сплава (СвАМг61) при комнатной температуре, которые составляют 12–14%. Значения относительного удлинения металла, наплавленного составами СвАМг61 и Св1597, при 77 К составляют около 5% и 4%, соответственно.

Влияние низкой температуры на вязкость материала, особенно на чувствительность к надрезу наплавленного металла, который может содержать трещины, пустоты и другие концентраторы напряжений сварочного происхождения, является важным фактором, который следует принимать во внимание при выборе присадочного материала и разработке технологии сварки, направленной на обеспечение качества сварных соединений.

Экспериментально установлено, что прочность образцов с кольцевой выточкой выше прочности и предела текучести гладких цилиндрических образцов во всем диапазоне температур от 77 до 293 К (рисунок 27, а, б, в).

Это связано с тем, что при растяжении в области надреза возникает объемное (трехосное) напряженное состояние, когда кроме напряжения действующего параллельно приложенной нагрузке возникают радиальная и поперечная компоненты напряжения. Материал находится в напряженном состоянии (напряжения достигли предела текучести), стремится сжаться, а в непосредственной близости от надреза материал характеризуется гораздо меньшим уровнем напряжений (большее сечение), эти области будут сопротивляться сжатию, т. е. возникают напряжения, препятствующие утонению шейки. Чтобы поддержать пластическое течение в шейке, необходимо увеличение растягивающих осевых напряжений. При этом следует отметить, что несмотря на то, что в образце с надрезом наблюдается более высокое напряжение по всему сечению, нагрузка, необходимая для разрушения этого образца, ниже, чем в случае гладкого образца, имеющего полное поперечное сечение [116].

Более полно оценить чувствительность наплавленного металла к концентрации напряжений и его склонность к хрупкому разрушению позволили расчетные коэффициенты [39]:

$\alpha = \sigma_{\text{в}}^{\text{HT}} / \sigma_{\text{в}}^{\text{T}}$ – коэффициент чувствительности к концентрации напряжений;

$\alpha' = \sigma_{\text{в}}^{\text{HT}} / \sigma_{0,2}^{\text{T}}$ – коэффициент вязкости металла в надрезе;

$K' = \sigma_{\text{в}}^{\text{HT}} / \sigma_{\text{в}}^{293\text{K}}$ – коэффициент характеризующий изменение прочности надрезного образца при понижении температуры испытаний;

$K'' = \sigma_{\text{в}}^{\text{HT}} / \sigma_{0,2}^{293\text{K}}$ – коэффициент характеризующий запас прочности металла.

Диаграммы рассматриваемых коэффициентов в зависимости от температуры испытания представлены на рисунке 28.

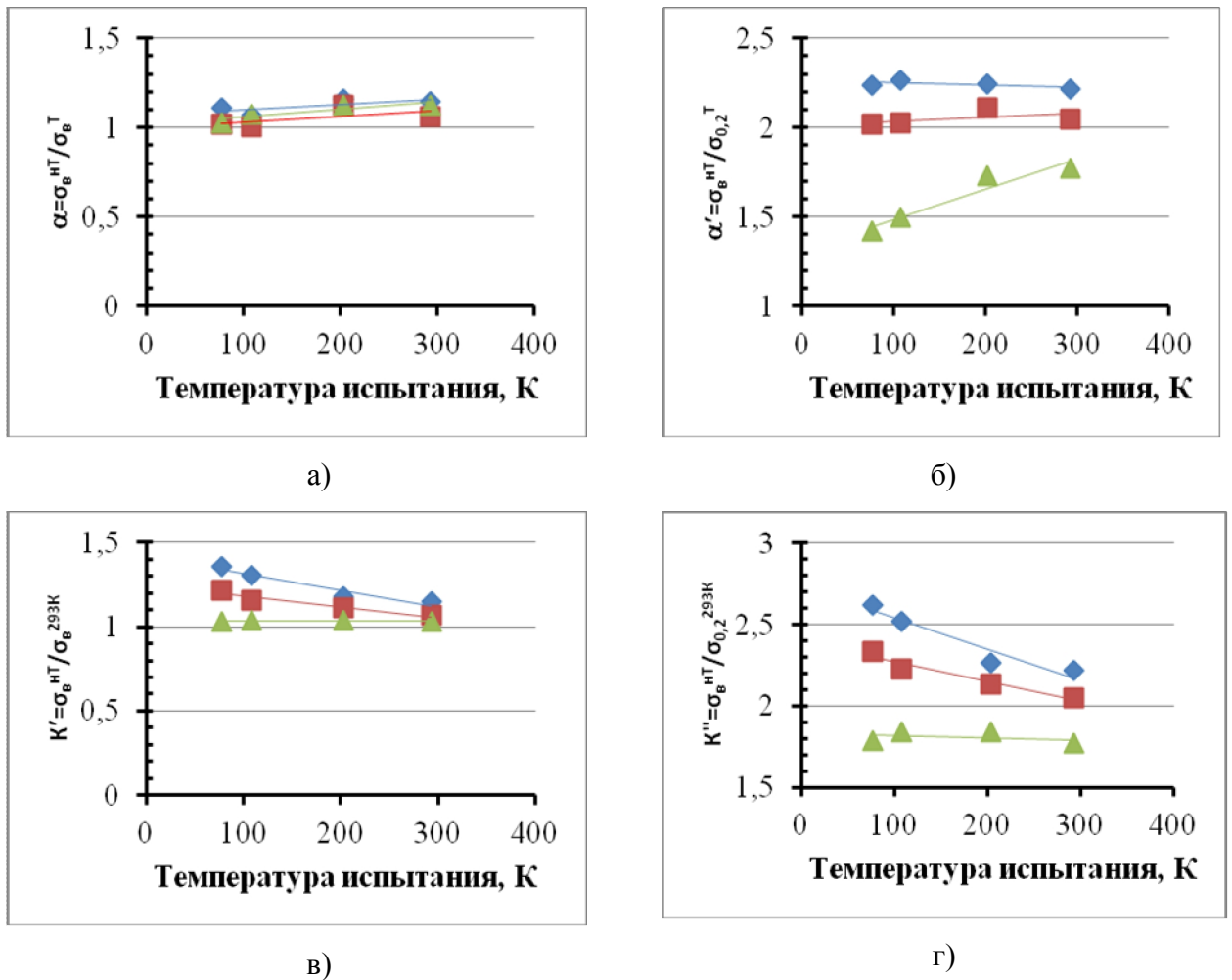


Рисунок 28 – Температурные зависимости расчетных коэффициентов, где: σ_b^T – временное сопротивление гладкого образца; σ_b^{HT} – временное сопротивление образца с надрезом; $\sigma_{0,2}^T$ – предел текучести.

◆ – сплав СвАМг5; ■ – сплав СвАМг61; ▲ – сплав 1597.

Анализ полученных зависимостей позволяет констатировать следующее:

1. Коэффициент чувствительности наплавленного металла к концентрации напряжений $\alpha = \sigma_b^{HT} / \sigma_b^T$ находится на уровне 1,1–1,2 (рисунок 28, а), т.е. прочность образцов с надрезом σ_b^{HT} выше прочности гладких образцов σ_b^T при всех температурах испытаний, при этом наблюдается одинаковая закономерность изменения α для всех исследуемых составов присадочного материала – незначительное снижение при криогенных температурах (на 5–10%).

2. Коэффициент вязкости металла в надрезе, оцененный выражением $\alpha' = \sigma_b^{HT} / \sigma_{0,2}^T$, в зависимости от состава сплава и температуры испытаний (рисунок 28, б) позволяет судить о характере разрушения наплавленного металла. Прочность образцов с надрезом σ_b^{HT} выше значений предела текучести гладких образцов $\sigma_{0,2}^T$

при всех температурах испытаний. Наиболее высокие значения коэффициента α соответствуют сплаву марки СвАМг5 ($\alpha = 2,2$ и практически не зависит от температуры испытаний), что указывает на высокую вязкость этого материала во всем диапазоне исследуемых температур. Сплав СвАМг61 отличается также высокой вязкостью ($\alpha = 2,0$), которая практически не зависит от температуры испытаний. Для сплава Св1597 характерно снижение коэффициента вязкости с понижением температуры, так при 293 К $\alpha = 1,7$, а при температуре 108 К $\alpha = 1,5$.

3. Коэффициент $K' = \sigma_{\text{в}}^{\text{нТ}} / \sigma_{\text{в}}^{293}$, характеризующий изменение прочности надрезанного образца при низкой температуре по сравнению с таковой в условиях комнатной температуры (рисунок 27 в), показывает, что при всех исследуемых температурах прочность надрезанного образца выше прочности гладкого образца.

4. Коэффициент $K'' = \sigma_{\text{в}}^{\text{нТ}} / \sigma_{0,2}^{293}$ характеризует запас прочности металла при криогенной температуре (рисунок 28, г), наибольшие значения ($K'' = 2,5$) которого при 108 К соответствуют сплаву СвАМг5, а для сплавов СвАМг61 и Св1597 – 2,1 и 1,8, соответственно.

5. При изучении изломов образцов, испытанных при комнатной и при криогенной температуре, зафиксирован микрорельеф ямочного вида, что характерно при вязком разрушении пластичных металлов по механизму образования и слияния пор (рисунок 29).

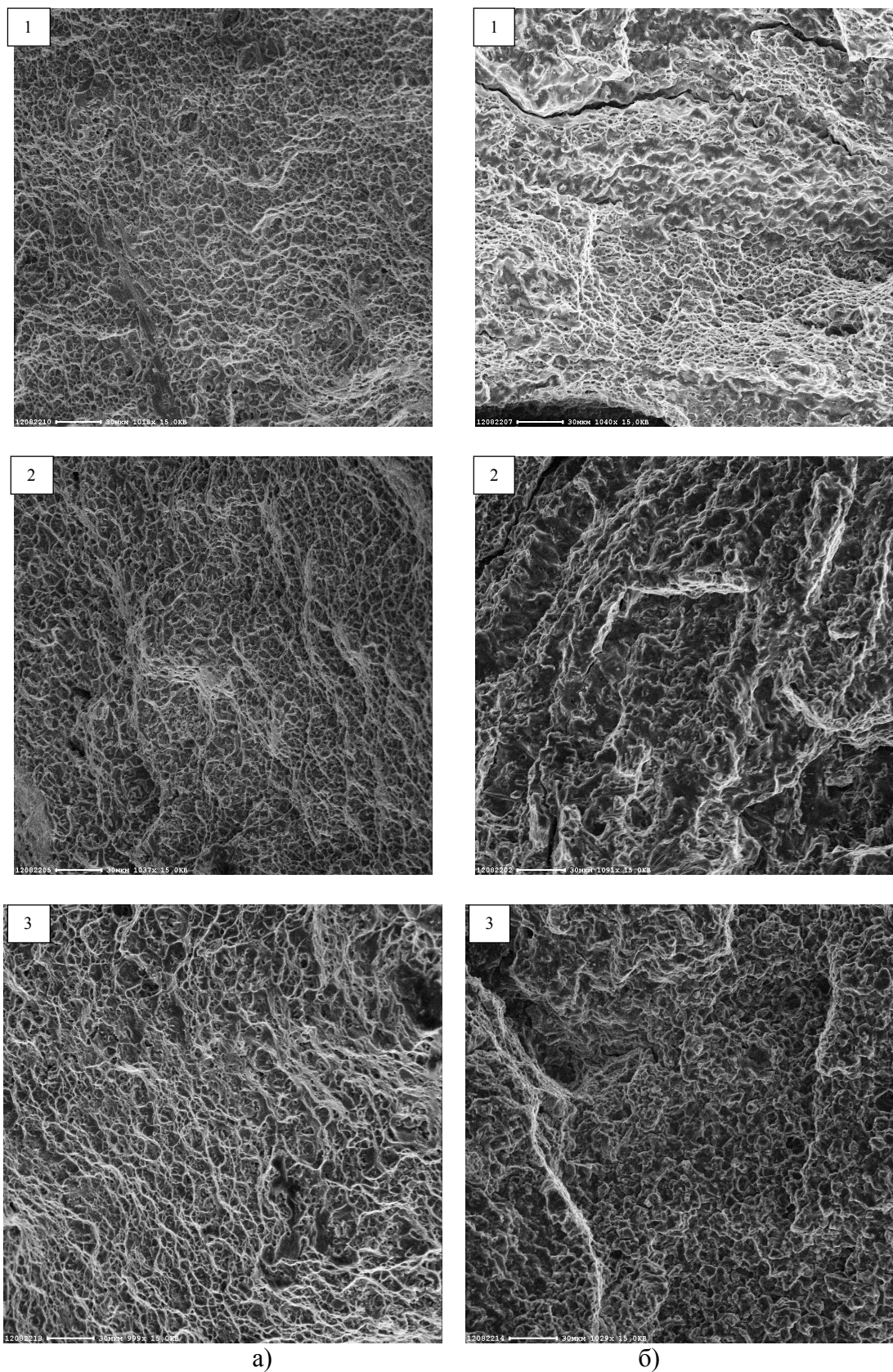


Рисунок 29 – Фрактограммы поверхности разрушения образцов наплавленного металла (СвАМг5 – 1; СвАМг61 – 2; Св1597 – 3), испытанных на растяжение при комнатной температуре 293 К – а) и температуре 108 К – б). $\times 1000$.

3.1.5 Ударная вязкость

Ударная вязкость – механическая характеристика материала, показывающая способность материала поглощать механическую энергию в процессе деформации и разрушения под действием ударной нагрузки. Из всех механических характеристик ударная вязкость наиболее чувствительна к снижению температуры. Поэтому испытания на ударный изгиб проводят для определения порога хладноломкости материала – температуры или интервала температур, при которых происходит резкое снижение значений ударной вязкости.

В работах ряда авторов [4, 15, 39, 41, 117] отмечено, что с падением температуры испытаний от комнатной до криогенных ударная вязкость у алюминиево-магниевых сплавов равномерно понижается. В условиях криогенных температур у них остается вязкий излом при относительно малых значениях ударной вязкости.

Целью настоящих испытаний является сравнительный анализ значений ударной вязкости наплавленного металла в зависимости от состава сварочной проволоки и способа сварки в диапазоне температур испытаний 77 К – 293 К.

Результаты испытаний на ударный изгиб металла, наплавленного присадочными материалами СвАМг5, СвАМг61 и Св1597, приведены в таблице 25 и на рисунке 30.

Т а б л и ц а 25 – Результаты испытаний наплавленного металла на ударный изгиб при комнатной и криогенной температурах

Присадочный материал	Способ сварки	Ударная вязкость КСУ, Дж/см ² при температуре испытаний			
		77 К	108 К	203 К	293 К
СвАМг5	АрДС	$\frac{7,5-8,3}{7,8}$	$\frac{8,2-9,7}{9,0}$	$\frac{15,7-18,7}{17,6}$	$\frac{17,9-26,1}{20,9}$
СвАМг5	ИДСПЭ	$\frac{7,1-10,1}{9,2}$	–	–	$\frac{22,6-28,9}{25,4}$
СвАМг61	АрДС	$\frac{6,7-9,0}{7,5}$	$\frac{5,2-11,9}{8,5}$	$\frac{11,9-14,8}{13,4}$	$\frac{11,9-17,0}{14,4}$
СвАМг61	ИДСПЭ	$\frac{6,0-7,5}{7,0}$	–	–	$\frac{14,9-19,4}{17,2}$
Св1597	АрДС	$\frac{5,9-6,7}{6,1}$	$\frac{5,2-5,9}{5,4}$	$\frac{9,6-14,1}{11,2}$	$\frac{9,7-12,6}{11,0}$

Примечание: в числителе min-max значения, в знаменателе – среднее значение.

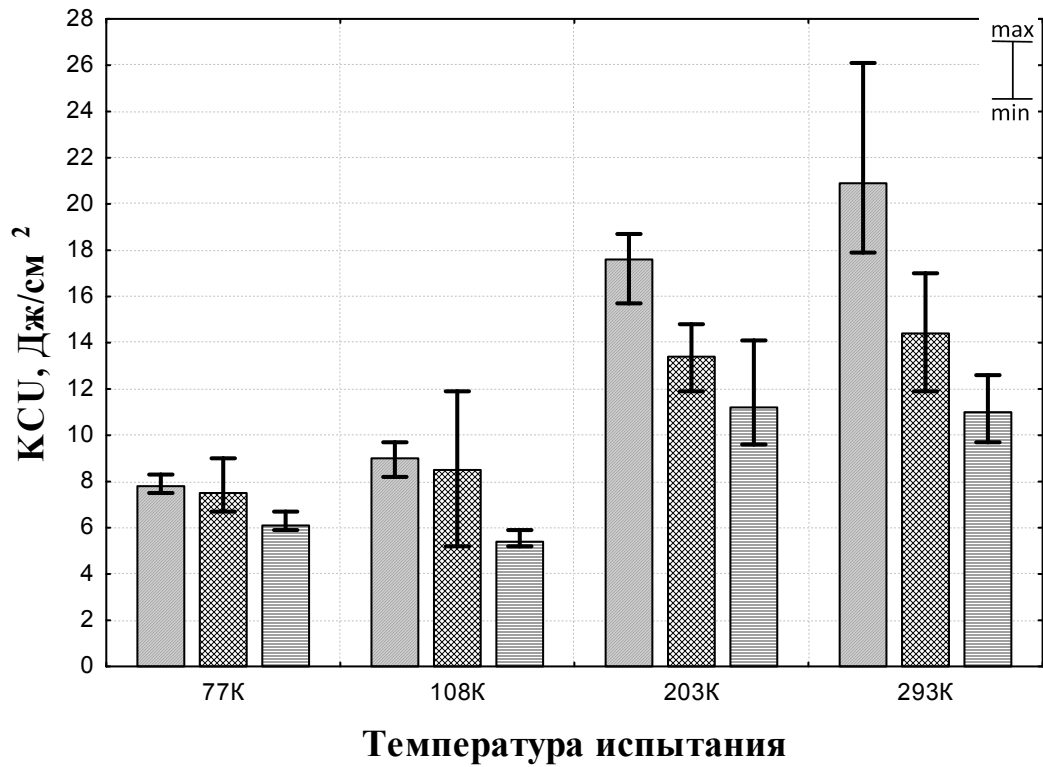


Рисунок 30 – Изменение ударной вязкости металла, наплавленного АрДС, в зависимости от температуры испытаний и состава присадочного материала:

▨ – СвАМг5; ▩ – СвАМг61; ▨ – Св1597.

Результаты испытаний металла, наплавленного АрДС, показали, что при температуре 293 К зафиксировано наиболее высокое среднее значение ударной вязкости $20,9 \text{ Дж/см}^2$ у металла, наплавленного СвАМг5, для металла наплавленного СвАМг61 – $14,4 \text{ Дж/см}^2$, самое низкое значение у металла наплавленного Св1597 – 11 Дж/см^2 .

Для металла, наплавленного ИДСПЭ, при комнатной температуре значения ударной вязкости для СвАМг5 лежат в диапазоне $22,6 - 28,9 \text{ Дж/см}^2$, а для СвАМг61 в диапазоне $14,9 - 19,4 \text{ Дж/см}^2$.

При снижении температуры испытаний у всех исследуемых составов присадочного материала, независимо от способа сварки, наблюдается одинаковая закономерность изменения ударной вязкости, заключающаяся в ее равномерном понижении. При температуре 77 К ударная вязкость составляет 40 – 50% ($6 - 9 \text{ Дж/см}^2$) от значений, полученных при комнатной температуре. Это согласуется с данными ряда авторов [1, 38, 39, 41, 117] и объясняется тем, что вязкость является интегральной характеристикой зависящей от пластичности и прочности материала.

Выводы по главе 3

1. Металлографические исследования металла, наплавленного присадочным материалом СвАМг5 и СвАМг61, не выявили заметных отличий структуры в зависимости от способа сварки и зоны исследования. Структура металла представляет собой характерную для алюминиево-магниевого сплава литую кристаллическую структуру дендритного строения с выделениями упрочняющей фазы различной степени дисперсности. Металлу, наплавленному сварочной проволокой марки Св1597, присуща литая мелкозернистая структура с равномерным распределением выделений упрочняющих фаз (типа Al_3Sc), как по границам, так и внутри зерен, что предполагает достижение более высоких прочностных свойств.

2. При оценке неоднородности механических свойств наплавленного металла измерением твердости металла по Виккерсу установлено, что твердость металла зависит от марки присадочного материала и практически не зависит от способа сварки (АрДС или ИДСПЭ). Так для металла, наплавленного присадочным материалом СвАМг5, значения твердости лежат в диапазоне 85–90 HV; для СвАМг61 в диапазоне 92–100 HV. Наибольшие значения твердости имеет металл, наплавленный скандийсодержащим присадочным материалом Св1597 109–120 HV.

3. При качественной оценке результатов испытаний наплавленного металла на статическое растяжение установлено, что такие факторы, как место вырезки образца (по высоте многослойной наплавки) и способ сварки плавлением (АрДС, ИДСПЭ), не оказывают существенного влияния на свойства наплавленного металла. Существенными факторами влияния признаны: состав присадочного материала, тип образца и температура испытания.

4. При комнатной температуре прочностные свойства наплавленного металла для сплавов СвАМг5 и СвАМг61 близки по своим значениям: временное сопротивление составляет 298–310 МПа, предел текучести 154–166 МПа. Значения относительного удлинения составляют 16,9 и 14,3%, соответственно.

Среднее значение временного сопротивления металла, наплавленного с использованием проволоки системы Al-Mg-Sc (Св1597), составляет 354 МПа, условного предела текучести 223 МПа, что выше соответствующих значений для

металла, наплавленного проволоками марок СвАМг5 и СвАМг61, при этом относительное удлинение составляет 10,1%.

5. Наблюдается одинаковая закономерность изменения свойств наплавленного металла для всех исследованных составов присадочного материала с понижением температуры испытаний: временное сопротивление и условный предел текучести при температуре 77 К возрастают на 10–15% в зависимости от состава присадочного материала. Данное обстоятельство отличает наплавленный (литой) металл от деформированных полуфабрикатов той же системы легирования, у которых при понижении температуры происходит рост прочности на 30–40%.

6. Следует предположить, что в сварных соединениях алюминиево-магниевого сплава, для которых предназначены исследуемые составы присадочного материала, наиболее ослабленной зоной будет являться шов, металл которого характеризуется комплексом прочностных и пластических свойств, особенно в условиях низкотемпературного нагружения, заметно отличающихся от основного свариваемого материала.

7. Прочность цилиндрических образцов с кольцевой выточкой при криогенной температуре выше прочности и предела текучести гладких цилиндрических образцов во всем диапазоне температур 77 К – 293 К. Значения расчетных коэффициентов $\sigma_{\text{в}}^{\text{HT}}/\sigma_{\text{в}}^{\text{T}}$ и $\sigma_{\text{в}}^{\text{HT}}/\sigma_{0,2}^{\text{T}}$ для металла, наплавленного исследуемыми составами присадочного материала, больше 1, что свидетельствует о низкой чувствительности к концентрации напряжений и высокой вязкости наплавленного металла в исследуемом диапазоне температур.

8. Для металла, наплавленного АрДС и ИДСПЭ присадочными материалами СвАМг5, СвАМг61 и Св1597, при понижении температуры испытаний характерно равномерное снижение ударной вязкости. Наибольшей вязкостью при комнатной температуре испытаний обладает металл, наплавленный СвАМг5 – 20,9 Дж/см² и 25,4 Дж/см²; для СвАМг61 – 14,4 Дж/см² и 17,2 Дж/см², соответственно для АрДС и ИДСПЭ; меньшее значение у Св1597 – 11,0 Дж/см². При криогенной температуре (77 К) испытаний значения ударной вязкости для всех исследуемых составов лежат в диапазоне 6,0–9,2 Дж/см².

9. Установлено, что в условиях низкотемпературного нагружения металла с литой структурой, наплавленного присадочными материалами марок СвАМг5,

СвАМг61 и Св1597 способами сварки плавлением неплавящимся и плавящимся электродом, достигается прочность при 108 К на уровне 357, 357 и 386 МПа, соответственно, что на 15–25% ниже прочности деформированных алюминиевых сплавов той же системы легирования.

10. Подтверждена пригодность к низкотемпературному применению присадочных материалов марок СвАМг5, СвАМг61 и Св1597 по результатам оценки коэффициентов чувствительности к концентрации напряжений, вязкости в надрезе, запаса прочности.

Глава 4. Экспериментальные исследования и анализ влияния конструктивных и технологических факторов сварки на механические свойства сварных соединений алюминиевых сплавов при криогенных температурах

Исследованы свойства сварных соединений полуфабрикатов алюминий-магниевого сплава марок 1565ч и 1550, выполненных с применением технологических процессов сварки плавлением – неплавящимся (АрДС) и плавящимся (ИДСПЭ) электродом в среде аргона, и сварки в твердой фазе – сварка трением с перемешиванием (СТП). Сварка плавлением осуществлена с применением присадочного материала марки СвАМг5 при сварке полуфабрикатов сплава 1550, и марок СвАМг61 и Св1597 (со скандием) при сварке полуфабрикатов сплава 1565ч.

4.1 Свойства сварных соединений алюминиевых сплавов в зависимости от конструктивных и технологических факторов

Свойства сварных соединений листовых полуфабрикатов из алюминиевых сплавов марок 1565ч и 1550 оценивали по результатам исследования структуры и испытаний на растяжение плоских образцов с различным конструктивным оформлением шва при комнатной и криогенной температуре.

4.1.1 Металлографические исследования сварных соединений

Металлографические исследования структуры металла разных зон сварных соединений алюминий-магниевого сплава, выполненных сваркой плавлением неплавящимся и плавящимся электродом и сваркой трением с перемешиванием металла, проводили на плоских образцах, в поперечном сечении которых располагался сварной шов.

Макроструктура поперечного сечения сварного стыкового соединения алюминий-магниевого сплава характеризуется однотипным строением и состоит из характерных зон, свойственных дуговым способам сварки плавлением, которые, как правило, отличаются различной травимостью металла в специальных реактивах, в частности в растворе едкого натра.

Стыковые соединения, выполненные сваркой плавлением, включают (рисунок 31):

1 – шов, форма которого определяется конструктивными элементами подготовленных под сварку кромок свариваемых деталей;

2 – околошовную зону (ОШЗ), прилегающую ко шву и включающую зону сплавления металла шва со свариваемым металлом;

3 – зону термического влияния (ЗТВ), в которой основной металл подвергается структурным изменениям под воздействием сварочного нагрева;

4 – основной металл.

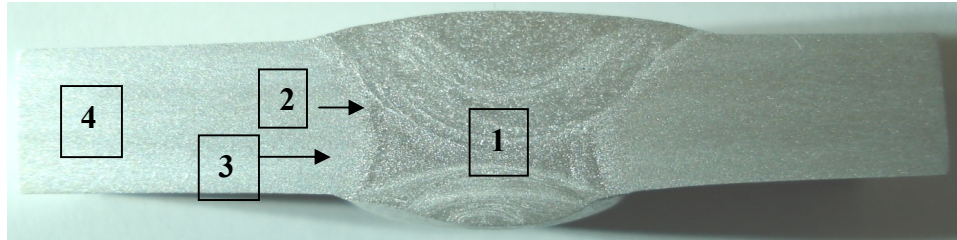


Рисунок 31 – Макроструктура сварного соединения сплава марки 1565ЧМ толщиной 10 мм, выполненного ИДСПЭ.

Стыковые соединения, выполненные СТП, включают следующие области (рисунок 32):

1 – шов, форма которого очерчена внешними контурами вращающихся рабочих поверхностей сварочного инструмента (уступа и наконечника);

2 – зона термомеханического воздействия (ЗТМВ), представляющая собой узкую полосу металла, прилегающую ко шву;

3 – зона термического влияния (ЗТВ), протяженность которой ограничена радиусом уступа сварочного инструмента;

4 – основной металл.

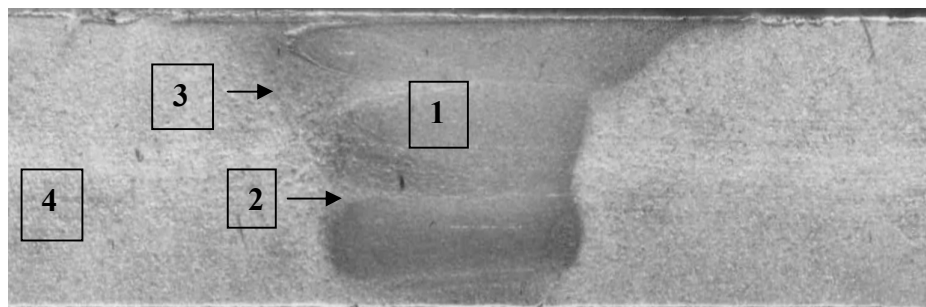


Рисунок 32 – Макроструктура поперечного сечения сварного соединения сплава 1550М толщиной 5 мм, выполненного СТП.

В макроструктуре поперечного сечения сварных соединений не обнаружено недопустимых внутренних дефектов, о чем также свидетельствовали результаты радиографического контроля.

Микроструктура металла шва и зоны термического влияния сварных соединений алюминиево-магниевых сплавов 1565ч и 1550 (рисунок 33) зависит от способа сварки – плавлением (АрДС и ИДСПЭ) или в твердой фазе (СТП) и химического состава присадочного материала (СвАМг5 и СвАМг61 или Св1597).

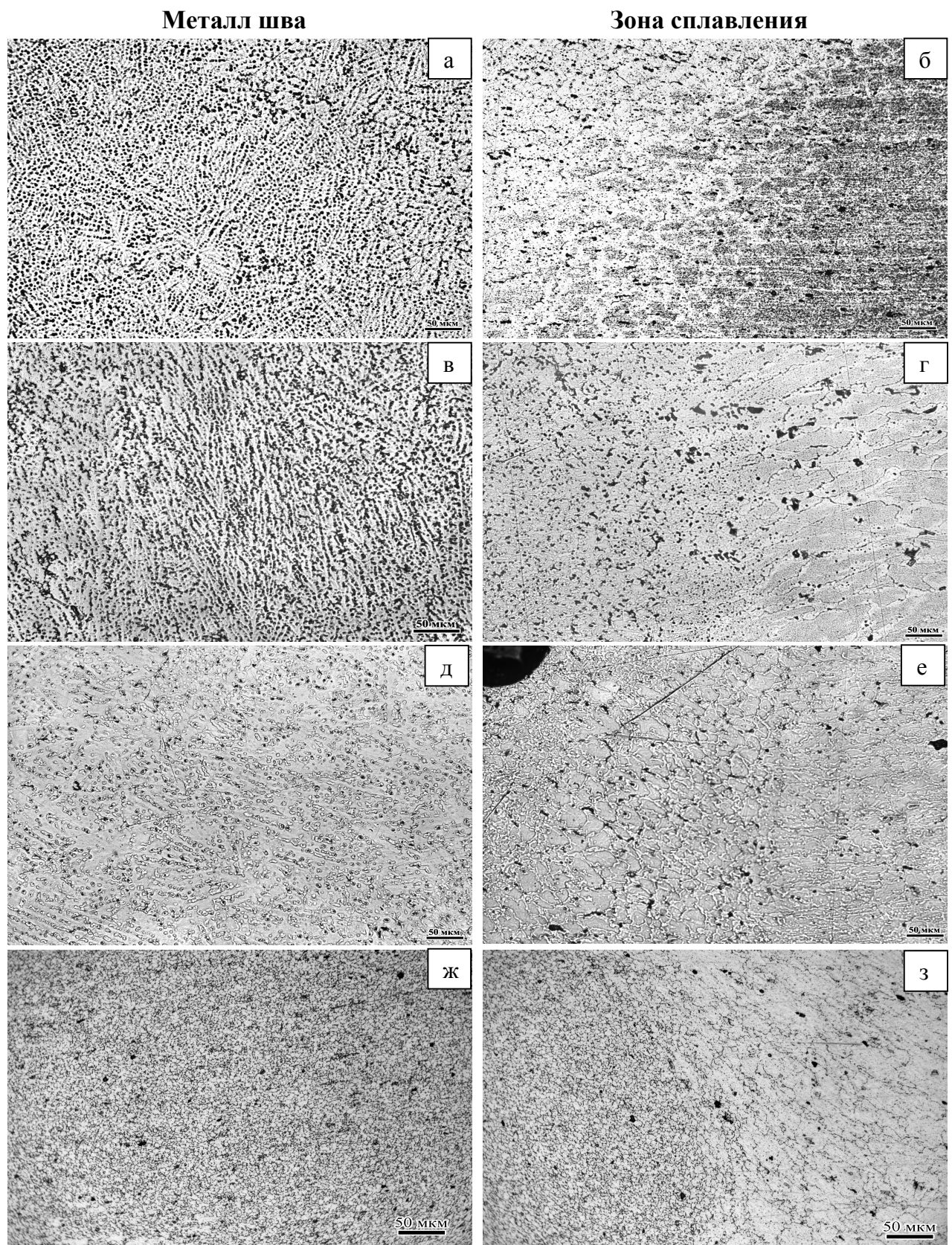


Рисунок 33 – Микроструктура металла сварных соединений сплава 1565ч,
толщиной 7 мм:

а, б – АрДС с применением СвАМг61, в, г – ИДСПЭ с применением СвАМг61,
д, е – АрДС с применением Св1597; ж, з – СТП; ($\times 200$).

Металл шва, выполненный присадочными материалами СвАМг5 и СвАМг61 способами АрДС и ИДСПЭ, представляет собой однотипную для обоих сплавов литую кристаллическую структуру дендритного строения. Выделения упрочняющей фазы различной степени дисперсности расположены внутри вытянутых кристаллитов и по их границам, не сливающимися в сплошную сетку (рисунок 33, а, в), что свидетельствует об отсутствии перегревов в процессе сварки.

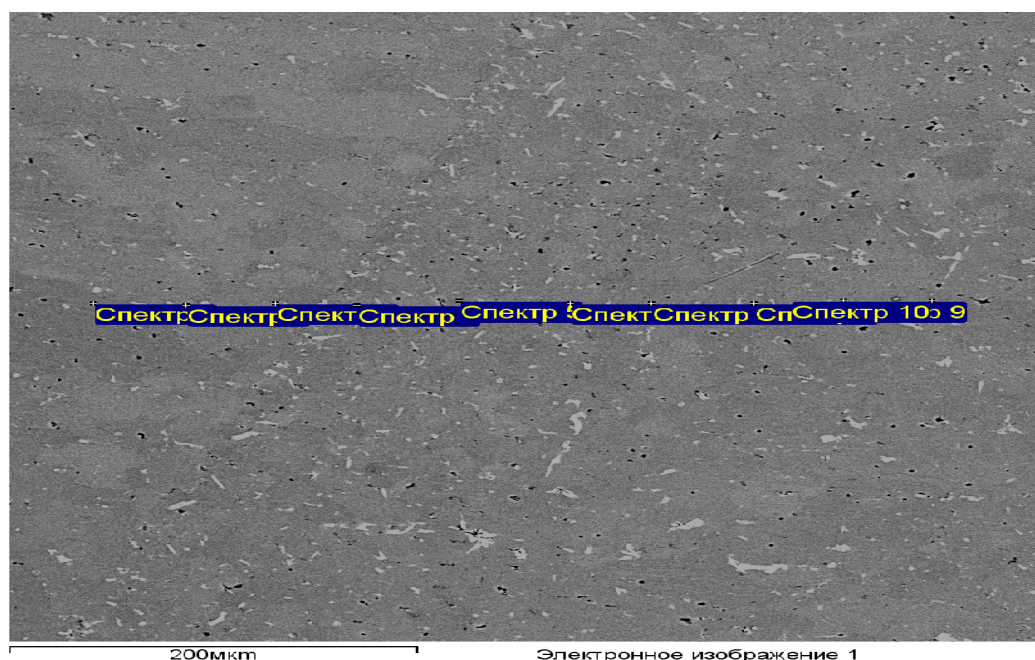
Металл шва, выполненный скандийсодержащим присадочным материалом Св1597, характеризуется наличием однородной мелкозернистой структуры (рисунок 26, д), сформировавшейся в процессе кристаллизации. Выделения частиц упрочняющей фазы (типа Al_3Sc) хаотично расположены по границам зерен, а также распределены в теле зерна в виде включений. Мелкозернистая структура металла шва, содержащего скандий, предполагает достижение более высоких прочностных свойств сварных соединений из сплавов Al-6%Mg, выполненных сваркой плавлением [118].

Наиболее благоприятная структура, с точки зрения формирования высоких прочностных свойств металла шва, достигается в сварном соединении, выполненном СТП. Здесь металл шва характеризуется мелкодисперсными равноосными зернами, границы которых обозначены отдельными, не сливающимися в сплошную сетку выделениями упрочняющей фазы (рисунок 33, ж), образовавшимися в результате динамической рекристаллизации [100].

Зона сплавления – переходная область от основного металла, претерпевшего нагрева вблизи температуры плавления, к литому металлу шва. Эта область шириной от 100 до 300 мкм характеризуется химической, структурной неоднородностью и включает в себя оплавленные зерна основного металла, являвшихся центрами кристаллизации расплавленного металла сварочной ванны, а также кристаллиты металла периферийной части шва. 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, выполненном сваркой плавлением (рисунок 33, б, г, е) [17].

Известно, что скандий – сильный модификатор литой структуры сплавов алюминия, т.е. он существенно влияет на измельчение структуры литого металла, увеличивая тем самым прочность. При содержании скандия в шве около 0,25% происходит переход от дендритной к субдендритной форме кристаллизации металла. При более высоком содержании скандия (до 0,5%) структура металла шва может быть полностью субдендритной [107, 108].

Распределение скандия по сечению сварного соединения (металл шва, металл околошовной зоны), изучали при микрорентгеноспектральном анализе (МРСА) химической неоднородности металла сварного соединения сплава 1565ч, выполненного АрДС с присадочным материалом Св1597 (0,39% Sc). Результаты исследований представлены на рисунке 34.



Спектр	Химический элемент, мас. %					
	Al	Mg	Mn	Sc	Zn	Si
Спектр 1	93.15	5.57	0.04	0.40	0.63	0.21
Спектр 2	91.17	7.61	0.11	0.36	0.57	0.17
Спектр 3	94.02	4.80	0.05	0.32	0.68	0.13
Спектр 4	93.00	5.83	0.06	0.32	0.61	0.17
Спектр 5	93.20	5.75	0.06	0.15	0.51	0.35
Спектр 6	92.68	6.19	0.03	0.13	0.76	0.21
Спектр 7	93.16	5.80	0.03	0.11	0.50	0.41
Спектр 8	92.83	6.06	0.11	0.05	0.52	0.43
Спектр 9	93.27	5.88	0.12	0.01	0.35	0.38
Спектр 10	91.36	7.54	0.07	0.00	0.37	0.70

Рисунок 34 – Сканеграмма ($\times 250$) распределения скандия в металле шва и околошовной зоне.

По результатам исследований построена диаграмма распределения скандия в металле сварного соединения, на которой можно видеть, что скандий присутствует не только в металле шва и зоны сплавления, но и в высокотемпературной околосшовной зоне, при этом область с монотонно уменьшающимися значениями скандия составляет 200–250 мкм (рисунок 35).

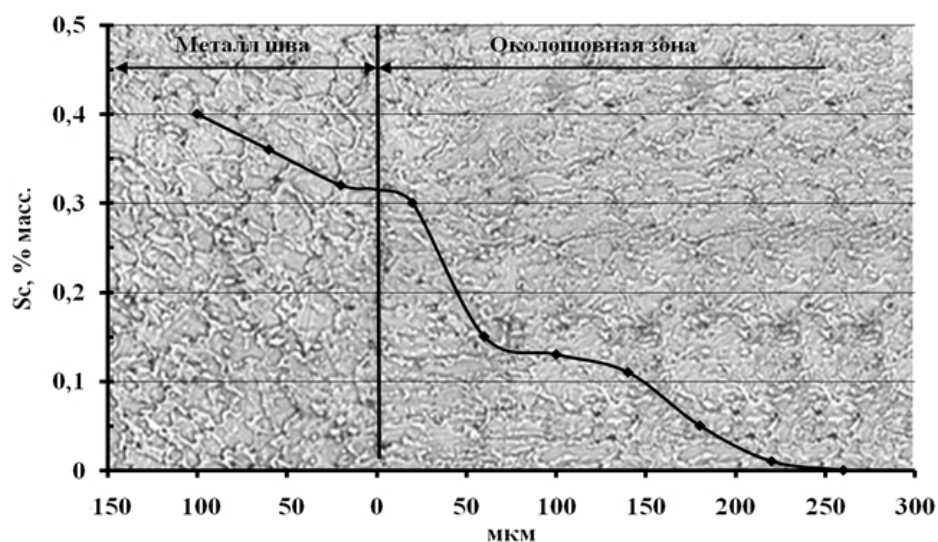


Рисунок 35 – Распределение скандия в металле шва и околосшовной зоне, в сварном соединении сплава 1565ч, выполненного с присадочным материалом Св1597, где

◆ – экспериментальные значения.

Следует отметить, что упрочняющее влияние скандия в металле шва, зоне сплавления и околосшовной зоне будет в целом способствовать повышению прочностных свойств сварного соединения сплава 1565ч, выполненного сваркой плавлением.

Зона термического влияния в сварном соединении сплава 1565ч, выполненного способами сварки плавлением, характеризуется металлом, структура которого отличается от исходной деформированной структуры основного металла, сформировавшейся под воздействием термического цикла сварки, ростом зерна, полным или частичным снятием эффекта предшествующей обработки (рисунок 33, б, г, е). Протяженность области с рекристаллизованной структурой металла (увеличенный размер зерна) составляет 1,5–2,5 мм от границы соединения со швом.

4.1.2 Оценка неоднородности свойств металла сварных соединений

Сравнительную оценку неоднородности свойств металла шва, металла зоны термического влияния и основного металла выполняли по результатам распределения твердости по Виккерсу по ГОСТ 2999, ГОСТ 6996 в поперечном сечении сварных соединений алюминиево-магниевых сплавов 1550 и 1565ч. Измерения проводили на образцах с полированной поверхностью.

Результаты испытаний представлены на рисунках 36 и 37.

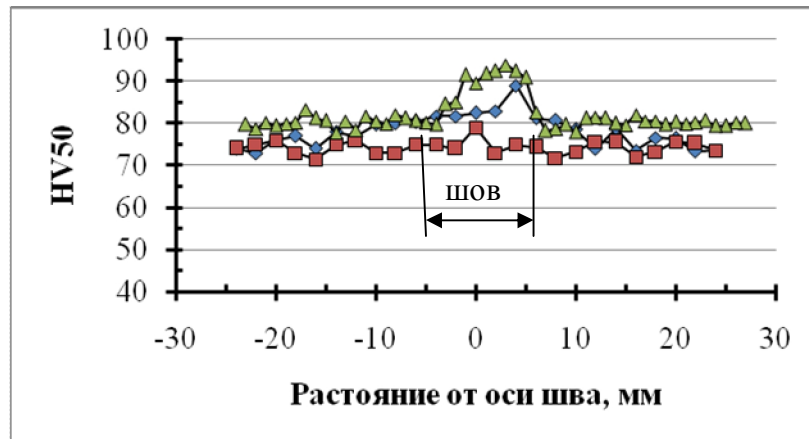


Рисунок 36 – Распределение твердости в поперечном сечении сварных соединений листовых полуфабрикатов сплава 1550, толщиной 5 мм, выполненных: ■ – АрДС и ◆ – ИДСПЭ присадочным материалом СвАМг5; ▲ – СТП.

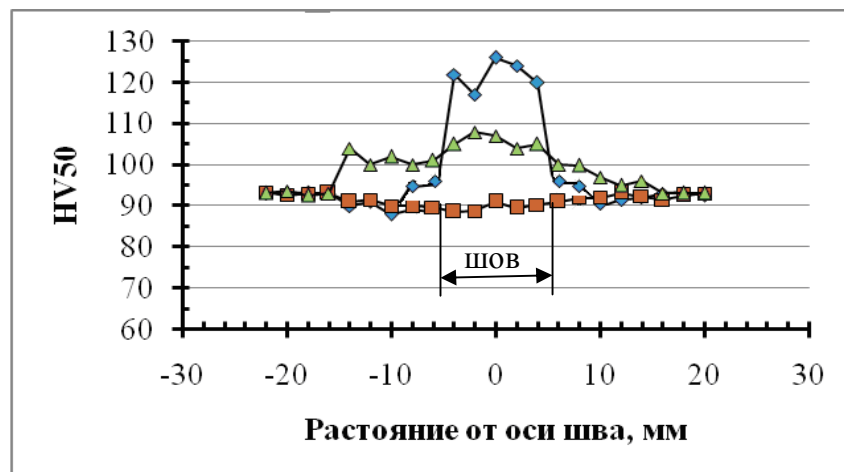


Рисунок 37 – Распределение твердости в поперечном сечении сварных соединений листовых полуфабрикатов сплава 1565ч, толщиной 7 мм, выполненных: ■ – АрДС с присадочным материалом СвАМг61; ◆ – АрДС с присадочным материалом Св1597; ▲ – СТП толщиной 10 мм.

Анализ распределения твердости металла шва и зоны термического влияния в сварных соединениях термически неупрочняемого алюминиево-магниевого

сплава 1550 показал, что способ сварки плавлением (АрДС или ИДСПЭ) оказывает незначительное влияние на изменение свойств основного металла. Различия на сопоставимых участках не превышают 10% (рисунок 36). При этом значения твердости металла шва и зоны термического влияния несколько выше в сварных соединениях выполненных сваркой плавящимся электродом.

Твердость металла сварных соединений, выполненных СТП, в области термомеханического влияния (определяется шириной уступа сварочного инструмента) и металла шва на 8–12% выше твердости основного металла (рисунок 36).

Для сварных соединений сплава 1565ч, выполненных АрДС скандийсодержащим присадочным материалом Св1597 и сваркой в твердой фазе СТП (рисунок 37), твердость металла шва на 20–30% выше твердости основного металла и на 30–40% выше твердости металла шва, выполненного АрДС с присадкой СвАМг61. Подобная зависимость позволяет ожидать достижения прочности рассмотренных сварных соединений сплава 1565ч, выполненных АрДС с применением Св1597 и СТП, на уровне свойств основного металла.

4.1.3 Прочность сварных соединений при растяжении

Целью исследования настоящего раздела является качественная оценка влияния температуры испытаний, состава присадочного материала, способа сварки (плавлением или в твердой фазе), конструктивно-технологического оформления шва на прочность сварных соединений алюминий-магниевого сплава 1565ч и 1550; установление зависимости механических свойств сварных соединений от влияния конструктивных и технологических факторов сварки.

Результаты испытаний сварных соединений приведены в таблице 26.

Таблица 26 – Результаты испытаний образцов сварных соединений на статическое растяжение

Марка сплава	Способ сварки/марка присадки	Тип образца	Температура испытаний, К	σ_b , МПа мин.-макс. сред.	Место разрушения
1550 5 мм	-	Основной металл	293	<u>312-315</u> 313	–
			108	<u>401-415</u> 410	–
	АрДС/ СвАМг5	С усилением шва	293	<u>303-311</u> 308	Основной металл
			108	<u>377-388</u> 381	Граница сплавления
		Со снятым усилением шва	293	<u>265-300</u> 288	Металл шва
			108	<u>372-378</u> 375	Металл шва
1565ч 7 мм	-	Основной металл	293	<u>371-375</u> 373	–
			108	<u>472-483</u> 476	–
	АрДС/ СвАМг61	С усилением шва	293	<u>336-375</u> 363	Основной металл
			108	<u>360-386</u> 370	Граница сплавления
		Со снятым усилением шва	293	<u>330-349</u> 336	Металл шва
			108	<u>324-365</u> 350	Металл шва

Сравнительный анализ полученных экспериментальных данных для каждого из сплавов выполнен по усредненным значениям результатов испытаний минимум трех образцов каждой серии, в зависимости от конструктивного оформления сварного шва и температуры испытаний (рисунок 38).

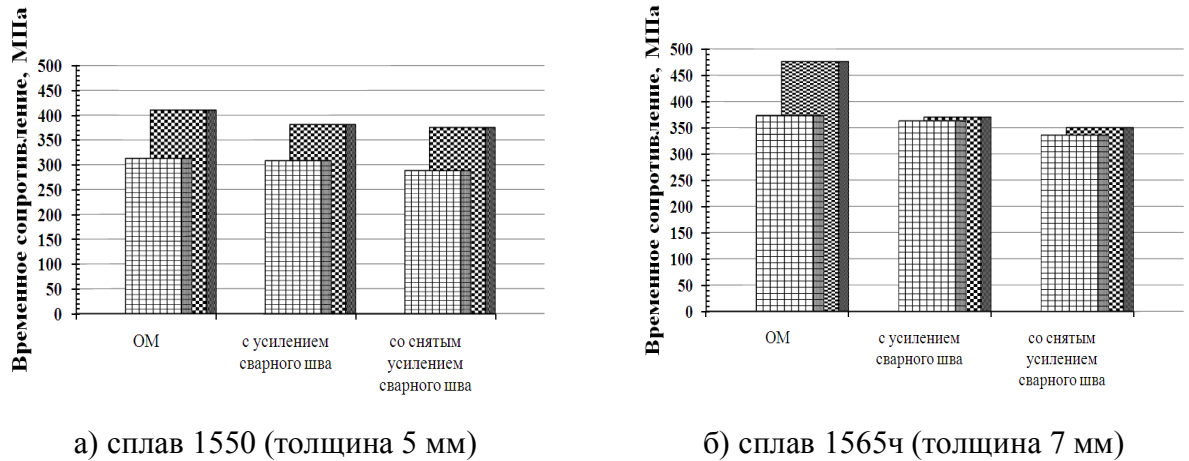


Рисунок 38 – Прочность сварных соединений алюминиевых сплавов, выполненных АрДС, в зависимости от температуры испытания, где:

▣ – температура испытания 108 К; ▤ – температура испытания 293 К.

При сварке плавлением алюминиево-магниевого сплава применение присадочного материала, близкого по химическому составу свариваемому основному металлу, не всегда позволяет получить сварные соединения с коэффициентом прочности при криогенной температуре равным коэффициенту прочности при комнатной температуре [17].

Как свидетельствуют результаты испытаний (рисунок 38, а), с понижением температуры до криогенных, изменение прочности (σ_b^{CB}) сварных соединений сплава марки 1550, как со снятым усилением шва, так и с усилением шва, происходит аналогично основному металлу, практически с тем же темпом роста, при этом остается ниже прочности основного металла (σ_b^{OM}). Коэффициент прочности сварных соединений сплава марки 1550, испытанных при комнатной и криогенной температуре (108 К), составляет не менее 0,9 от прочности основного металла. Можно заключить, что прочность основного металла с понижением температуры испытаний эффективно реализуется в сварных соединениях сплава 1550, выполненных с применением присадочного материала той же категории (СвАМг5), что и сплав 1550.

Таким образом, установлено, что введение дополнительных конструктивных или технологических факторов, направленных на повышение механических свойств сварных соединений сплава 1550 при криогенных температурах, не требуется.

В отличие от поведения сварных соединений сплава 1550 прочность сварных соединений сплава 1565ч при низких температурах находится практически на одном уровне, соответствующем прочности при комнатной температуре (рисунок 38, б). Коэффициент прочности сварных соединений со снятым усилением сварного шва и с усилением сварного шва сплава марки 1565ч, испытанных при комнатной температуре и при 108 К, составляет, соответственно, 0,9 и 0,8 от прочности основного металла.

По результатам испытаний можно заключить, что сварные соединения сплава 1565ч не характеризуются низкотемпературным упрочнением, присущим основному металлу, т.е. свойства основного металла в полной мере не реализуются в сварных соединениях.

Статистическая обработка результатов испытаний сварных соединений, выполненных АрДС, посредством дисперсионного анализа подтвердила, что с вероятностью 95% можно утверждать о значимости влияния температуры испытаний на прочность сварных соединений сплава 1550 и менее существенном влиянии температуры испытаний на прочность сварных соединений сплава 1565ч (таблица 27). Возникает необходимость разработки дополнительных конструктивных или технологических приемов, направленных на повышение механических свойств сварных соединений сплава 1565ч при криогенных температурах до уровня не менее 0,9 от прочности основного металла.

Т а б л и ц а 27 – Результаты дисперсионного анализа влияния температуры испытаний на прочность сварных соединений, выполненных АрДС

Марка сплава	Тип образца	Температура испытаний, К	Среднее значение временного сопротивления, МПа	Стандартное отклонение (СКО), МПа	Расчетный критерий Фишера, F	Критическое значение критерия Фишера, F _{крит.} при α=0,05
1550 5 мм	С усилением шва	293	307	4,1	334,2	7,7
		108	381	5,6	Нулевая гипотеза не принимается	
	Со снятым усилением шва	293	288	19,6	57,2	7,7
		108	375	3,0	Нулевая гипотеза не принимается	
1565ч 7 мм	С усилением шва	293	363	15,5	0,7	5,3
		108	370	11,1	Нулевая гипотеза принимается	
	Со снятым усилением шва	293	335	7,7	1,7	5,9
		108	344	22,3	Нулевая гипотеза принимается	
Нулевая гипотеза – температура испытания не влияет на прочность сварных соединений (F<F_{крит.})						

4.1.4 Анализ влияния конструктивных и технологических факторов сварки на механические свойства сварных соединений

Влияние конструктивных и технологических факторов сварки (способа сварки, состава присадочного материала и конструктивного оформления шва) на механические свойства сварных соединений алюминиевых сплавов [17] оценивали по достигаемому в них уровню прочности сварного соединения – коэффициенту прочности $K_{пр.}$. Коэффициент прочности сварных соединений определяется как отношение временного сопротивления сварного соединения к временному сопротивлению свариваемого основного металла: $K_{пр.} = \sigma_{в св.Т} / \sigma_{в ом Т}$, по результатам испытаний, представленным в таблицах 26 и 28.

Таблица 28 – Результаты испытаний сварных образцов на статическое растяжение

Марка сплава	Способ сварки/марка присадки	Тип образца	Температура испытаний, К	σ_b , МПа мин.-макс. сред.	Место разрушения
1550 5 мм	ИДСПЭ/ СвАМг5	С усилением шва	293	<u>286-307</u> 300	Основной металл
			108	<u>361-393</u> 375	Граница сплавления
		Со снятым усилением шва	293	<u>272-285</u> 279	Металл шва
			108	<u>362-384</u> 369	Металл шва
	СТП	Без усиления шва	293	<u>321-325</u> 324	Граница сплавления
			108	<u>390-400</u> 394	Основной металл
1565ч 7 мм	АрДС/ СвАМг61	С конструктивно-технологическим оформлением шва	293	<u>353-370</u> 364	Основной металл
			108	<u>415-431</u> 422	Граница сплавления
	АрДС/ Св1597	С усилением шва	293	<u>366-373</u> 368	Основной металл
			108	<u>431-465</u> 445	Основной металл
		Со снятым усилением шва	293	<u>360-370</u> 367	Основной металл
			108	<u>422-476</u> 450	Основной металл
	СТП	Без усиления шва	293	<u>361-367</u> 363	Основной металл
			108	<u>453-455</u> 454	Основной металл

Оценка коэффициента прочности сварных соединений для сплава 1550 в зависимости от способа сварки и типа оформления шва показала, что при комнатной температуре прочность сварных соединений, выполненных сваркой плавлением, находится практически на одном уровне и составляет не менее 0,9 от фактической прочности основного металла. Сварные соединения с усилением сварного шва имеют коэффициент прочности $K_{пр.} = 0,95$. При СТП происходит упрочнение металла шва и сварного соединения в целом, при этом прочность сварных соединений составляет 1,0 от прочности основного металла.

С понижением температуры испытаний сварные соединения сплава 1550 проявляют тенденцию к низкотемпературному упрочнению аналогично основному

металлу, так при температуре 108 К коэффициент прочности составляет не менее 0,9 от прочности основного металла при этой же температуре, независимо от способа сварки. То есть в сварных соединениях сплава 1550 практически в полной мере реализуются прочностные свойства основного металла во всем диапазоне исследуемых температур, что согласуется с результатами [41].

Анализ изменения коэффициента прочности для сварных соединений сплава 1565ч в зависимости от способа сварки, состава присадочного материала, типа оформления шва и температуры испытаний, показал следующее. При комнатной температуре прочность сварных соединений сплава 1565ч, выполненных сваркой плавлением, находится практически на одном уровне и составляет не менее 0,9 от прочности основного металла. Использование в качестве присадочного материала алюминиевой проволоки со скандием Св1597, применение способа СТП или конструктивно-технологического оформления шва наплавкой валиков позволяет повысить значения $K_{пр}$ до 0,97–0,99.

При криогенной температуре сварные соединения сплава 1565ч, выполненные сваркой плавлением с применением присадочного материала СвАМг61, не проявляют эффекта низкотемпературного упрочнения – при 108 К коэффициент прочности ($K_{пр}$) составляет не менее 0,8 от прочности основного металла, при этом значения временного сопротивления не ниже значений, полученных при комнатной температуре.

Повышение при криогенной температуре прочности сварных соединений сплава 1565ч до уровня не менее 0,9 от прочности основного металла, достигается [17]:

- 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 концентратора напряжений геометрического происхождения (в месте перехода от металла шва к основному металлу);

- формированием в металле шва и зоны сплавления мелкозернистой структуры за счет использования в качестве присадочного материала алюминиевой проволоки с содержанием скандия от 0,36–0,5% (Св1597) или экономнолегированной до 0,25% Sc проволоки [119];

– формированием в металле шва мелкозернистой структуры благодаря применению способа сварки в твердой фазе (СТП) [100].

Разрушение сварных соединений сплавов 1565ч и 1550, выполненных сваркой плавлением с применением сварочной проволоки СвАМг61 и СвАМг5, соответственно, при комнатной температуре происходит по металлу шва в образцах со снятым усилением сварного шва; по основному металлу в образцах с усилением сварного шва или с конструктивно-технологическим оформлением шва (рисунок 39).

Разрушение сварных соединений сплава 1565ч, выполненных присадочным материалом Св1597, независимо от типа образца (с усилением сварного шва или со снятым усилением сварного шва) происходит по основному металлу (рисунок 39).

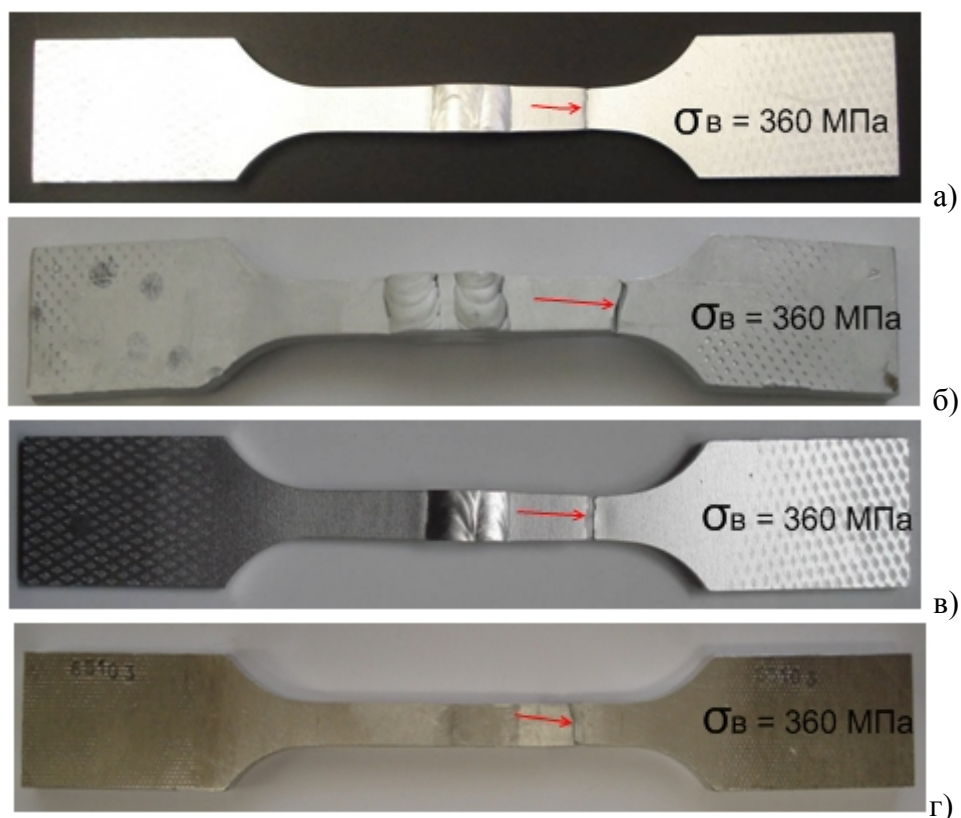


Рисунок 39 – Образцы сварных соединений сплава 1565ч после испытаний при комнатной температуре:

- а – с усилением сварного шва, присадочный материал СвАМг61;
- б – с конструктивно-технологическим оформлением шва, присадочный материал СвАМг61;
- в – с усилением сварного шва, присадочный материал Св1597;
- г – сварка трением с перемешиванием.

При криогенной температуре испытания (108 К) разрушение сварных соединений сплава 1565ч и 1550, выполненных сваркой плавлением, происходит

преимущественно в зоне сплавления (рисунок 40), вероятно, в связи с более значимым влиянием при криогенной температуре геометрического концентратора напряжений, обусловленного переходом между усилением металла шва и основным металлом.

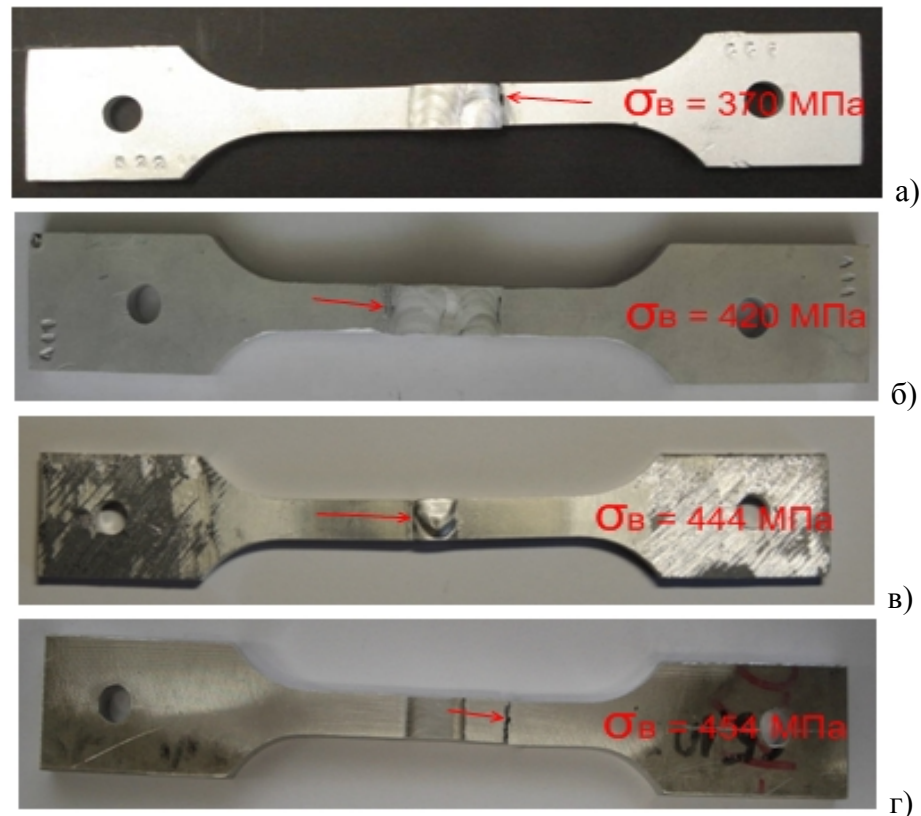


Рисунок 40 – Образцы сварных соединений сплава 1565ч после испытаний при криогенной температуре (108 К):

- а – с усилением сварного шва, присадочный материал СвАМг61;
- б – с конструктивно-технологическим оформлением шва, присадочный материал СвАМг61;
- в – с усилением сварного шва, присадочный материал Св1597;
- г – сварка трением с перемешиванием.

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

Роль и значимость конструктивных и технологических факторов в повышении прочностных свойств сварных соединений сплава 1565ч при криогенных температурах продемонстрирована диаграммой (рисунок 41) со сравнительной оценкой достигаемого уровня прочности в зависимости от рассмотренных вариантов выполнения сварки.

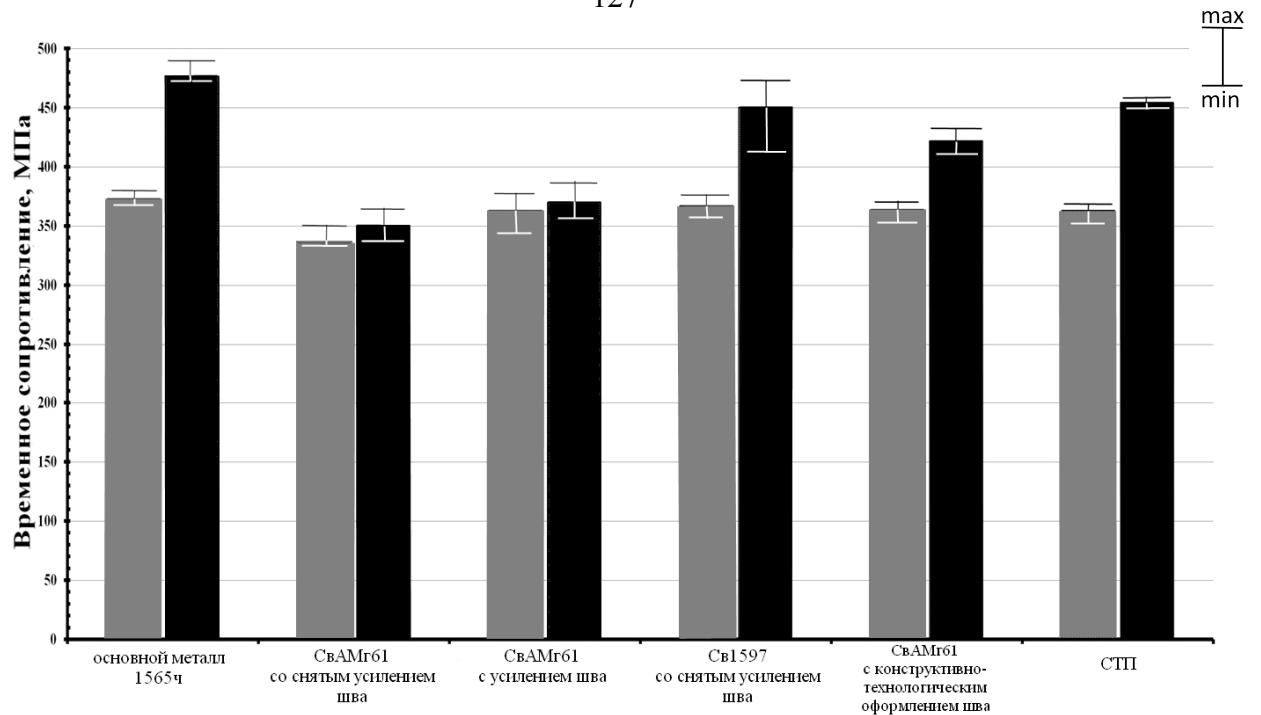


Рисунок 41 – Прочность образцов сварных соединений сплава 1565ч, выполненных АрДС с использованием СвАМг61 и Св1597, и СТП.

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

На представленной диаграмме можно оценить степень влияния конструктивных факторов сварки на повышение прочности сварных соединений сплава 1565ч при криогенной температуре (108 К) следующим образом:

- ~10 % за счет оформления шва усилением;
- ~30 % благодаря конструктивно-технологическому оформлению шва с усилением, дополнительной наплавкой валиков по границе сплавления шва с основным металлом;
- ~36 % обеспечивает применение присадочного материала со скандием;
- ~36 % обеспечивает применение способа сварки в твердой фазе (СТП).

4.1.5 Испытания на ударный изгиб

Испытания при комнатной и криогенной температурах проведены с целью проведения сравнительного анализа вязкости металла в различных зонах сварных соединений выполненных АрДС, ИДСПЭ и СТП.

Результаты испытаний приведены в таблице 29.

Т а б л и ц а 29 – Ударная вязкость металла различных зон сварных соединений
алюминиевых сплавов марок 1550 и 1565ч

Марка сплава	Толщина, мм	Способ сварки/присадочный материал	Температура испытания, К	Вязкость КСУ, Дж/см ² <u>min-max</u> среднее			
				Металл шва	Граница сплавления	Зона термического влияния	Основной металл
1550	5	АрДС/ СвАМг5	293	<u>20,0-26,8</u> 23,1	<u>18,4-30,4</u> 24,1	<u>29,9-33,4</u> 31,6	<u>29,3-31,5</u> 30,3
			108	<u>12,3-17,1</u> 15,5	<u>11,7-28,6</u> 19,8	<u>30,4-32,7</u> 31,3	<u>26,9-31,1</u> 29,7
		ИДСПЭ/ СвАМг5	293	<u>18,0-22,4</u> 19,5	<u>21,0-32,4</u> 27,1	<u>28,1-31,9</u> 30,1	<u>29,3-31,5</u> 30,3
			108	<u>12,0-14,7</u> 12,9	<u>14,8-32,2</u> 23,1	<u>29,5-32,0</u> 30,4	<u>26,9-31,1</u> 29,7
		СТП	293	<u>41,9-44,1</u> 42,8	<u>33,5-42,0</u> 37,9	<u>32,9-33,4</u> 31,1	<u>29,3-31,5</u> 30,3
			108	<u>42,8-43,8</u> 43,3	<u>25,3-30,2</u> 27,6	<u>32,9-33,4</u> 33,1	<u>26,9-31,1</u> 29,7
	10	АрДС/ СвАМг5	293	<u>22,8-30,6</u> 31,2	<u>25,6-32,0</u> 29,9	<u>36,7-38,1</u> 37,6	<u>33,8-37,5</u> 35,5
			108	<u>10,5-13,2</u> 11,9	<u>9,2-19,7</u> 14,1	<u>28,9-34,4</u> 31,0	<u>29,9-31,6</u> 30,5
		ИДСПЭ/ СвАМг5	293	<u>24,6-28,4</u> 26,3	<u>27,3-28,1</u> 27,7	<u>37,9-40,4</u> 39,2	<u>33,8-37,5</u> 35,5
			108	<u>14,9-19,4</u> 16,9	<u>13,4-19,5</u> 16,4	<u>30,9-33,1</u> 31,8	<u>29,9-31,6</u> 30,5
1565ч	7	АрДС/ СвАМг61	293	<u>30,7-40,2</u> 33,8	<u>33,0-42,0</u> 37,6	<u>33,4-37,8</u> 35,3	<u>27,0-35,3</u> 32,1
			108	<u>10,9-14,6</u> 12,1	<u>19,3-31,1</u> 23,6	<u>22,4-31,3</u> 27,8	<u>21,5-26,6</u> 24,4
		АрДС/ Св1597	293	<u>30,6-32,3</u> 31,2	-	-	<u>27,0-35,3</u> 32,1
			108	<u>16,0-17,5</u> 16,9	-	-	<u>21,5-26,6</u> 24,4
	10	СТП	293	<u>64,3-69,7</u> 67,4	<u>36,8-42,8</u> 39,1	<u>32,3-35,6</u> 34,4	<u>33,9-37,2</u> 36,4
			108	<u>42,8-47,0</u> 44,6	<u>19,4-27,1</u> 22,9	<u>19,5-30,4</u> 24,1	<u>22,3-29,5</u> 26,4
		ИДСПЭ/ СвАМг61	293	<u>21,4-27,0</u> 23,9	<u>29,1-31,8</u> 30,3	<u>29,4-31,7</u> 30,3	<u>33,9-37,2</u> 36,4
			108	<u>9,0-9,5</u> 9,2	<u>16,3-27,9</u> 21,1	<u>19,3-23,5</u> 21,3	<u>22,3-29,5</u> 26,4

Испытания на ударный изгиб показали, что сварные соединения обоих сплавов, выполненные сваркой плавлением, имеют общую закономерность изменения значений ударной вязкости в зависимости от места расположения надреза и температуры испытаний, снижение которой приводит к монотонному уменьшению величины ударной вязкости металла на всех участках, включая основной металл (рисунок 42).

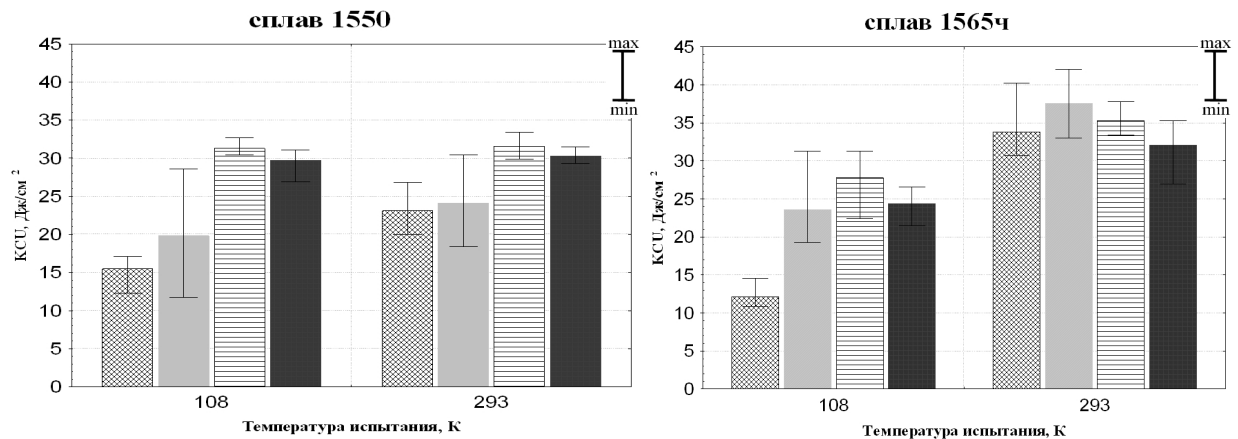


Рисунок 42 – Ударная вязкость сварных соединений сплавов 1565ч толщиной 7 мм и 1550 толщиной 5 мм выполненных АрДС, где:

▨ – металл шва; ■ – граница сплавления; ▤ – зона термического влияния;
 ■ – основной металл.

Для сварных соединений сплава 1565ч значения ударной вязкости, независимо от места надреза, способа сварки и температуры испытаний, выше, чем у сварных соединений сплава 1550. При этом в металле сварных соединений сплава 1565ч при криогенной температуре происходит более существенное снижение ударной вязкости на всех исследуемых участках в зависимости от структуры металла: основной металл, металл ЗТВ и по границе сплавления на ~30%, металл шва на 60% от значений, полученных при комнатной температуре.

Для сварных соединений сплава 1550 снижение ударной вязкости при криогенной температуре составляет: основной металл, металл ЗТВ и по границе сплавления на ~10%, металл шва до 40% от значений, полученных при комнатной температуре.

Для обоих сплавов наиболее существенными отличиями характеризуется вязкость металла шва, выполненного различными вариантами сварки (плавлением

или СТП): наименьшие значения соответствуют способу ИДСПЭ, наибольшие – СТП.

При комнатной и криогенной температурах морфология излома образцов имела ямочное строение, типичное при вязком разрушении (рисунок 43).

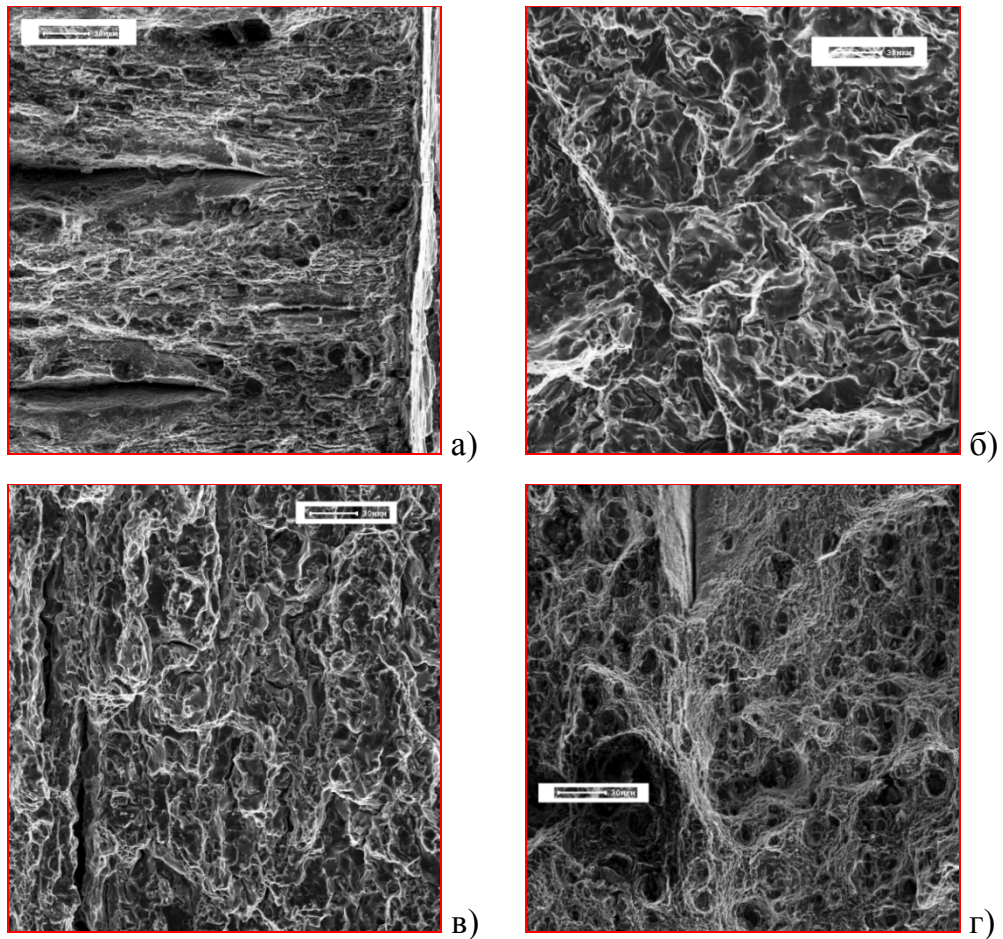


Рисунок 43 – Фрактуры изломов при температуре 108 К: а – основной металл; б – металл шва; в – зона сплавления; г – зона термического влияния.

Выводы по главе 4

1. Изготовлены сварные пробы из листовых полуфабрикатов сплавов марок 1550 и 1565ч с применением способов АрДС, ИДСПЭ и СТП. Проведен анализ влияния конструктивных и технологических факторов сварки плавлением на качество сварных соединений алюминиевых сплавов.

2. Анализ макроструктуры показал, что в сварных соединениях отсутствуют непровары, трещины, поры, инородные включения. Металл шва представляет собой характерную для алюминиево-магниевого сплава литую кристаллическую структуру дендритного строения.

3. Анализ результатов испытаний сварных соединений на статическое растяжение показал, что в сварных соединениях сплава 1550, выполненных с применением присадочного материала СвАМг5, реализуются прочностные свойства основного металла с достижением коэффициента прочности не менее 0,9 от прочности основного металла, в том числе при криогенной температуре.

4. Сварные соединения сплава 1565ч, выполненные сваркой плавлением с применением присадочного материала СвАМг61, не проявляют склонности к низкотемпературному упрочнению в отличие от основного материала. При криогенной температуре прочность сварных соединений остается на уровне, соответствующем прочности при комнатной температуре.

5. Исследование влияния конструктивных и технологических факторов сварки на прочность сварных соединений сплава 1565ч при криогенной температуре позволило определить их роль и значимость в повышении прочности сварных соединений:

- формирование выпуклости сварного шва дает повышение прочности на ~10 %, по сравнению с соединениями со снятым усилением сварного шва;
- конструктивно-технологическое оформление шва дает повышение прочности на ~30 %;
- применение в качестве присадочного материала алюминиевой проволоки со скандием или способа сварки в твердой фазе (СТП) дают примерно одинаковое повышение прочности на ~36%.

6. Сварные соединения сплавов 1550 и 1565ч имеют общую закономерность изменения ударной вязкости в зависимости от места расположения надреза и

температуры испытаний – при криогенной температуре происходит равномерное снижение значений ударной вязкости металла во всех зонах сварных соединений. Наиболее существенными отличиями характеризуется вязкость металла шва, выполненного различными способами сварки (плавлением или СТП). 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.

Глава 5. Разработка технологии сварки стыковых соединений из деформируемых алюминиево-магниевых сплавов 1565ч и 1550.

Свойства сварных стыковых соединений полуфабрикатов из сплавов 1565ч и 1550 в отожженном состоянии

На базе проведенных экспериментальных исследований механических свойств сварных соединений из алюминиевых сплавов 1565ч и 1550 в отожженном состоянии при комнатной и криогенной температурах, установления уровня и характера низкотемпературного упрочнения, оценки зависимости свойств от влияния конструктивных и технологических факторов сварки выполнен обоснованный выбор сварочных материалов, разработаны технологии сварки плавлением в защитных газах и предложения для включения в Правила РМРС требований к сварным соединениям деформируемых алюминиевых сплавов 1565ч и 1550, применяемых в системах хранения груза газозовозов.

5.1 Разработка технологии сварки стыковых соединений алюминиево-магниевых полуфабрикатов сплавов марок 1565ч и 1550

Разработка технологии сварки алюминиево-магниевых полуфабрикатов сплавов марок 1565ч и 1550, впервые допущенных к применению в системах хранения груза газозовозов, выполнена применительно к двум наиболее применяемым технологическим процессам сварки плавлением в защитных газах – ручная аргонодуговая сварка неплавящимся (вольфрамовым) электродом (АрДС) и механизированная (полуавтоматическая) импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом в среде аргона (ИДСПЭ).

В соответствии с требованиями существующей нормативной документации на сварку алюминиевого сплава 1550 (ГОСТ 14806, ОСТ5Р.9153), АрДС допускается применять для сварки полуфабрикаты толщиной от 2 до 40 мм. Нормативно-технической документации на сварку разработанного сплава 1565ч не существует. Следует отметить невысокую производительность процесса АрДС, что является существенным недостатком, особенно при сварке больших толщин. Кроме того, стабильность процесса АрДС, а, следовательно, и качество швов, во многом зависит от квалификации сварщика. В настоящей работе исследования свойств и оценка качества выполненных АрДС сварных соединений деформируемого алюминиевого сплава 1565ч показали, что при сварке

полуфабрикатов толщиной 20 мм и более увеличивается вероятность появления непровара в центральной части шва, межваликовых несплавлений, вольфрамовых включений в металле шва и смещение оси шва (рисунок 44).

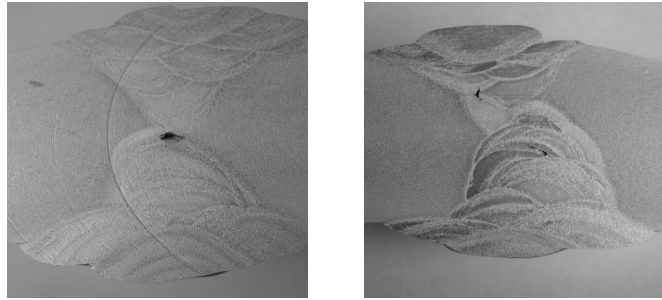


Рисунок 44 – Дефекты при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом (АрДС) полуфабрикатов из сплава 1565ч толщиной 20 мм.

Применение ИДСПЭ по существующей технологии для сплава 1550, допускается для толщин от 5 до 20 мм. Выполнение сварных соединений из алюминиевых сплавов толщиной свыше 20 мм многопроходными швами ИДСПЭ с использованием конструктивных элементов подготовки свариваемых кромок, регламентированных ГОСТ 14806, в частности для соединения типа С26, не позволило достичь качественного формирования швов. Образцы сварных соединений полуфабрикатов из сплава 1565ч при статическом растяжении разрушались по зоне сплавления и металлу шва (рисунок 45), что связано с недостаточной проработкой конструктивных и технологических решений при сварке больших толщин.

Анализ структуры металла шва выявил наличие микроскопических дефектов – несплавлений и пустот в центральной части шва, что объясняется неполным проваром подготовленных по стандарту свариваемых кромок при первом проходе на весу из-за большой величины притупления и малого радиуса закругления свариваемых кромок. Последующая механическая выборка металла в корне шва до «чистого металла» с формированием канавки симметрично оси шва не всегда исключала полное удаление сварочных дефектов.

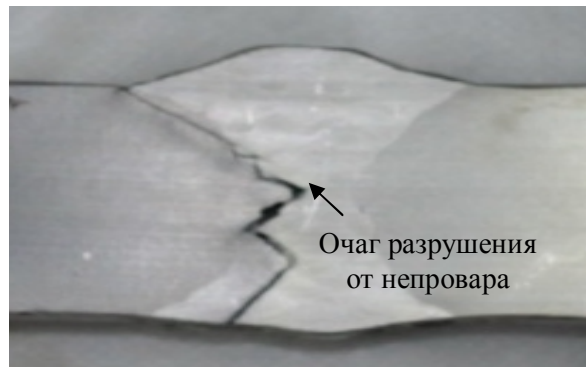


Рисунок 45 – Характер разрушения сварных соединений сплава 1565ч толщиной 40 мм, выполненных по существующей технологии.

Учитывая вышесказанное, в настоящей работе технология АрДС разрабатывалась для сварки полуфабрикатов толщиной от 5 до 10 мм; технология ИДСПЭ – полуфабрикатов толщиной от 20 до 80 мм.

Для обеспечения качественного формирования шва при многопроходной сварке был предложен и разработан комплекс следующих технических решений:

- для обеспечения полного и гарантированного провара при сварке сплавов 1565ч и 1550 больших толщин были подобраны следующие соотношения конструктивных элементов подготовки кромок свариваемых полуфабрикатов: радиус закругления $R=(0,30\div 0,50)S$, величина притупления $c=(0,05\div 0,10)S$, где S – толщина свариваемых кромок;

- гарантированное сплавление присадочного металла с основным металлом было обеспечено наклоном горелки под углом $15\text{--}45^\circ$ к скошенной поверхности свариваемых кромок;

- усиление сварного шва формировалось таким образом, чтобы расстояние от точки сопряжения наплавленного металла с основным металлом до края свариваемых кромок составляло $b=(0,10\div 0,40)S$ (см. рисунок 49), при этом, с увеличением толщины свариваемых полуфабрикатов выбирается меньшее значение для S (например, для $S=80$ мм – $b=0,1\times 80=8$; для $S=20$ мм – $b=0,4\times 20=8$).

Разработанный комплекс технических решений при сварке сплавов 1565ч и 1550 защищен патентом на изобретение № 2553769 «Способ импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом алюминиевых сплавов» [121] и обеспечил гарантированное качественное заполнение разделки свариваемых кромок многопроходными швами, исключение непроваров в центральной части шва,

максимальную реализацию статической прочности в сварных соединениях не менее 0,8–0,9 от прочности основного металла, в зависимости от толщины материала.

5.1.1 Основной и сварочный материалы. Подготовка материалов к сварке

В качестве основного металла использовали деформированные полуфабрикаты (листы и плиты) из алюминиево-магниевого сплава марок 1565ч и 1550 в отожженном состоянии.

Химический состав и механические свойства полуфабрикатов из сплавов марок 1565ч и 1550 представлен в таблицах 8 и 9, соответственно.

В качестве присадочного материала для сварки сплава марки 1550 использовали сварочную проволоку из сплава марки СвАМг5 по ГОСТ 7871, для сварки сплава марки 1565ч – СвАМг61 по ГОСТ 7871 и Св1597 по ТУ 1-809-1018. Химический состав присадочных материалов представлен в таблице 11.

Защитный газ – аргон высшего сорта по ГОСТ 10157.

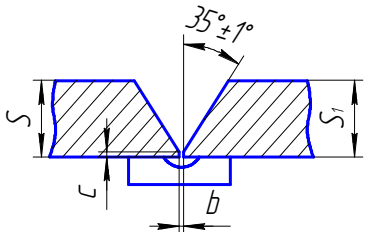
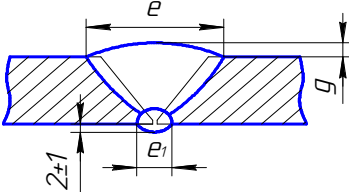
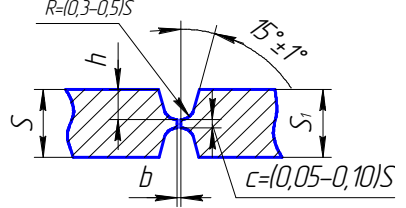
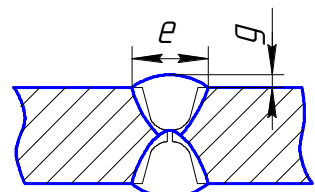
Подготовку кромок под сварку производили механическим способом. Непосредственно перед началом сварки свариваемые кромки деталей очищали механическим способом в соответствии с требованиями ОСТ5Р.9153 «Соединения сварные корпусных конструкций. Дуговая сварка алюминиевых сплавов в защитных газах. Основные положения».

Прутки присадочного материала для ручной аргонодуговой сварки неплавящимся электродом (АрДС) подвергались химическому способу очистки (травление) в соответствии с требованиями ОСТ5Р.9153.

Сварочная проволока, предназначенная для полуавтоматической сварки (ИДСПЭ), изготавливается с химически обработанной поверхностью в соответствии с требованиями ГОСТ 7871 и не требует дополнительной очистки.

Конструктивные элементы подготовленных под сварку кромок и сварного шва (таблица 30) назначены в соответствии с разработанными рекомендациями и с учетом требований ГОСТ 14806 и ОСТ5Р.9153.

Т а б л и ц а 30 – Конструктивные элементы подготовки кромок под сварку и сварного шва стыковых соединений алюминивно-магниевых сплавов марок 1565ч и 1550

Толщина S, мм	Условное обозначение сварного соединения	Конструктивные элементы		Размеры, мм							
		подготовленных кромок	сварного шва	S	b	c	R	h	e	e ₁	g
5-7	С18 (ГОСТ14806)			S=S ₁	0 ⁺²	1 ^{±1}	-	-	12 ^{±3}	10 ^{±2}	2 ^{±1}
10					0 ⁺²	1 ^{±1}	-	-	16 ^{±2}	10 ^{±2}	
20	Патент № 2553769			S=S ₁	2÷4	2 ⁺¹	10 ^{±1}	9 ^{±1}	25 ^{±3}	e ₁ =e	4 ^{±1}
40				S=S ₁	2÷5	2 ⁺¹	16 ^{±1}	19 ^{±1}	35 ^{±2}	e ₁ =e	5 ^{±2}
60				S=S ₁	2÷5	3 ⁺¹	18 ^{±1}	29 ^{±1}	50 ^{±2}	e ₁ =e	6 ^{±2}
80				S=S ₁	2÷5	4 ^{+0,5}	24 ^{±1}	38 ^{±1}	60 ^{±2}	e ₁ =e	6 ^{±2}

5.1.2 Выбор режима сварки

Критериями выбора параметров режима сварки являются показатели качества сварного соединения, к которым относятся:

- соответствие размеров швов (ширина, высота выпуклости сварного шва) требованиям чертежа и НТД;
- отсутствие недопустимых наружных дефектов на поверхности шва и прилегающей к нему зоне основного металла шириной не менее 20 мм;
- отсутствие недопустимых дефектов на поперечных макрошлифах сварных соединений;
- отсутствие в металле сварного соединения зон, содержащих структурные составляющие или примеси, потенциально опасные, с точки зрения работоспособности и статической прочности сварного соединения (хрупкие прослойки, сегрегации включений и т.п.), при контроле микрошлифов;
- прочность сварных соединений алюминиево-магниевых сплавов марок 1565ч и 1550 в отожженном состоянии, при испытании на статическое растяжение при комнатной температуре не менее 0,9 от гарантированной прочности основного металла;
- пластичность сварных соединений алюминиево-магниевых сплавов марок 1565ч и 1550 в отожженном состоянии, определяется углом изгиба при комнатной температуре, который должен составлять 180° при испытаниях на оправке диаметром, равном шести толщинам образца.

Варьируемыми параметрами режима сварки в процессе разработки технологии сварки являлись сварочный ток и средняя скорость сварки, значения которых выбирали таким образом, чтобы обеспечить расплавление присадочного и свариваемого металла и формирование шва достаточного сечения при минимальном воздействии термического цикла сварки на основной металл (таблица 13).

5.1.3 Основные технологические положения по сварке

Получение качественных сварных соединений полуфабрикатов из алюминиево-магниевых сплавов 1565ч и 1550, выполняемых многослойными

швами, обеспечивалось при соблюдении следующих основных требований ОСТ5Р.9153:

1. При сварке полуфабрикатов толщиной более 10 мм обязателен предварительный подогрев свариваемых кромок ацетилено-кислородным пламенем газовой горелки до температуры не выше 120°С для более легкого образования сварочной ванны и обеспечения проплавления свариваемых кромок.
2. Многопроходный шов выполнялся отдельными валиками последовательно один за другим с формированием каждого слоя в шве.
3. После сварки каждого валика производят его зачистку металлической щеткой от пылеобразного конденсата и возможных брызг металла.
4. Выполнение последующих валиков производят после охлаждения свариваемых деталей до температуры не выше 50°С.
5. При обрыве дуги в процессе сварки необходимо подрубить (инструментом без абразива) и зачистить металлической щеткой кратер шва и только после этого продолжать сварку, перекрывая кратер на длине не менее 10 мм.
6. Участки шва с порами, трещинами и раковинами необходимо удалять механически до выполнения сварки. При выборке дефектных участков механическим способом следует исключать образование узких и глубоких канавок; дно выборки должно иметь сферическую форму с радиусом закругления не менее 3 мм.

Кроме того, в процессе сварки выполнялись следующие требования:

1. Конструктивные элементы подготовки кромок выбирались в зависимости от толщины полуфабрикатов по следующим соотношениям: радиус закругления $R=(0,30\div 0,50)S$, величина притупления $c=(0,05\div 0,10)S$, где S – толщина свариваемых кромок. Благодаря чему при выполнении первого прохода на весу обеспечивали провар свариваемых кромок с образованием проплава шва не более 3 мм (рисунок 46 а, б). Первый проход выполняли строго по оси соединения без колебательных движений конца электрода.



а)



б)

Рисунок 46 – Сварное соединение сплава марки 1565ч толщиной 40 мм после первого прохода: а – лицевая поверхность шва; б – обратная сторона шва.

2. Каждый последующий валик в одном слое выполняли с ориентацией электрической дуги на границу сплавления предыдущего валика с целью повторного переплавления краевых участков шва, особенно граничащих со свариваемыми кромками.

3. Гарантированное сплавление металла шва с металлом свариваемых кромок и проплавлением основного металла на глубину не менее чем на 0,3 мм, обеспечивалось наклоном оси электрода под углом $15^\circ - 45^\circ$ к скошенной поверхности свариваемых кромок (рисунок 47).

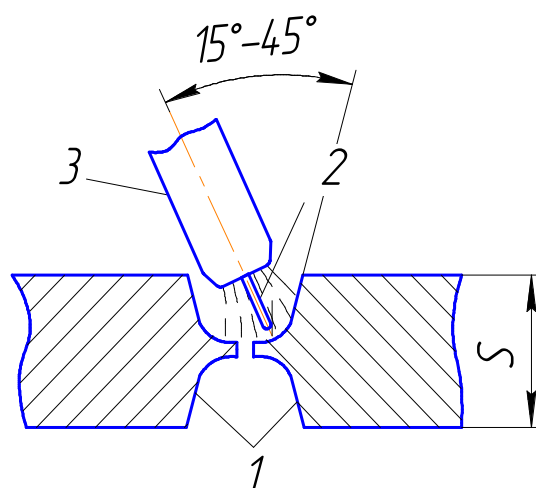


Рисунок 47 – Положение оси электрода при сварке плавящимся электродом:

1 – свариваемые детали; 2 – присадочный материал; 3 – сопло горелки.

4. При формировании выпуклости сварного шва крайние проходы выполняют таким образом, чтобы граница сплавления крайнего валика с поверхностью основного металла располагалась на расстоянии $(0,1 - 0,4) S$ (мм) от линии разделки свариваемой кромки, сформированной выполненным скосом.

5.1.4 Изготовление сварных проб

АрДС осуществлена на установке FALTIG-400 AC/DC, ИДСПЭ – на установке Multi 500KW.

Листовые полуфабрикаты толщиной 5, 7 и 10 мм размером 250×500 мм сваривали встык в нижнем положении с использованием сборочно-сварочной оснастки. Для обеспечения полного проплавления свариваемых кромок сварку осуществляли на съемной подкладке из коррозионно-стойкой стали с формирующей канавкой.

Сварка выполнялась в следующей последовательности:

- выполнение первого прохода с формированием корня шва;
- заполнение разделки и формирование выпуклости сварного шва с лицевой поверхности соединения.

Сварку полуфабрикатов толщиной 20, 40, 60, 80 мм выполнялась с обязательным предварительным подогревом свариваемых кромок ацетиленокислородным пламенем газовой горелки до температуры не выше 120°C в следующей последовательности:

- выполнение первого прохода с формированием проплава с обратной стороны соединения (высота проплава = max 5 мм);
- заполнение разделки на $\sim \frac{1}{2}$ с лицевой поверхности соединения;
- кантовка изделия на 180° и механическая обработка корня шва – удаление проплава;
- заполнение разделки на $\sim \frac{1}{2}$ с обратной поверхности соединения;
- кантовка изделия на 180° окончательное заполнение разделки и формирование выпуклости сварного шва с лицевой стороны;
- кантовка изделия на 180° окончательное заполнение разделки и формирование выпуклости сварного шва с обратной стороны соединения.

Поэтапное выполнение многопроходных швов с соблюдением разработанных конструктивных и технологических решений при сварке

толстолистовых полуфабрикатов алюминиево-магниевого сплава марок 1550 и 1565ч представлено на рисунке 48.

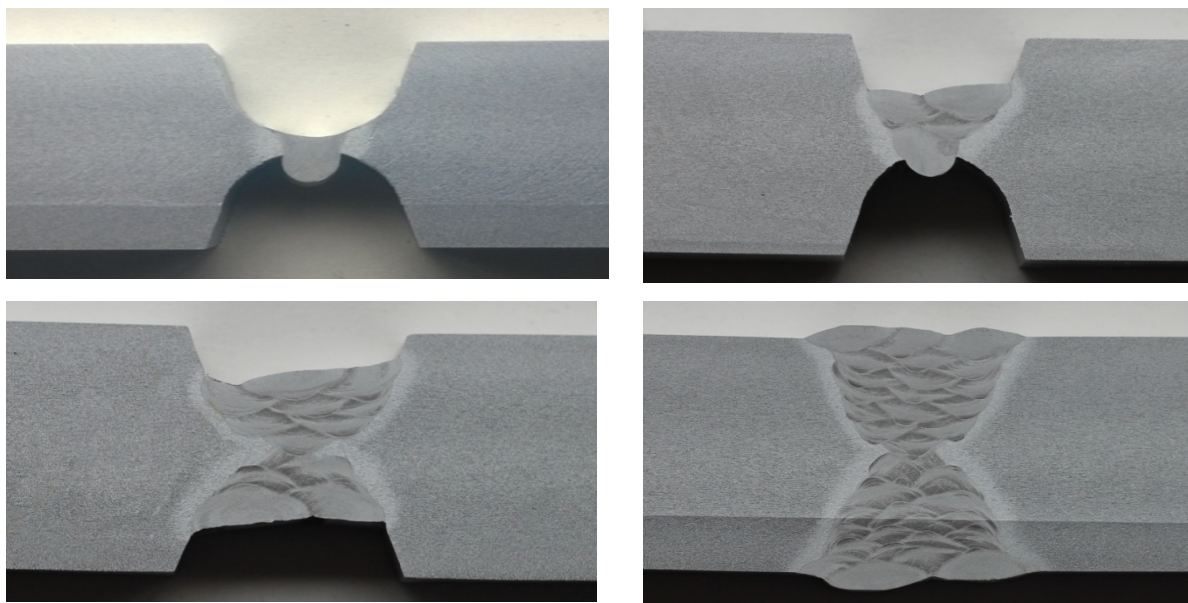
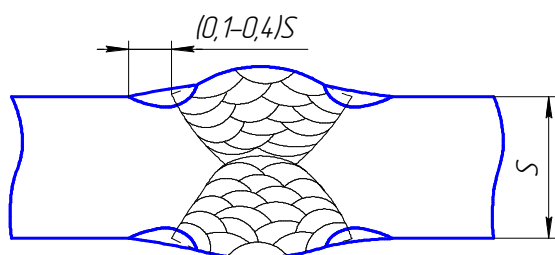


Рисунок 48 – Поэтапное заполнение разделки при сварке алюминиевых полуфабрикатов толщиной 40 мм.

При формировании выпуклости сварного шва последние крайние проходы выполняли таким образом, чтобы перекрыть зону сплавления металла шва с основным металлом на участке шириной $(0,1 - 0,4)S$, в зависимости от толщины свариваемых деталей (рисунок 49) [121].



а)



б)

Рисунок 49 – Схема расположения границы сплавления крайнего валика с поверхностью основного металла от линии разделки свариваемой кромки (а) и макроструктура сварного соединения сплава марки 1550 толщиной 40 мм (б), где S – толщина свариваемых деталей.

Разработанная технология сварки позволяет минимизировать уровень остаточных угловых деформаций сварных соединений при многопроходной сварке без применения специальных методов по снижению сварочных напряжений после сварки (термических, механических). Отклонение от прямолинейности поверхности сварной пробы составляло не более 2 мм по всей ширине пробы (500 мм) (рисунок 50).

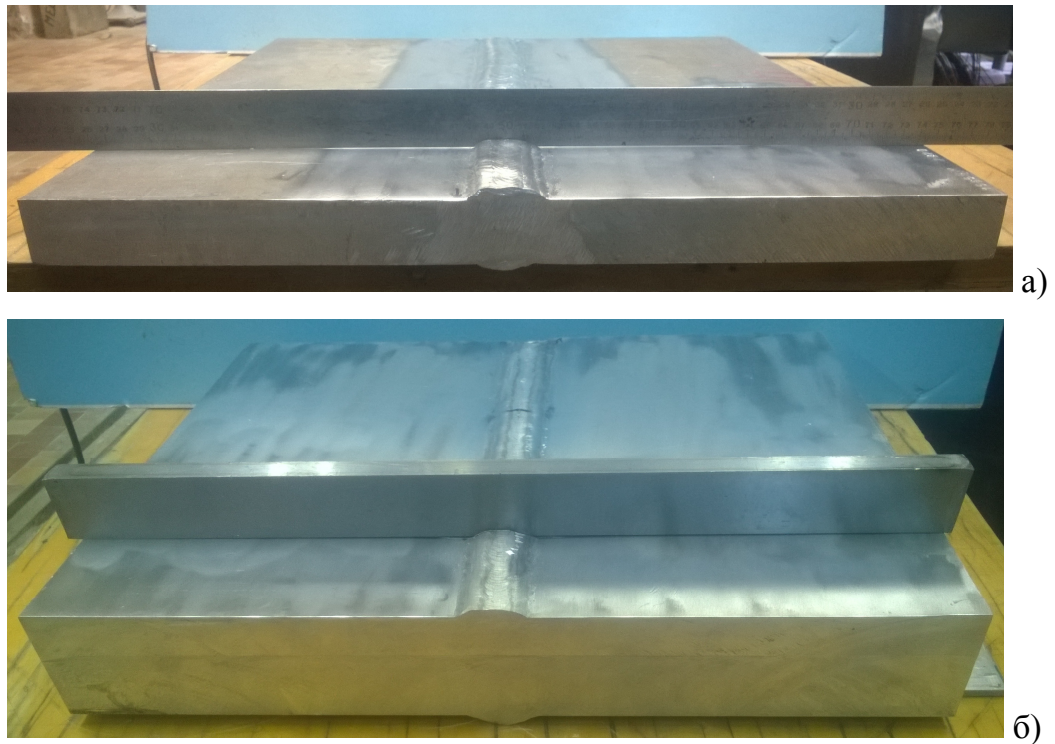


Рисунок 50 – Сварные стыковые пробы сплава 1565ч толщиной 40 мм (а) и 60 мм (б), выполненные ИДСПЭ.

Из сварных стыковых проб размером $\delta \times 500 \times 500$ мм изготовлены образцы в количестве 87 штук:

- статическое растяжение при комнатной температуре (плоские и цилиндрические образцы);
- измерения твердости по Виккерсу HV50;
- усталостные испытания;
- испытания на вязкость (трещиностойкость) при температурах 108 К и 293 К;
- статический изгиб;
- металлографические исследования (макро- и микроструктура).

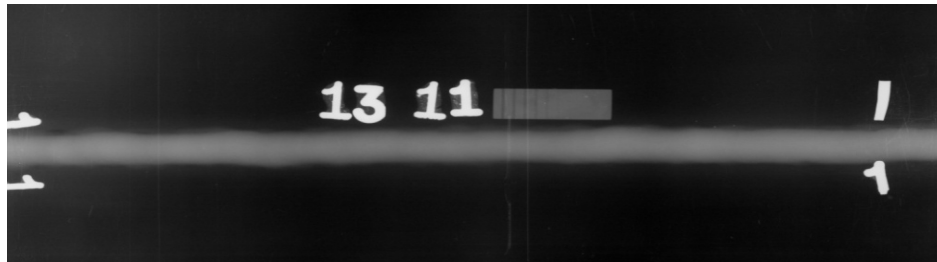
5.1.5 Контроль качества сварных соединений

Качество сварных стыковых соединений из алюминиево-магниевых полуфабрикатов марок 1565ч и 1550 оценивали в 100% объеме внешним осмотром и измерением, а также радиографическим контролем (РГК) в соответствии с требованиями ОСТ5Р.9413 «Соединения сварные корпусных конструкций из алюминиевых сплавов. Правила контроля».

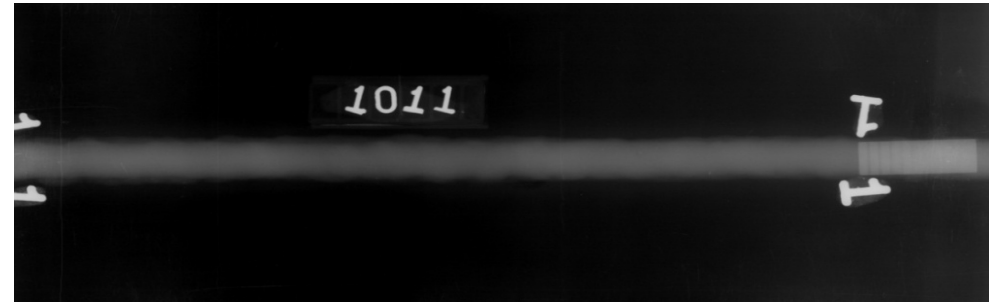
По результатам внешнего осмотра и измерения конструктивные элементы сварных швов соответствовали требованиям ГОСТ 14806 и таблицы 30; недопустимых поверхностных дефектов не выявлено. Поверхность сварных швов характеризовалась равномерной чешуйчатостью и качественным сплавлением с основным металлом (без подрезов основного металла и наплывов).

РГК сварных соединений производили в соответствии с ОСТ5.9095. Оценку качества сварных соединений по результатам РГК выполняли в соответствии с требованиями ОСТ5Р.9413 – все сварные соединения оценены баллом 3, на радиограммах отсутствовали изображения недопустимых дефектов: трещин, несплавлений, непроваров (рисунки 51 и 52).

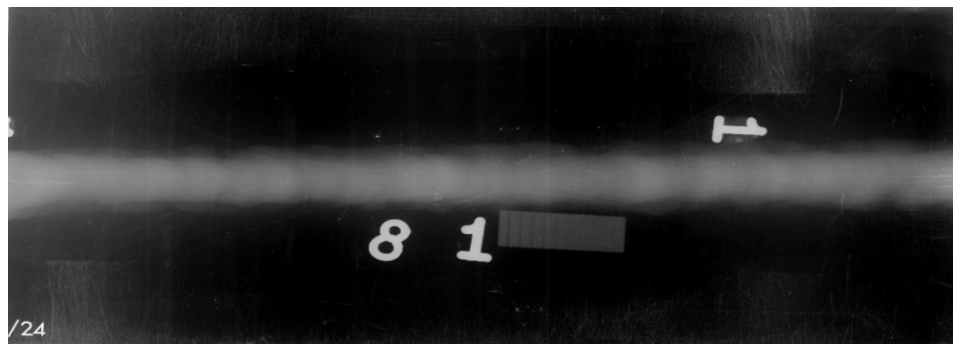
Сварное соединение 1550 толщиной 5 мм



Сварное соединение 1565ч толщиной 7 мм



Сварное соединение 1550 толщиной 10 мм



Сварное соединение 1565ч толщиной 10 мм

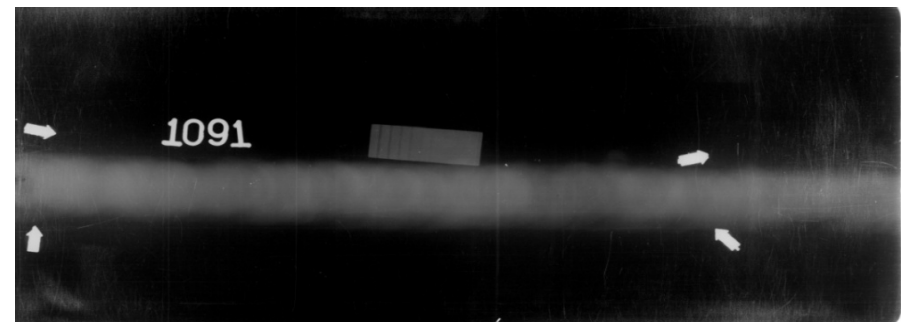
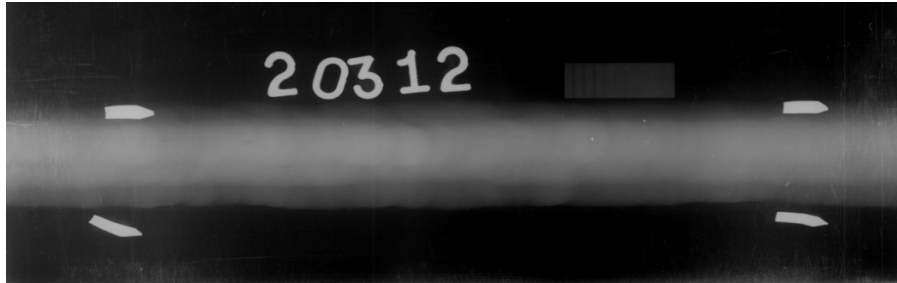
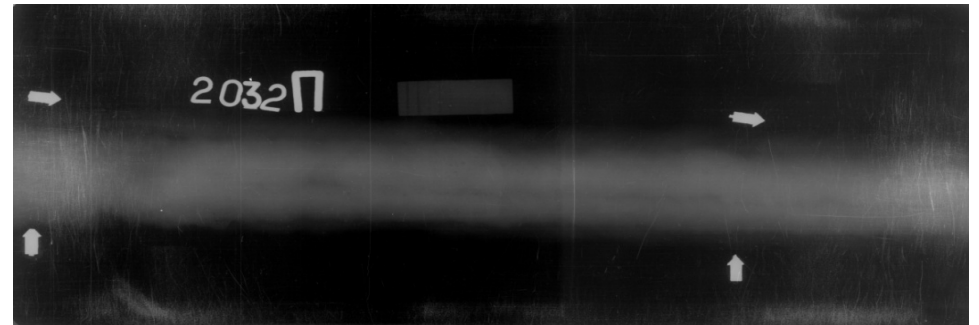


Рисунок 51 – Радиограммы сварных соединений, выполненных АрДС.

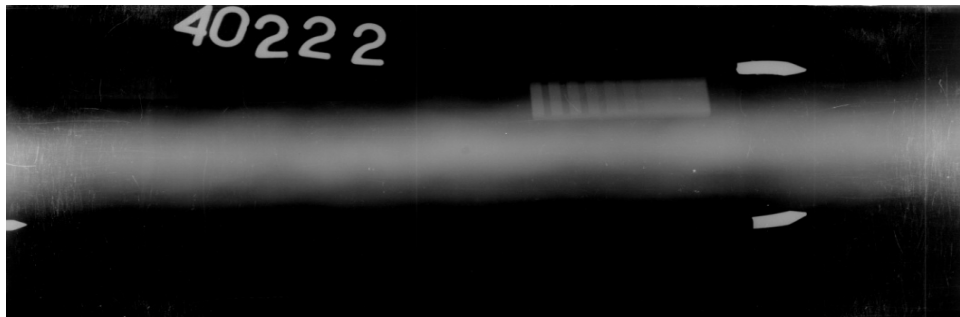
Сварное соединение 1550 толщиной 20 мм



Сварное соединение 1565ч толщиной 20 мм



Сварное соединение 1550 толщиной 40 мм



Сварное соединение 1565ч толщиной 40 мм



Рисунок 52 – Радиограммы сварных соединений, выполненных ИДСПЭ.

5.2 Свойства сварных стыковых соединений полуфабрикатов из сплавов 1565ч и 1550 в отожженном состоянии

5.2.1 Анализ макроструктуры

На поперечных макрошлифах в районе металла шва и на участке основного металла, равном 10 мм за пределами зоны термического влияния, отсутствуют недопустимые дефекты (непровары, межваликовые несплавления, трещины).

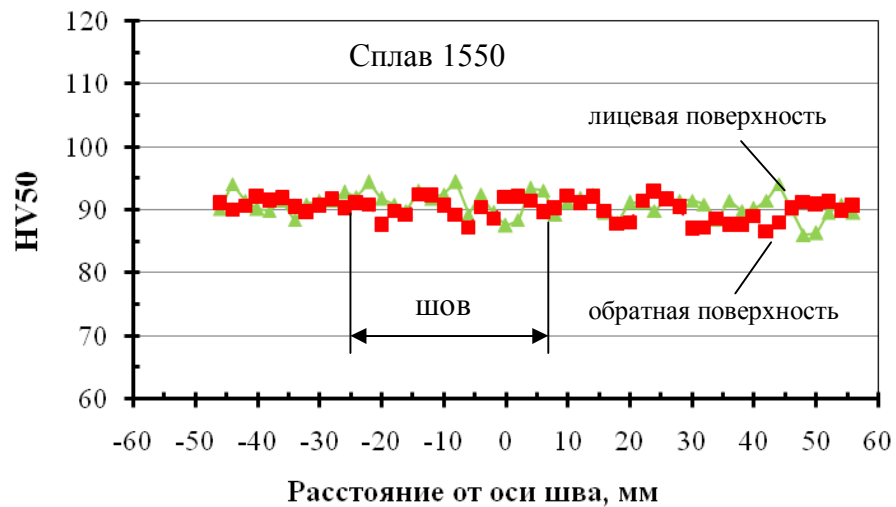
Макроструктура сварных стыковых соединений сплава 1550, выполненных ручной аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом и плавящимся электродом, представлена в таблице 31.

Т а б л и ц а 31 – Макроструктура сварных соединений сплава марки 1550

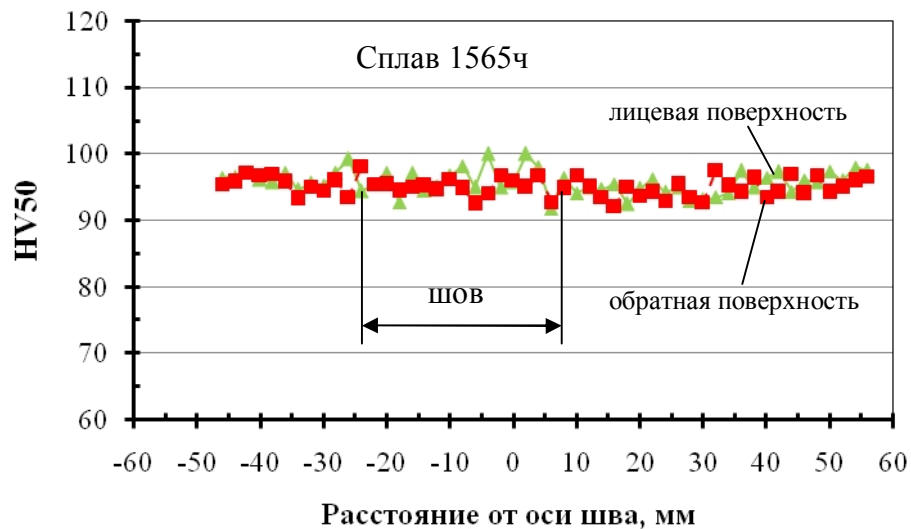
Способ сварки	Толщина полуфабриката, мм	Макроструктура
АрДС	5	
АрДС	10	
ИДСПЭ	20	
ИДСПЭ	40	
ИДСПЭ	60	

5.2.2 Оценка неоднородности механических свойств сварных соединений по толщине свариваемых полуфабрикатов

Неоднородность механических свойств металла шва и зоны термического влияния в сварных соединениях сплавов 1550 и 1565ч по толщине свариваемых полуфабрикатов оценивали по результатам измерений твердости и механическим свойствам цилиндрических образцов, вырезанных из сварных соединений толщиной 60 мм согласно схеме на рисунке 11. Результаты измерений твердости представлены на рисунке 53.



а)



б)

Рисунок 53 – Распределение твердости в поперечном сечении стыковых соединений сплавов 1550 (а) и 1565ч (б) толщиной 60 мм, выполненных АрДС. ▲ – линия измерений на расстоянии 10 мм от лицевой поверхности соединения; ■ – линия измерений на расстоянии 10 мм от обратной поверхности соединения.

Распределение твердости металла, как в одноименных зонах сварного соединения, так и между зонами свидетельствует об отсутствии неоднородности свойств по высоте сечения у обоих сплавов; различие значений на каждом участке составляет не более 4%.

Значения твердости в сварных соединениях сплава 1565ч выше по сравнению со сварным соединением сплава 1550.

Результаты испытаний цилиндрических образцов, приведенные в таблице 32, подтверждают отсутствие значительной неоднородности механических свойств металла в одноименных зонах сварного соединения по высоте сечения (лицевая поверхность, середина, обратная поверхность).

Т а б л и ц а 32 – Результаты испытаний цилиндрических образцов на статическое растяжение при комнатной температуре, вырезанных из сварных соединений толщиной 60 мм, выполненных ИДСПЭ

Марка сплава	Зона вырезки образца	Место вырезки образца	Временное сопротивление σ_b , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение Ψ , %
			max-min среднее			
1550	шов	лицевая поверхность	<u>295-308</u> 300	<u>150-158</u> 153	<u>15,5-22,7</u> 18,0	<u>20,6-29,4</u> 24,1
		середина	<u>297-311</u> 305	<u>151-155</u> 152	<u>15,1-18,3</u> 17,5	<u>22,3-28,6</u> 23,9
		обратная поверхность	<u>291-310</u> 300	<u>152-154</u> 153	<u>17,2-23,0</u> 19,4	<u>20,1-28,3</u> 24,8
	ЗТВ	лицевая поверхность	<u>314-316</u> 315	<u>152-163</u> 157	<u>22,0-23,3</u> 22,7	<u>31,0-32,1</u> 31,6
		середина	<u>311-316</u> 313	<u>152-155</u> 153	<u>19,3-22,0</u> 21,4	<u>29,5-31,2</u> 30,4
		обратная поверхность	<u>308-314</u> 311	<u>150-159</u> 154	<u>21,3-24,1</u> 22,4	<u>30,0-32,5</u> 31,5
	ОМ	—	<u>312-314</u> 313	<u>148-151</u> 150	<u>21,6-23,3</u> 23,0	<u>29,0-35,2</u> 32,0
1565ч	шов	лицевая поверхность	<u>321-349</u> 335	<u>174-191</u> 184	<u>12,1-16,7</u> 14,4	<u>13,2-21,8</u> 17,5
		середина	<u>330-345</u> 336	<u>177-193</u> 188	<u>15,2-17,1</u> 16,5	<u>15,6-20,6</u> 18,1
		обратная поверхность	<u>328-340</u> 335	<u>180-187</u> 185	<u>13,4-16,3</u> 14,8	<u>15,4-22,4</u> 19,3
	ЗТВ	лицевая поверхность	<u>351-363</u> 358	<u>191-203</u> 197	<u>17,1-19,1</u> 18,1	<u>22,7-28,4</u> 25,0
		середина	<u>350-355</u> 353	<u>195-218</u> 212	<u>16,4-18,9</u> 17,1	<u>21,5-26,7</u> 23,7
		обратная поверхность	<u>357-360</u> 358	<u>195-210</u> 207	<u>16,3-19,2</u> 18,3	<u>23,1-28,5</u> 25,1
	ОМ	—	<u>358-362</u> 359	<u>220-225</u> 223	<u>17,3-18,7</u> 18,0	<u>22,6-25,7</u> 24,0

Прочность металла шва ниже прочности основного металла, в сварных соединениях сплава 1550 на $\approx 5\%$; в сварных соединениях сплава 1565ч на $\approx 8\%$.

Средние значения показателей пластических свойств (δ и Ψ) металла шва ниже соответствующих значений для основного металла и имеют разброс значений до 10%. Существенных отличий в механических свойствах металла зоны термического влияния на расстоянии до 7–8 мм от границы сплавления и основным металлом не выявлено.

В таблице 33 представлены результаты испытаний на растяжение плоских образцов с поперечным расположением шва без выпуклости (рисунок 10, б), вырезанных из различных по высоте сечения участков сварных соединений толщиной 60 мм согласно схемы (рисунок 54). Испытания показали, что для обоих сплавов прочность образцов не ниже требований РМРС к сварным соединениям алюминиевых сплавов толщиной до 12,5 мм: для сплава 1550 не менее 275 МПа; для сплава 1565ч не менее 305 МПа.

Наибольшую прочность имеют образцы, вырезанные из средней части сварных соединений, совпадающей с выполнением первого прохода свариваемых кромок, которые характеризуются наименьшей долей участия наплавленного металла.

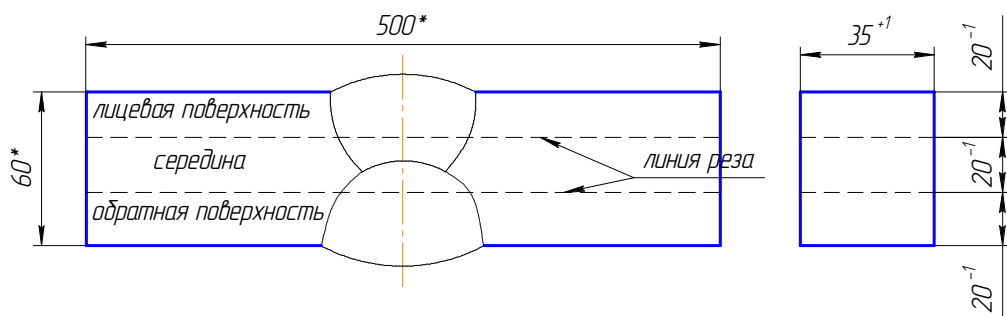


Рисунок 54 – Схема вырезки образцов из сварных соединений сплавов 1550 и 1565ч толщиной 60 мм.

Таблица 33 – Результаты испытаний плоских образцов сварных соединений сплавов 1550 и 1565ч на статическое растяжение при комнатной температуре

Марка сплава	Место вырезки образца	Временное сопротивление $\sigma_{\text{в}}^{\text{св}}$, МПа <u>min-max</u> среднее	Область разрушения
1550	лицевая поверхность шва	<u>280-298</u> 288	Металл шва
	середина	<u>309-313</u> 311	Зона термического влияния
	обратная поверхность шва	<u>277-310</u> 291	Металл шва
1565ч	лицевая поверхность шва	<u>310-318</u> 313	Металл шва
	середина	<u>320-340</u> 328	Зона термического влияния
	обратная поверхность шва	<u>319-323</u> 321	Металл шва

Прочностные свойства металла по высоте сечения находятся в следующих пределах: для сплава 1550 288–311 МПа, т.е. различия коэффициента прочности сварных соединений могут составлять около 8%; для 1565ч 313–328 МПа, это составляет около 2%, от гарантированных значений прочности основного металла.

5.2.3 Испытания на статическое растяжение

Предел прочности сварных соединений алюминий-магниевого сплава 1565ч и 1550, выполненных дуговыми способами сварки, определяли при статическом растяжении плоских образцов с поперечным расположением сварного шва при комнатной температуре (293 К).

Образцы для испытаний изготавливали в соответствии с требованиями ГОСТ 6996 и Правил РМРС. Испытывали образцы следующих типов: с усилением сварного шва (рисунок 10, а) и со снятым усилением сварного шва (рисунок 10, б).

Результаты испытаний сварных соединений приведены в таблицах 34 и 35.

Т а б л и ц а 34 – Прочность образцов из сварных соединений листовых полуфабрикатов алюминиево-магниевого сплава марок 1550 и 1565ч в зависимости от способа сварки и типа образца при комнатной температуре (293 К) испытаний

Толщина, мм	Способ сварки	Категория сварочного материала	Временное сопротивление $\sigma_{\text{в}}^{\text{св}}$, МПа <u>min-max</u> среднее		Область разрушения	
			Образцы со снятым усилением шва	Образцы с усилением шва	Образцы со снятым усилением шва	Образцы с усилением шва
Сварные соединения сплава марки 1550						
5	АрДС	R2/W2	<u>282-300</u> 288	<u>303-311</u> 308	Металл шва	Основной металл
	ИДСПЭ	R2/W2	<u>276-280</u> 278	<u>295-307</u> 300	Металл шва	Основной металл
10	АрДС	R2/W2	<u>276-314</u> 280	<u>326-330</u> 329	Металл шва	Основной металл
	ИДСПЭ	R2/W2	<u>279-305</u> 295	<u>297-329</u> 318	Металл шва	Основной металл
Сварные соединения сплава марки 1565ч						
7	АрДС	R3/W3	<u>330-349</u> 336	<u>336-375</u> 363	Металл шва	Основной металл
		R4/W4	<u>360-370</u> 367	<u>366-373</u> 368	Металл шва	Основной металл
10	АрДС	R3/W3	<u>307-325</u> 317	<u>340-357</u> 348	Металл шва	Основной металл

Т а б л и ц а 35 – Прочность образцов из сварных соединений толстолистовых полуфабрикатов алюминиево-магниевого сплава марок 1550 и 1565ч в зависимости от типа образца при комнатной температуре (293 К) испытаний

Толщина, мм	Способ сварки	Категория сварочного материала	Временное сопротивление $\sigma_{\text{в}}^{\text{св}}$, МПа <u>min-max</u> среднее		Область разрушения	
			Образцы со снятым усилением сварного шва	Образцы с усилением сварного шва	Образцы со снятым усилением сварного шва	Образцы с усилением сварного шва
Сварные соединения сплава марки 1550						
20	ИДСПЭ	R2/W2	<u>255-260</u> 258	<u>260-265</u> 262	Металл шва	Зона термического влияния
40			—	<u>255-270</u> 260		
60			—	<u>257-261</u> 259		
Сварные соединения сплава марки 1565ч						
20	ИДСПЭ	R3/W3	<u>305-310</u> 307	<u>310-324</u> 317	Металл шва	Зона термического влияния
40			<u>305-318</u> 310	<u>307-315</u> 311		
60			—	<u>315-327</u> 320		

Испытания на статическое растяжение при комнатной температуре сварных соединений сплава 1550, выполненных с применением присадочного материала марки СвАМг5 (R2/W2), и сплава 1565ч, выполненных с применением присадочных материалов марки СвАМг61 (R3/W3) и Св1597 (R4/W4), показали, что прочность соединений с усилением сварного шва в среднем на 10 % выше прочности соединений со снятым усилением сварного шва. Уровень прочности сварных соединений сплава 1565ч для образцов всех типов, испытанных при комнатной температуре (293 К), выше аналогичных характеристик для сплава 1550 на 10–20 %.

Характер разрушения сварных образцов с усилением сварного шва и со снятым усилением сварного шва показан на рисунках 55 – 58.

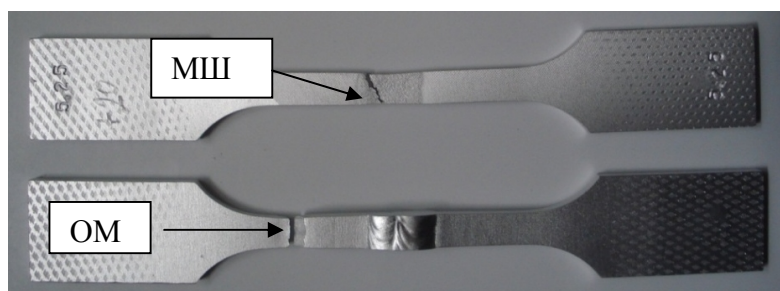


Рисунок 55 – Характер разрушения сварных образцов сплава 1550 толщиной 5 мм, выполненных АрДС с применением присадочного материала СвАМг5, при температуре испытаний 293 К.

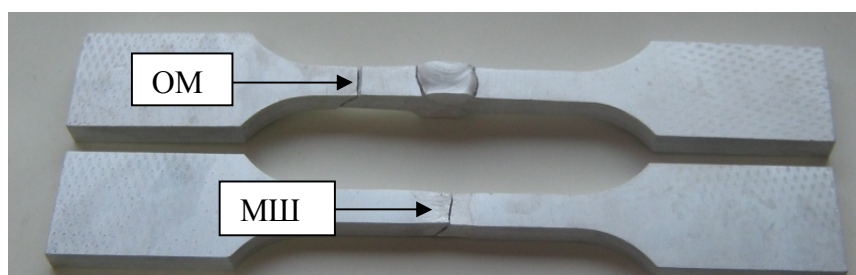


Рисунок 56 – Характер разрушения сварных образцов сплава 1565ч толщиной 7 мм, выполненных АрДС с применением присадочного материала СвАМг61, при температуре испытаний 293 К.

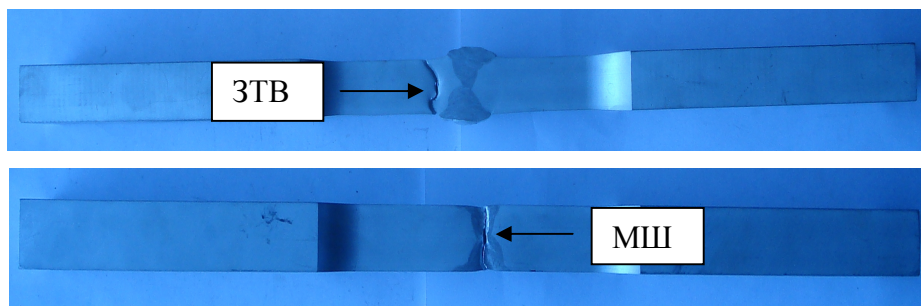


Рисунок 57 – Характер разрушения сварных образцов сплава 1550 толщиной 20 мм, выполненных ИДСПЭ с применением присадочного материала СвАМг5, при температуре испытаний 293 К.

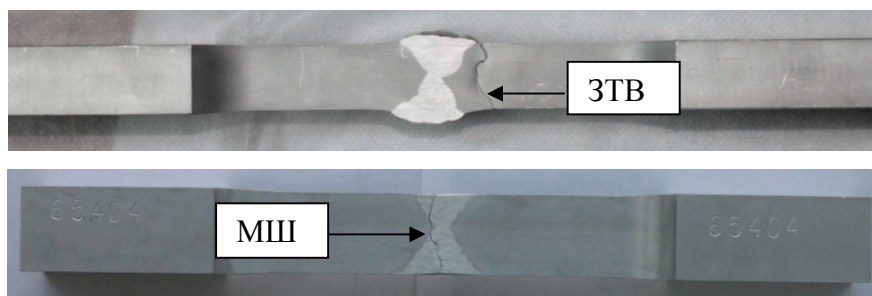


Рисунок 58 – Характер разрушения сварных образцов сплава 1565ч толщиной 40 мм, выполненных ИДСПЭ с применением присадочного материала СвАМг61, при температуре испытаний 293 К.

5.2.4 Испытания на статический изгиб

Испытания сварных соединений на статический изгиб проведены на плоских образцах с поперечным расположением сварного шва по ГОСТ 6996 и «Правилам классификации и постройки морских судов РМРС».

Результаты испытаний приведены в таблице 36, внешний вид образцов после испытаний показан на рисунках 59 – 61.

Т а б л и ц а 36 – Результаты испытаний на статический изгиб образцов сварных соединений алюминиево-магниевого сплава марок 1550 и 1565ч

Марка сплава	Толщина основного материала, мм	Способ сварки	Диаметр оправки, мм	Угол изгиба, град.		Примечание
				Зона растяжения лицевая поверхность шва	Зона растяжения обратная сторона шва	
1550М	5	АрДС	30	180	180	Трещин нет
	5	СТП	30	180	180	Трещин нет
	10	АрДС	60	180	180	Трещин нет
	10	ИДСПЭ	60	180	180	Трещин нет
	20	ИДСПЭ	120	180	180	Трещин нет
	40	ИДСПЭ	120	180		Трещин нет
	60	ИДСПЭ	120	180		Трещин нет
1565чМ	7	АрДС	42	180	180	Трещин нет
	10	АрДС	60	180	180	Трещин нет
	10	СТП	60	180	180	Трещин нет
	20	ИДСПЭ	120	180	180	Трещин нет
	40	ИДСПЭ	120	180		Трещин нет
	60	ИДСПЭ	120	180		Трещин нет



а)



б)

Рисунок 59 – Образцы сварных соединений сплава 1550 толщиной 10 мм после испытаний на статический изгиб: а – АрДС; б – ИДСПЭ.

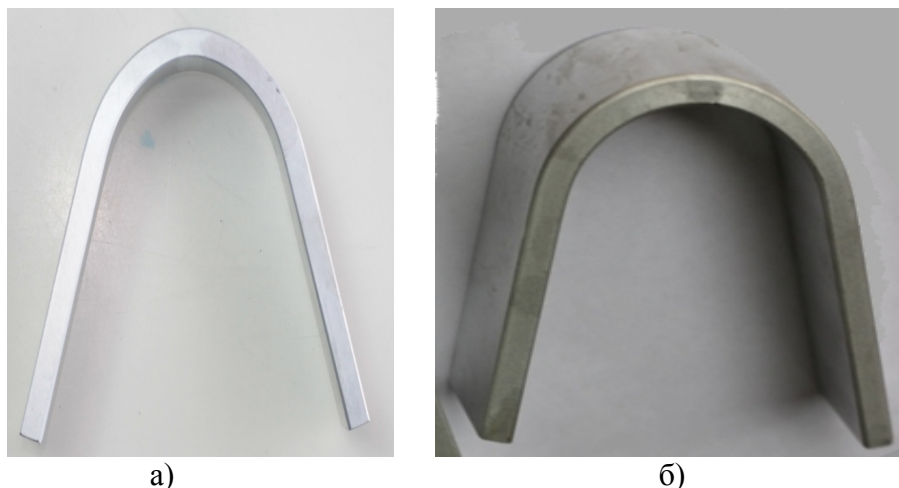


Рисунок 60 – Образцы сварных соединений сплава 1565ч толщиной 10 мм после испытаний на статический изгиб: а – АрДС; б – СТП.

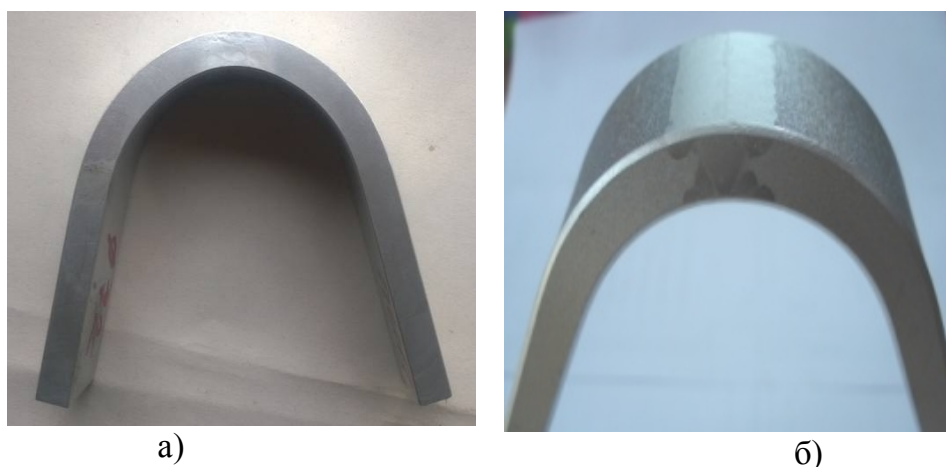


Рисунок 61 – Образцы сварных соединений сплава 1565ч после испытаний на статический изгиб, вырезанных из соединений толщиной 40 мм (а) и 60 мм (б).

Испытания на статический изгиб образцов сварных соединений алюминиево-магниевого сплава марок 1565ч и 1550 с поперечным швом показали, что сварные соединения способны выдерживать пластическую деформацию без образования недопустимых трещин в растянутой зоне при изгибе до параллельности сторон (180°), что соответствует Правилам РМРС.

5.2.5 Усталостные испытания

Для определения усталостных характеристик (долговечности) стыковых сварных соединений алюминиево-магниевого сплава марок 1565ч и 1550 на воздухе и коррозионной среде (морская вода) проведены испытания на циклическое растяжение при нормальных атмосферных условиях и температуре окружающего воздуха $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Полученные результаты испытаний были приведены к одинаковому циклу нагружения с коэффициентом асимметрии $r = 0,1$.

Результаты экспериментальных исследований усталостной прочности свариваемых коррозионно-стойких алюминиево-магниевых сплавов марок 1550 и 1565ч с комментариями и обсуждением представлены авторами испытаний (А. А. Булгаков, С. Д. Кноринг, Г. Б. Крыжевич, В. М. Шапошников) в сборнике «Труды Крыловского государственного научного центра» [12]. Построены усталостные кривые основного металла и сварных стыковых соединений в толщинах 10, 20 и 40 мм и оценено влияние толщины образцов на усталостную прочность. На образцах толщиной 10 мм выполнена оценка влияния коррозионной среды (синтетической морской воды) на усталостные характеристики. Показано, что по усталостной прочности исследованные сплавы превосходят широко применяющийся в отечественном судостроении алюминиево-магний сплав 1561.

Усталостные кривые приведены на рисунках 62 – 66.

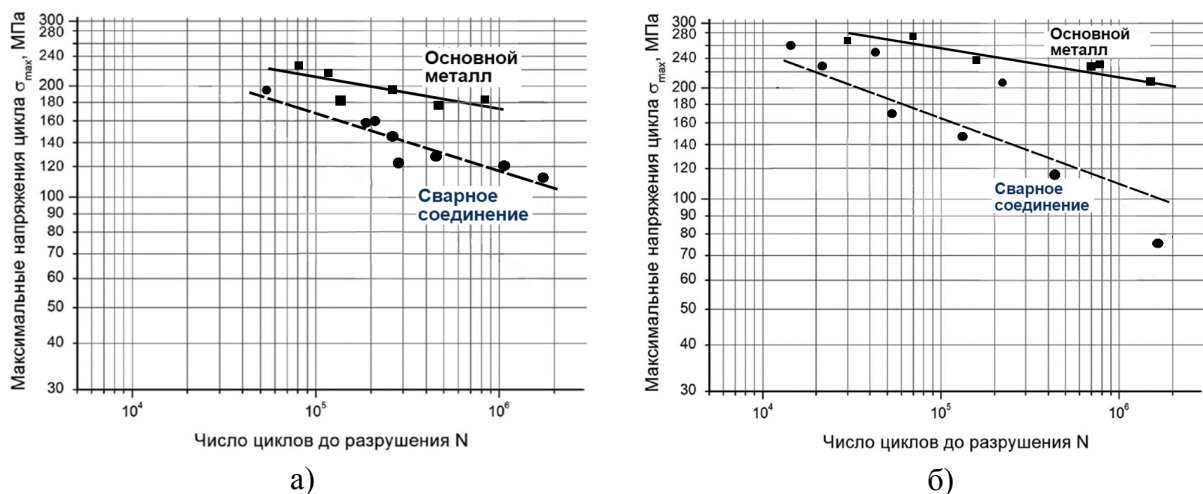
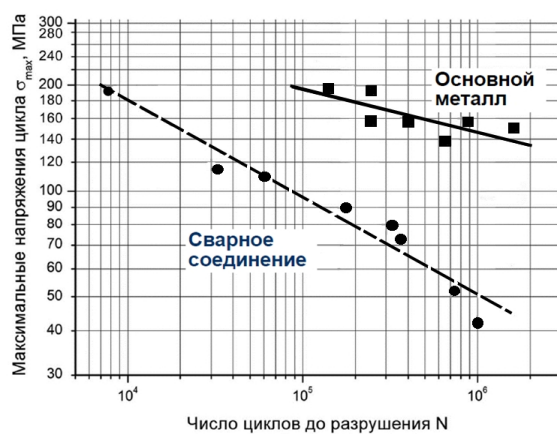
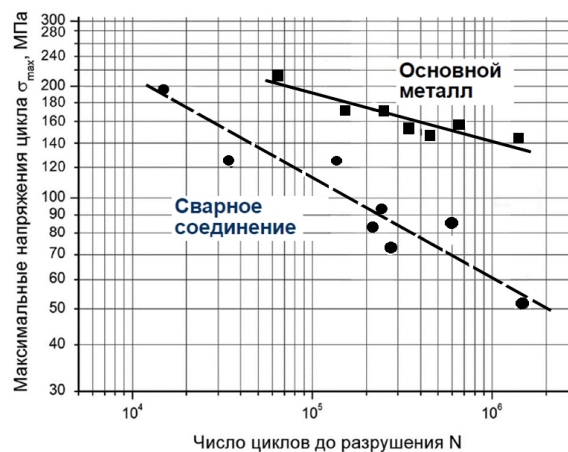


Рисунок 62 – Усталостные кривые образцов основного металла толщиной 10 мм и сварных соединений, на воздухе: а – сплав марки 1550; б – сплав марки 1565ч.



а)



б)

Рисунок 63 – Усталостные кривые образцов основного металла толщиной 40 мм и сварных соединений, на воздухе: а – сплав марки 1550; б – сплав марки 1565ч.

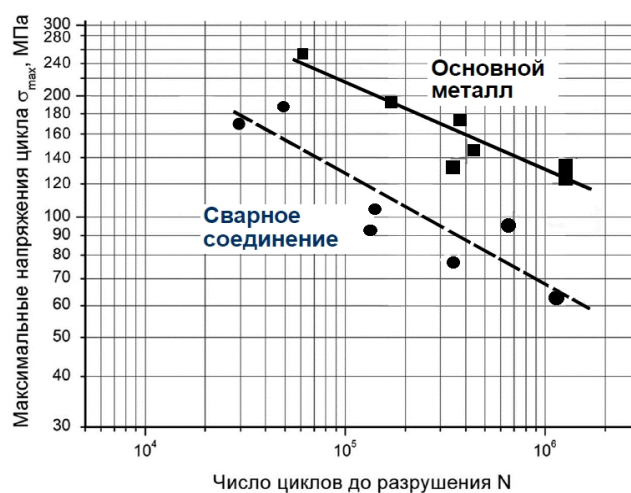
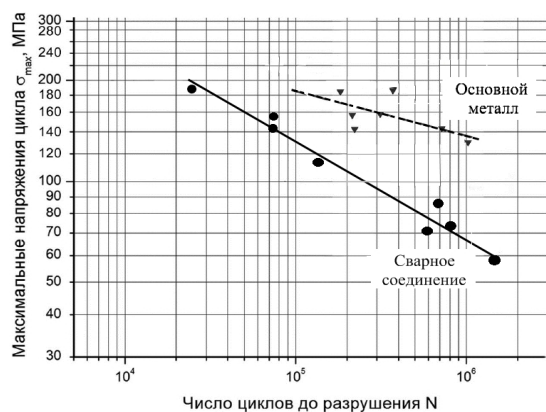
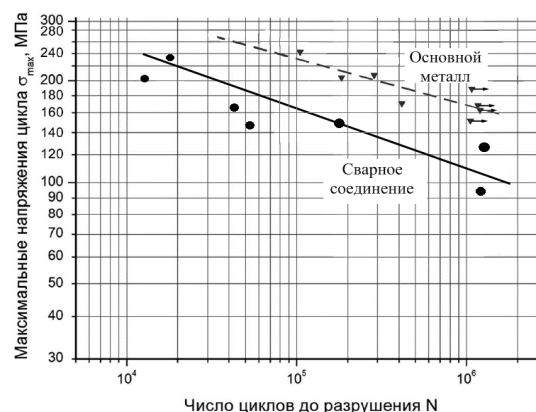


Рисунок 64 – Усталостные кривые образцов основного металла сплава марки 1565ч и его сварных соединений толщиной 20 мм, на воздухе.



а



б

Рисунок 65 – Усталостные кривые образцов основного металла и сварных соединений толщиной 10 мм, в морской воде: а – сплава марки 1550; б – сплава марки 1565ч.

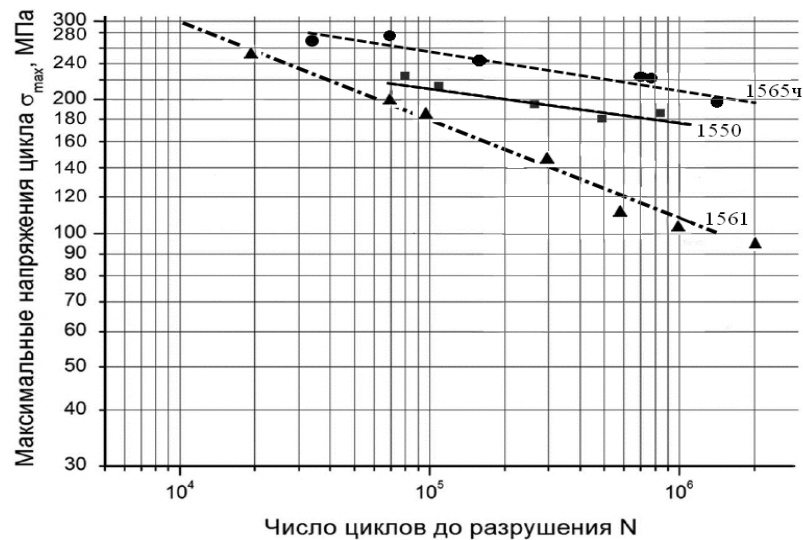


Рисунок 66 – Усталостные кривые образцов основного металла толщиной 10 мм, сплавов марок 1550, 1565ч, 1561 на воздухе.

Анализ показывает, что усталостные характеристики основного металла и сварных соединений при одинаковых условиях нагружения зависят от марки сплава и его толщины.

Предел ограниченной выносливости сварных соединений сплава марки 1565ч для одной толщины выше, чем у сварных соединений сплава марки 1550.

У обоих сплавов усталостная прочность образцов толщиной 10 мм, как основного металла, так и сварных соединений, заметно выше, чем у образцов больших толщин (20 и 40 мм). При толщине основного металла 40 мм различия между сплавами и их сварными соединениями выражены слабо. Разброс результатов усталостных испытаний, более выражен в сварных соединениях.

Анализ характера разрушений сварных образцов (рисунок 67) обоих сплавов показывает, что зарождение усталостных трещин происходит, как правило, на границе перехода усиления шва к основному металлу, т. е. усталостная прочность определяется уровнем концентрации напряжений в области сопряжения сварного шва с основным металлом. Для увеличения усталостных характеристик сварных соединений, при формировании усиления шва необходимо обеспечивать плавный переход от наплавленного металла к основному.

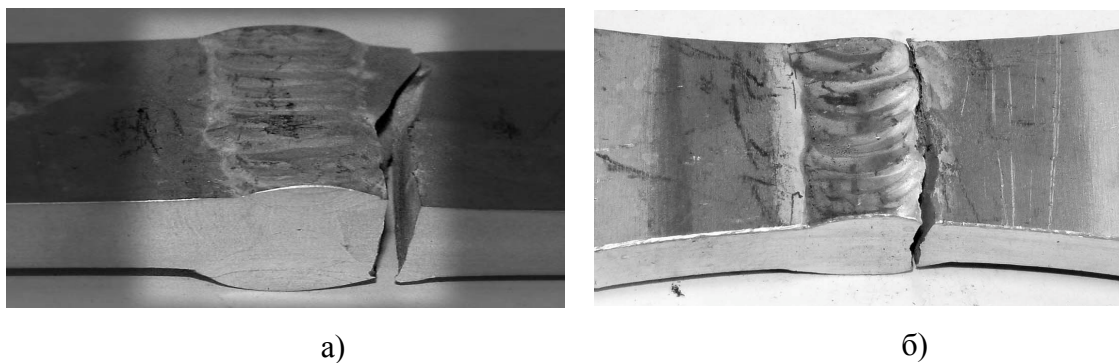


Рисунок 67 – Характер разрушения образцов сварных стыковых соединений толщиной 10 мм, после усталостных испытаний: а – сплав марки 1550; б – сплав марки 1565ч.

5.2.6 Испытания на вязкость разрушения

Экспериментальное определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) металла различных зон сварных соединений алюминиевых сплавов марок 1550 и 1565ч выполнено при проведении испытаний надрезных образцов по схеме трехточечного статического изгиба на воздухе в соответствии с требованиями ГОСТ 25.506, ASTM E399, ASTM B645.

Количество образцов приведено в таблице 37.

Т а б л и ц а 37 – Количество образцов для испытаний на вязкость разрушения

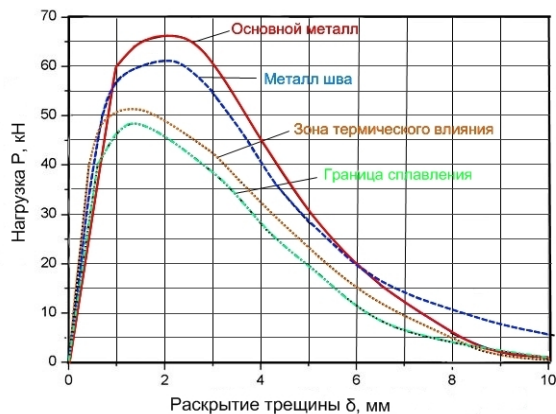
Марка сплава	Категория сварочного материала	Место надреза	Температура испытания, К	Количество образцов, шт.
1550	R2/W2	Основной металл	293	4
			108	4
		Металл шва	293	4
			108	4
		Граница сплавления	293	4
			108	4
		Зона термического влияния	293	4
			108	4
1565ч	R3/W3	Основной металл	293	4
			108	4
		Металл шва	293	4
			108	4
		Граница сплавления	293	4
			108	4
		Зона термического влияния	293	4
			108	4

Результаты испытаний в виде диаграмм P (нагрузка)– δ (раскрытие трещины) в зависимости от марки сплава, места надреза и температуры испытаний

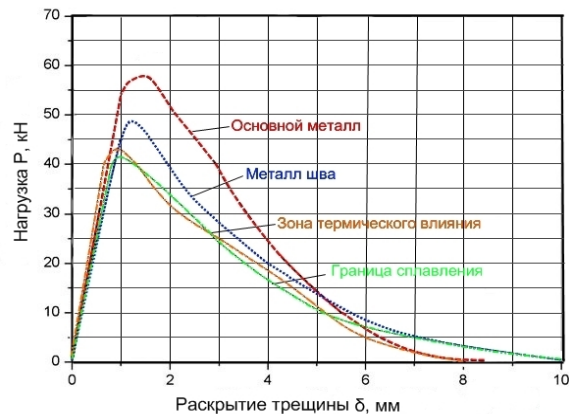
представлены на рисунке 68, а расчетные значения параметров, характеризующих трещиностойкость, приведены в таблицах 38 и 39.

Основной металл и сварные соединения сплава марки 1550

Температура испытания 108 К

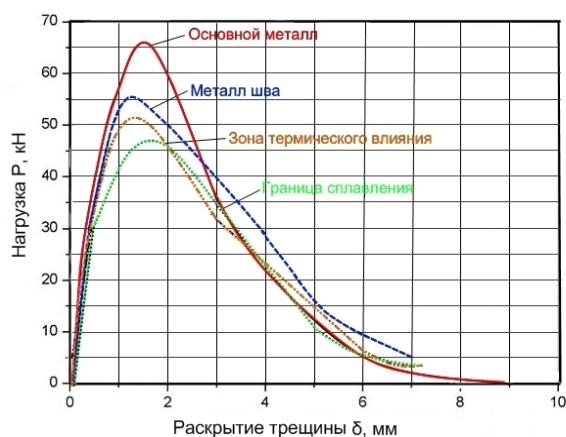


Температура испытания 293 К



Основной металл и сварные соединения сплава марки 1565ч

Температура испытания 108 К



Температура испытания 293 К

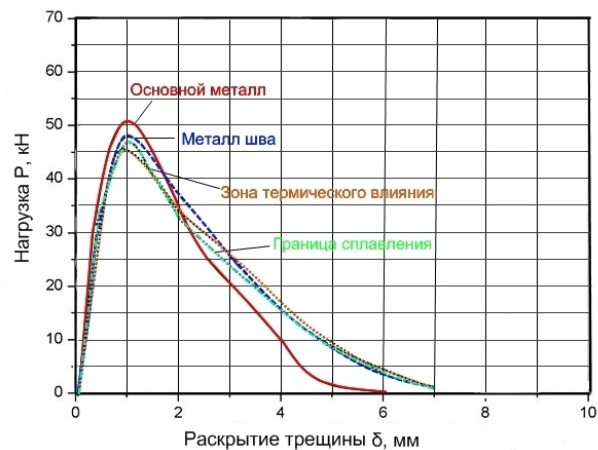


Рисунок 68 – Диаграммы нагрузка – раскрытие трещины ($P - \delta$) основного металла, металла шва, зоны сплавления и зоны термического влияния сварных соединений сплавов 1550 и 1565ч.

Т а б л и ц а 38 – Параметры K_{IC} , CTOD и J_C , вычисленные по результатам испытаний на трещиностойкость основного металла и сварных образцов из алюминиево-магниевого сплава марки 1550 толщиной 40 мм при комнатной (293 К) и криогенной температуре (108 К)

Положение надреза	Вязкость разрушения K_{IC} , Н/мм ^{3/2}		Критическое раскрытие трещины δ_C (CTOD), мм		Критические значения J_C , Н/мм	
	293 К	108 К	293 К	108 К	293 К	108 К
Основной металл	<u>954-1121</u> 1055	<u>927-1267</u> 1081	<u>0,26-0,38</u> 0,34	<u>0,44-0,60</u> 0,51	<u>57,6-101,8</u> 83,6	<u>118,4-143,8</u> 130,8
Центр шва	<u>816-1116</u> 900	<u>836-1183</u> 959	<u>0,15-0,17</u> 0,16	<u>0,49-0,55</u> 0,52	<u>30,6-62,7</u> 47,4	<u>117,2-148,1</u> 128,7
ЗТВ	<u>775-839</u> 809	<u>799-849</u> 814	<u>0,14-0,16</u> 0,15	<u>0,31-0,34</u> 0,32	<u>30,2-34,7</u> 32,3	<u>56,4-70,7</u> 63,5
Граница сплавления	<u>791-981</u> 896	<u>798-989</u> 882	<u>0,16-0,28</u> 0,21	<u>0,24-0,42</u> 0,30	<u>36,2-52,4</u> 43,1	<u>46,9-85,8</u> 61,4

Т а б л и ц а 39 – Параметры K_{IC} , CTOD и J_C , вычисленных по результатам испытаний на трещиностойкость основного металла и сварных образцов из алюминиево-магниевого сплава марки 1565ч толщиной 40 мм при комнатной температуре (293 К) и криогенной температуре (108 К).

Положение надреза	Вязкость разрушения K_{IC} , Н/мм ^{3/2}		Критическое раскрытие трещины δ_C (CTOD), мм		Критические значения J_C , Н/мм	
	293 К	108 К	293 К	108 К	293 К	108 К
Основной металл	<u>1175-1379</u> 1270	<u>873-1414</u> 1114	<u>0,13-0,19</u> 0,16	<u>0,23-0,27</u> 0,26	<u>43,9-58,7</u> 51,1	<u>62,2-78,3</u> 75,6
Центр шва	<u>1106-1194</u> 1159	<u>1205-1307</u> 1220	<u>0,21-0,25</u> 0,24	<u>0,21-0,30</u> 0,27	<u>62,6-69,1</u> 66,9	<u>59,7-97,7</u> 79,3
ЗТВ	<u>1060-1217</u> 1164	<u>791-1228</u> 982	<u>0,18-0,18</u> 0,18	<u>0,24-0,29</u> 0,27	<u>51,0-61,6</u> 55,0	<u>68,3-81,1</u> 74,3
Граница сплавления	<u>1060-1175</u> 1125	<u>840-1281</u> 1121	<u>0,18-0,23</u> 0,20	<u>0,24-0,38</u> 0,29	<u>57,7-61,7</u> 60,1	<u>68,2-96,2</u> 81,6

Результаты испытаний показывают, что трещиностойкость всех исследованных образцов при снижении температуры не ниже, чем при комнатной температуре. При криогенной температуре испытаний наблюдается рост параметров трещиностойкости (δ_C и J_C), как для основного металла алюминиевых сплавов марок 1565ч и 1550, так и во всех зонах сварных соединений.

Трещиностойкость основного металла сплава 1550 как при комнатной, так и при криогенной температуре испытаний выше, чем у основного металла сплава 1565ч.

Трещиностойкость в разных зонах сварных соединений обоих сплавов ниже, чем у основного металла, как при комнатной температуре, так и при криогенной. Более интенсивный рост значений δ_C и J_C , при криогенной температуре, наблюдается у образцов сплава 1550 по сравнению с образцами сплава 1565ч.

В сварных соединениях сплава марки 1565ч средние значения δ_C и J_C при комнатной температуре выше, чем у основного металла. При криогенной температуре значения этих параметров во всех зонах сварных соединений находятся практически на одном уровне.

Результаты экспериментальных исследований трещиностойкости деформируемых алюминиево-магниевых сплавов марок 1550 и 1565ч и их сварных соединений при комнатной температуре и криогенной температуре сжиженного природного газа 108 К опубликованы авторами испытаний (А. А. Булгаков, С. Д. Кноринг, Г. Б. Крыжевич, В. М. Шапошников) в сборнике «Труды Крыловского государственного научного центра» [113]. Показано, что влияние охлаждения до 108 К практически не проявляется на характере диаграмм растяжения образцов при статическом нагружении, а характеристики трещиностойкости возрастают с понижением температур.

5.3 Разработка предложений для включения в Правила РМРС требований к сварным соединениям деформируемых алюминиевых сплавов 1565ч и 1550, применяемым в системе хранения груза газозовов

Правилами классификации и постройки судов издания 2015 года [11] деформируемые алюминиевые сплавы 1565ч, 1550, наряду с широко применяемым в зарубежной практике сплавом 5083, включены в перечень материалов предназначенных к применению в системах хранения груза газозовов (часть XIII «Материалы», раздел10).

С целью установления требований Правил РМРС к деформируемым алюминиевым сплавам, применяемым в системах хранения груза газозовов, проведен анализ требований действующих Правил МАКО и РМРС к алюминиевым сплавам, процессу сварки конструкций; методам испытаний и уровню нормируемых характеристик деформируемых алюминиевых сплавов и их сварных соединений.

По результатам проведенного анализа разработаны предложения для внесения дополнений в требования Правил РМРС к деформируемым алюминиевым сплавам, применяемым в конструкциях систем хранения груза газовозов в следующие разделы:

- часть IV «Грузовые емкости» Правил классификации и постройки судов для перевозки сжиженных газов наливом [13],
- часть XIV «Сварка» Правил классификации и постройки морских судов [11],
- часть III «Техническое наблюдение за изготовлением материалов» Правил технического наблюдения за постройкой и изготовлением материалов и изделий для судов [120].

Основные положения

1. Требования исключают испытания образцов основного металла и сварных соединений из деформируемых алюминиевых сплавов при криогенных температурах, так как экспериментально подтверждена их пригодность к низкотемпературному применению, т. е. прочностные свойства материала при низких температурах выше исходных свойств при комнатной температуре.

2. Требования исключают испытания образцов основного металла и сварных соединений на ударный изгиб, как при комнатной, так и при низких температурах. Экспериментально подтверждено, что у деформируемых алюминиевых сплавов и их сварных соединений отсутствует порог хладноломкости. Ударная вязкость монотонно снижается при понижении температуры, при этом морфология излома образцов носит вязкий характер независимо от температуры испытаний.

3. Требования к деформируемым алюминиевым сплавам включают:

- химический состав деформируемых алюминиевых сплавов 1565ч и 1550 должен соответствовать требованиям НТД предприятия-изготовителя и Правил РМРС [11].
- механические испытания алюминиевых сплавов должны проводиться разрушающими методами при комнатной температуре;
- нормируемые характеристики алюминиевых сплавов: предел текучести ($R_{0,2}$, min), временное сопротивление (R_m , min) и относительное удлинение при

растяжении образцов при комнатной температуре должны соответствовать требованиям НТД предприятия-изготовителя и РМРС (таблица 40).

Т а б л и ц а 40 – Механические свойства полуфабрикатов из деформируемых алюминиевых сплавов 1550 и 1565ч в отожженном состоянии

Категория	Состояние поставки	Толщина t, мм	Предел текучести $R_{p0.2}$, Н/мм ² , мин.	Временное сопротивление R_m , Н/мм ² , мин.	Относительное удлинение, % мин.	
					A ₅₀	A _{5d}
1550	О	$3 \leq t \leq 12,5$	125	275	15	-
		$12,5 < t \leq 50$	110	255	—	12
1565ч	О	$2 \leq t \leq 4$	145	330		18
		5	170	330		15
		$5,5 < t \leq 10,5$	185	335		18
		$11,0 < t \leq 40,0$	175	335		15
		$40 < t \leq 60$	175	330		15
		$60 < t \leq 80$	170	310		15

Требования к сварным соединениям деформируемых алюминиевых сплавов 1565ч и 1550, выполняемым аргонодуговой сваркой неплавящимся и плавящимся электродом, включают сертификационные механические испытания сварных образцов разрушающими методами при комнатной температуре.

Нормируемые характеристики сварных соединений из алюминиевых сплавов должны соответствовать требованиям, указанным в таблице 41:

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

Т а б л и ц а 41 – Требования к механическим свойствам стыковых сварных соединений сплавов 1565ч и 1550

Основной металл		Категория сварочного материала	Свойства сварных соединений (не менее)		
Категория	Состояние поставки		Временное сопротивление	Статический изгиб	
				R _m , МПа	Диаметр оправки, мм
1565ч	О t≤12,5 мм t>12,5 мм	R3/W3 (СвАМг61)	301,5 300	6t	180
1565ч	О t≤12,5 мм t>12,5 мм	R4/W4 (Св1597)	335	6t	180
1550	О t≤12,5 мм t>12,5 мм	R2/W2 (СвАМг5)	275 255	6t 6t	180 180
t – толщина образца, мм					

5.4 Разработка нормативно-технологической документации на сварку алюминиево-магниевых сплавов

На основании результатов проведенных исследований выпущена документация на сварку алюминиевых полуфабрикатов РД5.УЕИА.3622-2013 «Сварка типовых соединений из алюминиево-магниевых катаных листов и плит толщиной до 80 мм для конструкций емкостей газовозов. Технологическая инструкция».

Руководящий документ (РД) распространяется на дуговую сварку в защитных газах неплавящимся и плавящимся электродом типовых соединений катаных листов и плит в отожженном состоянии из алюминиево-магниевых сплавов марок 1565ч и 1550, предназначенных к применению в системах хранения груза газовозов.

РД устанавливает требования к основным и сварочным материалам, подготовке и сборке деталей под сварку, выбору основных типов стыковых соединений и их конструктивных элементов, сварочному оборудованию, технологии сварки, контролю качества и исправлению дефектов сварных швов, безопасности труда и охране окружающей среды.

Сварные соединения алюминиево-магниевых сплавов марок 1565ч и 1550 не требуют термической обработки после сварки.

Предел прочности сварных соединений листов из алюминиево-магниевого сплава марок 1550, определяемый на плоских образцах (ГОСТ 6996) с усилением сварного шва, должен быть не менее гарантированной прочности основного металла в отожженном состоянии.

Предел прочности сварных соединений листов из алюминиево-магниевого сплава марок 1565ч, определяемый на плоских образцах (ГОСТ 6996) с усилением сварного шва, должен быть не менее 0,9 от гарантированной прочности основного металла в отожженном состоянии.

5.5 Внедрение результатов работы

Практическая ценность диссертационной работы состоит в разработке технологии аргонодуговой сварки неплавящимся и плавящимся электродом деформируемых алюминиево-магневых сплавов 1565ч и 1550, впервые допущенных к применению в системах хранения груза газозовозов; в методологическом подходе к оценке влияния факторов сварки на механические свойства сварных соединений из алюминиевых сплавов, в том числе при криогенной температуре, с привлечением математико-статистических методов анализа экспериментальных данных, установлением зависимости между ними, оптимизацией параметров процесса.

Освоены во ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» технологии сварки плавящимся и неплавящимся электродом отечественных деформируемых алюминиево-магневых сплавов марок 1565ч и 1550 в широком диапазоне толщин, предназначенных к применению в конструкциях морского криогенного назначения (Приложение 1 – Акт внедрения результатов работы).

Результаты работы в части выполнения конструктивного и технологического оформления сварного шва, техники и приемов ведения процесса сварки использованы ПК ЦНТУ «Прометей» при оптимизации технологии аргонодуговой сварки плавящимся электродом грузочных приспособлений для БИН с транспортировочной рамой из алюминиево-магневых полуфабрикатов толщиной 30, 50 и 70 мм, что позволило существенно увеличить производительность и качества сварных соединений (Приложение 2 – Акт внедрения результатов работы).

Разработаны Предложения для включения в Правила РМРС требований к отечественным деформируемым алюминиевым сплавам марок 1565ч и 1550, предназначенным к применению в системах хранения груза газовозов, согласованные с РМРС (Приложение 3).

Выводы по главе 5

1. Оценка неоднородности механических свойств по толщине сварных соединений толстолистовых полуфабрикатов алюминиевых сплавов марок 1550 и 1565ч показала отсутствие существенных различий механических свойств металла шва, зоны термического влияния и соединения в целом, величина которых не превышает 8%. Прочность образцов сварных соединений без выпуклости сварного шва, вырезанных из различных по высоте сечения областей, не ниже гарантированной прочности основного металла: марки 1550 – не менее 275 МПа; марки 1565ч – не менее 305 МПа.

2. Минимальные значения временного сопротивления сварных соединений с усилением сварного шва полуфабрикатов из сплавов марок 1550 и 1565ч, выполненных с применением присадочного материала соответствующей категории R2/W2(СвАМг5) и R3/W3(СвАМг61), не ниже требований Правил РМРС, предъявляемых к сварным соединениям деформируемых алюминиевых сплавов.

3. Усталостные характеристики основного металла и сварных соединений деформируемых алюминиевых сплавов при одинаковых условиях нагружения зависят от марки сплава и его толщины. Предел ограниченной выносливости сварных соединений сплава марки 1565ч выше, чем у сварных соединений сплава марки 1550.

4. Вязкость разрушения при криогенной температуре (108 К) металла различных зон сварных соединений сплавов 1550 и 1565ч не ниже, чем при комнатной температуре, при этом рост значений параметров трещиностойкости (δ_C и J_C) для металла шва, зоны сплавления, зоны термического влияния происходит аналогично основному металлу.

5. Разработана технология дуговой сварки стыковых соединений из деформируемых алюминиево-магниевого полуфабрикатов марок 1550 и 1565ч толщиной от 5 до 80 мм, содержащая техническое решение, защищенное патентом на изобретение № 2553769.

Выпущена нормативно техническая документация на сварку РД5.УЕИА.3622 «Сварка типовых соединений из алюминиево-магниевого катаных листов и плит толщиной до 80 мм для конструкций емкостей газозовозов. Технологическая инструкция».

6. Разработаны и согласованы Предложения для включения в Правила РМРС требований к отечественным деформируемым алюминиевым сплавам марок 1565ч и 1550, предназначенным к применению в системах хранения груза газовозов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Выполненный обзор существующего уровня сварки алюминиевых сплавов показал, что в настоящее время промышленные технологии сварки конструкций, в том числе криогенного назначения, базируются на способах сварки плавлением неплавящимся и плавящимся электродом в среде защитного газа благодаря их освоенности, универсальности и технологичности.

2. Материалом для исследования являются деформируемые алюминий-магниево-марганцевые сплавы 1565ч и 1550 в отожженном состоянии, впервые допущенные РМРС к применению в конструкциях систем хранения груза газозовозов, толщиной от 5 до 80 мм; способы сварки – ручная аргодуговая сварка неплавящимся электродом на переменном токе и механизированная аргодуговая сварка плавящимся электродом на постоянном токе обратной полярности в импульсном режиме с применением присадочных материалов марок СвАМг61 (AlMg6Mn1) и Св1597 (AlMg6Mn1Sc), СвАМг5 (AlMg5).

3. Объектами исследования являются металл, наплавленный присадочными материалами СвАМг5, СвАМг61, Св1597, и сварные соединения сплавов 1565ч и 1550, механические свойства которых исследованы в диапазоне температур от 77 К до 293 К.

4. Установлен характер низкотемпературного упрочнения металла, наплавленного сварочными материалами СвАМг5, СвАМг61 и Св1597, сопровождающегося повышением механических свойств при температуре 77 К на 15-20 %, в отличие от поведения деформируемых сплавов той же системы легирования, у которых при понижении температуры происходит рост прочности на 30 – 40 %.

5. Подтверждена пригодность использования присадочных материалов марок СвАМг5, СвАМг61 и Св1597 для сварки алюминий-магниево-марганцевых сплавов 1550 и 1565ч, в конструкциях, работающих при криогенных температурах.

6. Установлена взаимосвязь характера низкотемпературного упрочнения сварных соединений из деформируемых алюминий-магниево-марганцевых сплавов марок 1565ч и 1550 и металла, наплавленного с применением сварочной проволоки марок СвАМг61 или Св1597 и СвАМг5, заключающаяся в том, что наплавленный металл отличается меньшим темпом роста прочности по сравнению с основным металлом.

7. Установлена значимость влияния технологических факторов сварки (состав присадочного материала, способ и параметры режима сварки, тепловложения при многопроходном выполнении швов) и конструктивных элементов оформления сварного шва на формирование механических свойств стыковых соединений при криогенной температуре.

8. Установлено, что прочность сварных соединений деформируемых алюминиевых сплавов 1565ч и 1550, выполненных с использованием соответствующей сплавам категории присадочного материала (СвАМг61 и СвАМг5), при криогенных температурах не ниже их прочности при комнатной температуре.

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

- конструктивно-технологическим оформлением сварного шва наплавкой валиков по границе сплавления шва с основным металлом при сварке с применением присадочного материала той же категории (R_3/W_3 – СвАМг61);
- применением присадочного материала более высокой категории (R_4/W_4 – Св1597) – сварочной проволоки из алюминиевого сплава, содержащего скандий;
- использованием перспективного способа сварки трением с перемешиванием металла.

10. Подтверждено, что сварные соединения деформируемых сплавов 1565ч и 1550, выполненные АрДС и ИДСПЭ по разработанной технологии, выдерживают пластическую деформацию при изгибе до параллельности сторон.

11. Ударная вязкость (КСУ) металла в зонах термического влияния, сплавления и шва сварных соединений сплавов 1565ч и 1550 характеризуется при 108 К монотонным снижением значений до 50% от исходных значений с той же интенсивностью, что и основной металл; минимальные значения ударной вязкости соответствуют металлу шва и составляют для СвАМг5 13–17 Дж/см², для СвАМг61 11–15 Дж/см².

12. Предел ограниченной выносливости сварных соединений сплава 1565ч для одной толщины и одинаковой среды испытания выше, чем у сварных

соединений сплава 1550. Коррозионная среда снижает усталостные характеристики сварных соединений, при этом эффективный коэффициент концентрации напряжений в морской воде по отношению к воздуху изменяется от 1,1 при долговечности $N < 10^5$ до 1,7 при долговечности $N > 10^6$.

13. Прочностные и пластические свойства сварных соединений сплавов 1565ч и 1550, испытанных на статическое растяжение, ударный изгиб, вязкость разрушения при комнатной и криогенных температурах свидетельствуют об их надежности и высокой работоспособности в условиях воздействия разных нагрузок:

- статическая прочность сварных соединений при криогенной температуре не ниже прочности при комнатной температуре;
- характер разрушения образцов после ударного изгиба вязкий с изломами волокнистой морфологии и ямочным микрорельефом без признаков охрупчивания;
- вязкость разрушения металла различных зон сварных соединений сплавов 1565ч и 1550 при криогенной температуре, не ниже, чем при комнатной температуре.

14. Разработана технология аргонодуговой сварки неплавящимся и плавящимся электродом деформируемых алюминиево-магниевых сплавов 1565ч и 1550 в широком диапазоне толщин, применительно к морским конструкциям криогенного применения, поднадзорных РМРС, 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 газовозов. Технологическая инструкция».

15. На основании экспериментального подтверждения пригодности к низкотемпературному применению сварных соединений алюминиево-магниевых сплавов 1565ч и 1550 определены требования к сварным соединениям, которые реализуют свойства основного металла, являющихся перспективными импортозамещающими российскими конструкционными материалами, допущенными к применению в системах хранения груза газовозов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солнцев, Ю. П. Материалы для низких и криогенных температур: Энциклопедический справочник / Ю. П. Солнцев, Б. С. Ермаков, О. И. Слепцов. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2008. – 768 с.
2. Вигли, Д. А. Механические свойства материалов при низких температурах / Д. А. Вигли. Пер. с англ. В. Н. Геминова / под ред. Л. К. Гордиенко. – М.: Мир, 1974. – 376 с.
3. Пат. 2431692. Российская Федерация, МПК С 22 С 21/06. Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из этого сплава / А. М. Дриц, А. С. Орыщенко, В. А. Григорян и др.; заявитель и патентообладатель ЗАО «Алкоа Металлург Рус», ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», ОАО «НИИ стали» – № 2010125006/02; заявл. 18.06.2010; опубл. 20.10.2011.
4. Алюминиево-магниевый сплав 1565ч для криогенного применения / А. С. Орыщенко, Е. П. Осокин, Н. Н. Барахтина и др. // Цветные металлы. – 2012. – № 11. – С. 84–89.
5. Горынин, И. В. Проблемы морской транспортировки сжиженного природного газа. Материалы для танков судов-газовозов / И. В. Горынин, Ю. Л. Легостаев, Е. П. Осокин // Судостроение. – 2009. – № 5. – С. 32–40.
6. [Электронный ресурс]: <http://rgmt.spb.ru> (ФЦП «Развитие гражданской морской техники» на 2009–2016 гг.)
7. [Электронный ресурс]: <http://rgmt.spb.ru/cataqlog/upload/files/SPG-Alternativa.pdf>
8. Перспективы применения сварных алюминиевых конструкций в морском транспорте / Г. Б. Крыжевич, С. Д. Кноринг, В. М. Шапошников // Судостроение. – 2005. – № 3. – С. 72–75.
9. [Электронный ресурс]: <http://rgmt.spb.ru/cataqlog/upload/files/Kriogen.pdf>
10. Bulgakov, A. A. Fatigue properties study for alloy grades 1565чМ and 1550М and analysis of their application fields in shipbuilding / A. A. Bulgakov, S. D. Knoring, G. B. Kryzhevich et al. // The 2nd International Conference and Exhibition “Aluminium-21/TRANSPORT”, October 1–3, St Petersburg, Russia – 2013.

11. Правила классификации и постройки морских судов. НД № 2-020101-082. Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2015.
12. Исследование усталостной прочности новых алюминиево-магниевых сплавов марок 1550М и 1565чМ. / А. А. Булгаков, С. Д. Кноринг, Г. Б. Крыжевич, В. М. Шапошников // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2014. – № 82(366). – С. 113–192.
13. Правила классификации и постройки судов для перевозки сжиженных газов наливом. Правила классификации и постройки судов для перевозки сжатого природного газа. НД № 2-020101-068. Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург. 2012 г. с изм. 2013 г.
14. Павлова, В. И. Прочность при низких температурах сварных соединений алюминиево-магниевых сплавов / В. И. Павлова, С. А. Зыков, Е. П. Осокин // Мир сварки. – 2012. – № 5–6(25–26). – С. 22–26.
15. Орыщенко, А. С. Свойства сварных соединений алюминиево-магниевых сплавов криогенного назначения / А. С. Орыщенко, В. И. Павлова, С. А. Зыков, Е. П. Осокин // Цветные металлы. 2014. – № 3. – С. 64–70.
16. Зыков, С. А. 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.
17. Зыков, С. А. Оценка влияния конструктивно-технологических факторов сварки на свойства сварных соединений из алюминиево-магниевых сплавов при криогенной температуре / С. А. Зыков, В. И. Павлова, Е. П. Осокин // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 2 (78). – С. 138–154.
18. Зыков, С. А. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом полуфабрикатов из алюминиево-магниевых сплавов в широком диапазоне толщин / С. А. Зыков, В. И. Павлова, Е. П. Осокин // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 1 (81). – С. 229–239.
19. Алюминиевые сплавы. Промышленные, деформируемые, спеченные и литейные алюминиевые сплавы: справочное руководство / под ред. Ф. И. Квасова, И. Н. Фридляндера. М.: Металлургия, 1972. – 552 с.

20. ГОСТ 1583-93. Межгосударственный стандарт. Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия. – Взамен ГОСТ 1583-89; введ. 01.01.1997 г. – Минск.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 28 с.

21. ГОСТ 4784-97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. – Взамен ГОСТ 4784-74; введ. 01.07.2000. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 11 с.

22. Солнцев, Ю. П. Материалы в криогенной технике: справочник / Ю. П. Солнцев, Г. А. Степанов. – Л.: Машиностроение, 1982. – 312 с.

23. Фридляндер, И. Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы / И. Н. Фридляндер. – М.: Металлургия, 1979. – 208 с.

24. Алюминиевые сплавы при низких температурах: сб. ст. / под ред. акад. И. Н. Фридляндера. – М.: Металлургия, 1967. – 296 с.

25. Солнцев, Ю. П. Конструкционные стали и сплавы для низких температур / Ю. П. Солнцев, Г. А. Степанов. – М.: Металлургия, 1985. – 271 с.

26. Kaufman, J. G. Fatigue and fracture toughness. Cryogenic Behavior / J. G. Kaufman, F. G. Nelson, R. H. Wygonik // Large-scale fracture toughness tests of thick 5083-0 plate and 5183 welded panels at room temperature, –260 and –320°F. – Baltimore, 1974. – P. 125.

27. Гудков, С. И. Механические свойства промышленных цветных металлов при низких температурах / С. И. Гудков. – М.: Металлургия, 1971. – 304 с.

28. Фридляндер, И. Н. Разные судьбы / И. Н. Фридляндер // Вестник Российской академии наук. – 2002. – Т. 72, № 1. – С. 70–78.

29. Постников, Н. С. Коррозионно-стойкие алюминиевые сплавы / Н. С. Постников. – М.: Металлургия, 1976. – 300 с.

30. Герасимов, В. В. Коррозия алюминия и его сплавов / В. В. Герасимов. – М.: Металлургия, 1967. – 114 с.

31. Головкин, П. А. Влияние режимов горячей деформации на коррозионные свойства сплавов АМг3 и АМг6 / П. А. Головкин // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2005. – № 7. – С. 2–5.

32. Металлы и сплавы: справочник / под ред. Ю. П. Солнцева. – СПб.: НПО «Мир и семья», 2003. – 1000 с.

33. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением: ПБ 03-576-03-2003: утв. постановлением Госгортехнадзора России от 1.06.2003 № 91: Зарегистрировано Минюстом России 19.06.2003, рег. № 4776. – М.: ПИО ОБТ, 2003.

34. Николаев, Г. А. Свариваемые алюминиевые сплавы / Г. А. Николаев, И. Н. Фридляндер, Ю. П. Арбузов. М.: Metallurgia, 1990. – 296 с.

35. Drits, A. M. Новые свариваемые сплавы системы Al-Mg для использования в конструкциях коммерческого транспорта и судостроения / A. M. Drits, S. M. Sosedkov, E. P. Osokin and other // The 1st International Conference and Exhibition Aluminium-21 / Плоский прокат. – October 11–13, 2011.

36. Старцев, В. И. Пластичность и прочность металлов и сплавов при низких температурах / В. И. Старцев, В. Я. Ильичев, В. В. Пустовалов // М.: Metallurgia, 1975. – 328 с.

37. Легостаев Ю. Л. «Новые конкурентоспособные ГЦК-сплавы для криогенных танков судов-газовозов.» / Е. П. Осокин, Г. Ю. Калинин, А. С. Тепленичева // Вопросы материаловедения. – 2012. – № 2 (70). – С. 54–58.

38. Механические свойства конструкционных материалов при низких температурах: сб. научн. трудов: пер. с англ. / под ред. И. Н. Фридляндера. М.: Metallurgia, 1983. – 432 с.

39. Стасюк, С. З. Исследование изменения механических свойств алюминиевых сплавов АМг6, 5083 и их сварных соединений при криогенной температуре / С. З. Стасюк // Проблемы прочности. – 1978. – № 8. – С. 109–112.

40. Овчинников, В. В. Пористость при сварке алюминиевых сплавов / В. В. Овчинников // Заготовительные производства в машиностроении. – 2008. – № 1. – С. 12–16.

41. Степанов, Г. А. Свойства сплава АМг5 и его сварных соединений применительно к деталям криогенной техники / Г. А. Степанов, В. И. Скольцов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2005. – № 3. – С. 43–46.

42. Хилтунен, П. TIG сварка алюминия на прямой полярности / П. Хилтунен // Сварка в Сибири. – 2003. – № 1. – С. 44–46.

43. Yarmuch, M. A. Плавление металла при дуговой сварке неплавящимся электродом в защитных газах на переменном токе при переменной полярности

алюминиевого сплава 5083 / М. А. Yarmuch, В. М. Patchett // Weld. J. – 2007. – 86, № 7. – Р. 196–200.

44. Махмудова, Н. А. Новый присадочный материал для сварки высокопрочных сплавов системы Al-Mg-Sc / Н. А. Махмудова, Ю. А. Филатов, Л. И. Панасюгина // Технология легких сплавов. – 1997. – № 5. – С. 27–29.

45. Пат. 2393073. Российская Федерация. МПК В23К 35/28, С22С 21/06. Состав сварочной проволоки на основе алюминия / В. И. Павлова, А. С. Орыщенко, Е. П. Осокин, С. А. Зыков, В. В. Кучкин; заявитель и патентообладатель ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей»; 2009109736/02; заявл. 17.03.2009; опубл. 27.06.2010, Бюл. № 18.

46. Хаванов, В. А. Особенности сварки в защитных газах алюминиевых сплавов больших толщин / В. А. Хаванов, С. Н. Киселев, Л. М. Скорняков // Сварка в атомной промышленности и энергетике. – М.: Изд. АТ, 2002. – Т. 2. – Ч. 4, 5. – С. 241–260.

47. Сварка сплава АМцС толщиной 40 мм / Ю. А. Степанов, Н. И. Сысоев, Н. Г. Гейнрихсдорф и др. // Автоматическая сварка. – 1977. – № 3. – С. 69, 70.

48. Островский, О. Е. Сварка больших толщин в щелевую разделку деформированным электродом / О. Е. Островский, В. И. Кулик, В. А. Казаков // Сварочное производство. – 1995. – № 2. – С. 1–5.

49. Буцько, А. Г. Дуговая сварка толстолистового алюминиевого сплава 1201 / А. Г. Буцько, А. А. Гайдук, Ю. А. Рябец // Автоматическая сварка. – 1989. – № 2. – С. 45, 46.

50. Стебловский, Б. А. Дуговая сварка плавящимся электродом высокопрочных алюминиевых сплавов больших толщин / Б. А. Стебловский, В. И. Завирюха, Ю. А. Рябец // Сварка алюминиевых сплавов криогенного и общего назначения: материалы сов.-амер. семинара. – Киев: Наукова думка, 1984. – С. 41–44.

51. Вертикальная сборка-сварка крупногабаритных оболочковых конструкций / О. Н. Кудряшов, Н. С. Барабохин, В. А. Казаков и др. // Сварочное производство. – 1999. – № 3. – С. 33–36.

52. Оценка технологических вариантов дуговой сварки стыковых соединений алюминиевых плит в узкую разделку / А. И. Дремлюга, А. Я. Каплун, Ю. А. Рябец и др. // Автоматическая сварка. – 1994. – № 1. – С. 19–23.
53. Knoch, R. Mig-Hochstrom-Schweissen von dicken AlMgMn-Bleichen / R. Knoch, W. Welz // Aluminium. – 1977. – Bd. 53, № 12. – P. 731–737.
54. Сютьев, А. Н. Технология автоматической аргонодуговой сварки встык сплава АМг61 большой толщины / А. Н. Сютьев, В. А. Пидсан // Сварочное производство. – 1983. – № 10. – С. 31.
55. Пат. 2232072. Российская Федерация. МПК⁷ B23 K35/06. Неплавящийся электрод для дуговой сварки / Астафьев А. Г. ОАО Науч.-произв. корп. ИРКУТ. – № 2003104770/02; заявл. 17.02.2003; опубл. 10.07.2004.
56. Пат. 2281193. Российская Федерация. МПК⁷ B23 K35/06. Неплавящийся электрод для сварки погруженной дугой / А. Г. Астафьев. ОАО Науч.-произв. корп. ИРКУТ. – № 2004130805/02; заявл. 20.10.2004; опубл. 10.08.2006.
57. Головизин, Б. Л. Повышение качества сварки криогенных цистерн / Б. Л. Головизин // Сварка Урала – 2002: Тезисы докладов 21 научно-технической конференции сварщиков Уральского региона, посвященной 40-летию кафедры «Технология и автоматизация сварочного производства» КГУ, Курган, 26 февр. – 2 марта, 2002. – Курган: Изд-во. Курган. гос. ун-та. – 2002. – С. 101, 102.
58. Рейчелт, В. Р. Разработка экономичного процесса вертикальной дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа (GMAW) соединений больших сечений из алюминиевых сплавов / В. Р. Рейчелт, М. Г. Хой, Д. В. Эванхо // Сварка алюминиевых сплавов криогенного и общего назначения: материалы сов.-амер. семинара. – Киев: Наукова думка, 1984. – С. 27–33.
59. Карпов, В. М. Технология цифрового синтеза импульсной сварки судовых конструкций из алюминиевых сплавов / В. М. Карпов, В. В. Мурзин, В. А. Хабузов, А. В. Владимиров // Морские интеллектуальные технологии. – 2014. – № 2(24). – С. 94–100.
60. Барабохин, Н. С. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом сплава АМг6 больших толщин / Н. С. Барабохин, Н. В. Шиганов, В. Я. Иванов // Сварочное производство. – 1973. – № 3. – С. 16–18.

61. Булавкин, В. В. Особенности оборудования и технологии сварки ответственных конструкций из алюминиевых сплавов больших толщин / В. В. Булавкин, О. Н. Кудряшов, И. В. Алексеев // Пробл. машиностр. и надеж. машин. – 2001. – № 5. – С. 92–95.
62. Новое оборудование для дуговой сварки плавящимся электродом / О. Н. Кудряшов, А. В. Гудков, Ю. И. Митрушенков, Н. О. Кудряшов // Сварочное производство. – 1998. – № 10. – С. 25, 26.
63. Оборудование и технология полуавтоматической сварки алюминиевых сплавов / А. А. Куркумели, В. Ф. Павлов, В. И. Таран, А. Н. Белоусов // Сварка в атомной промышленности и энергетике. М.: Изд. АТ., 2002. – Т. 2 – Ч. 4, 5. – С. 261–265.
64. Разработка оборудования и технологии автоматической импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом конструкций из алюминиевых сплавов / О. Н. Ерышев, Г. Я. Богданов, А. И. Карпов, В. Б. Туровский // Актуал. пробл. сварки цв. металлов: Докл. II Всесоюзн. конф., Ташкент, окт. 1982 г. – Киев: Наукова думка, 1985. – С. 77–79.
65. Соколов, Ю. А. Комплекс СКПД-2500 для сварки погруженным электродом / Ю. А. Соколов // Технол. машиностр. – 2006. – № 7. – С. 37–39.
66. Kudryashov, N. O. Equipment and new welding technology for aluminium alloys with dynamic plasma / N. O. Kudryashov // First International Conference and Exhibition *Joining of Aluminium Structures*. December 3–5, 2007.
67. Лебедев В. А. Полуавтоматы для дуговой сварки и смежных технологий / В. А. Лебедев, А. С. Орыщенко, М. Г. Шарапов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 588 с.
68. Конюхов, А. Д. Свойства стыковых сварных соединений алюминиевого сплава / А. Д. Конюхов, А. М. Дриц, А. К. Шуртаков // Вестник ВНИИЖТ. – 2013. – № 3. – С. 33–38.
69. Nelson, F. G. Механические свойства при растяжении и чувствительность к надрезу стыковых сварных соединений деформируемых и литейных алюминиевых сплавов при низких температурах / F. G. Nelson, J. G. Kaufman, E. T. Wanderer // Aluminium Company of America, New Kensington, Pennsylvania, USA //

Механические свойства конструкционных материалов при низких температурах: сб. научных трудов / пер. с англ. – М.: Metallurgia. – 1983. – С. 175–191.

70. Характеристики сигнала при ультразвуковом TOFD-методе испытания сварного соединения из алюминиевого сплава / Gang Tie, Xu Yan, Chi Da-zhao, Lu Pin // Trans. China Weld. Inst. – 2005. – 26, № 8. – С. 1–4.

71. Электроннолучевая сварка плит большой толщины из сплава АМг6 / Е. Г. Терновой, А. А. Бондарев, С. В. Пещерина и др. // Автоматическая сварка. – 1991. – № 6. – С. 49–52.

72. Сварка в машиностроении: справочник / под ред. д-ра техн. наук Н. А. Ольшанского: В 4-х т. – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 1 – 504 с.

73. Довбищенко, И. В. Развитие способов дуговой сварки алюминия и его сплавов / И. В. Довбищенко, Б. А. Стебловский // Автоматическая сварка. – 2002. – № 12. – С. 32–36.

74. Технология и оборудование сварки плавлением / под ред. Г. Д. Никифорова. – М.: Машиностроение, 1978. – 327 с.

75. Столбов, В. И. Формирование шва при сварке сплава АМц большой толщины / В. И. Столбов, В. А. Иевлев, В. П. Тихонов // Технология производства сварных и паяных конструкций. – Тольятти: ТПИ, 1975. – Вып. 2. – С. 3–15.

76. Zhang Tie-min. Применение плазменно-дуговой сварки на переменной полярности алюминиевого сплава в газоизолированной камере / Zhang Tie-min, Zhang Hong-guang, Wei You-guan // Welding Mach. – 2006. – 36, №2. – С. 1–3.

77. Дриц, А. М. Плазменная сварка алюминиевого сплава 1460 / А.М. Дриц, В. В. Овчинников // Цветные металлы. – 2006. – № 5. – С. 67–71.

78. Schumacher T. Из малого делают большим – плазменная сварка проникающей дугой / T. Schumacher // Blech. InForm. – 2007. – № 6. – С. 43–45.

79. Kudryashov, N. O. Equipment and new welding technology for aluminium alloys with dynamic plasma / N. O. Kudryashov // First International Conference and Exhibition *Joining of Aluminium Structures*, December 3–5, 2007.

80. О разрушении пленки окиси алюминия при сварке проникающей дугой. М. Г. Шарапов, О. Н. Ерышев, А. А. Куражев, А. Г. Макаров // Сварочное производство. – 1984. – № 9. – С. 1, 2.

81. Ерышев О. Н., Макаров А. Г., Шарапов М. Г. Эффективность газовой защиты при плазменно-дуговой сварке алюминиевых сплавов на постоянном токе обратной полярности. // Автоматическая сварка. – 1991. – № 10. – С. 54, 55.
82. Ерышев, О. Н. Эффективность газовой защиты при плазменно-дуговой сварке алюминиевых сплавов / О. Н. Ерышев, А. Г. Макаров, М. Г. Шарапов // Сварочное производство. – 2003. – № 6. – С. 3–6.
83. Особенности плазменно-дуговой сварки корпусных алюминиевых сплавов на постоянном токе обратной полярности / Г. Я. Богданов, О. Н. Ерышев, Л. М. Козлов и др. // Вопросы материаловедения. – 2001. – №1 (25). – С. 35–45.
84. Исследование механических свойств сварных соединений из алюминиевых сплавов с привлечением математических методов планирования / Я. К. Кульгавий, А. Н. Лялинов, А. Г. Макаров, М. Г. Шарапов // Судостроительная промышленность. Сер.: Сварка. – 1988. – Вып. 6. – С. 28–37.
85. Горбач, В. Д. Основные проблемы плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов, современное состояние и пути их решения / В. Д. Горбач, И. В. Суздалев, М. Г. Шарапов // Вестник технологии судостроения и судоремонта. – 2010. – Вып. 18. – С. 29–39.
86. Технология автоматической плазменной сварки толстолистовых конструкций из алюминиевых сплавов / В. Б. Соломатов, В. К. Назарук, И. Н. Лабутин, В. П. Бочкарев // Вестник технологии судостроения и судоремонта. – 2013. – Вып. 21. – С. 64–71.
87. Плазменная сварка алюминиевых сплавов повышенной толщины / Ю. Д. Щицын, И. Л. Синани, В. Ю. Щицын и др. // Тяжелое машиностроение. – 2014. – № 1. – С. 27–31.
88. Киселев, Г. С. Выбор способа сварки алюминиевых сплавов при производстве конструкций криогенного назначения / Г. С. Киселев, Е. А. Татаринцов // Приборы и управление: сб. ст. молодых ученых ТулГУ. Тула: Тул. гос. ун-т. – 2006. – Вып.4. – С. 103–108.
89. Тенденция развития сварки толстолистого металла в узкий зазор (обзор) / А. Н. Серенко, Ю. В. Белоусов, В. А. Шаферовский и др. // Сварочное производство. – 1987. – № 9. – С. 15–18.

90. О преимуществах импульсной дуговой МИГ-сварки высокопрочных алюминиевых сплавов / В. И. Зайцев, А. Т. Дружинин, Д. П. Семин, Б. Ф. Якушин // Сварка и диагностика. – 2010. – № 2. – С. 34–39.

91. Игнатьев, Ю. Е. Импульсная и пульсирующая дуговая сварка алюминиевых сплавов / Ю. Е. Игнатьев, В. В. Овчинников, В. И. Рязанцев // Машиностроение и инженерное образование. – 2007. – № 2. – С. 12–28.

92. Туричин, Г. А. Особенности теории и технологии лазерной сварки алюминиевых сплавов со сплавами на основе титана и меди / Г. А. Туричин, О. Г. Климова, К. Д. Бабкин // Сб. докладов 2-й Международной конференции и выставки «Алюминий-21/Транспорт», 1–3 октября 2013 года, Санкт-Петербург. – СПб., 2014

93. Туричин, Г. А. Теория и технология лазерно-дуговой сварки алюминиевых сплавов / Г. А. Туричин, И. А. Цибульский, В. М. Левшаков и др. // Сб. докладов 2-й Международной конференции и выставки «Алюминий-21/Сварка и пайка», 20–22 ноября 2012 года, Санкт-Петербург. – СПб., 2013

94. Штрикман, М. М. Новый способ сварки трением и перспективы его применения // Сварочное производство – 2001. – № 11 – С. 36–41.

95. Thomas W. Friction Stir Technology for aluminium alloys // First International Conference and Exhibition *Joining of Aluminium Structures*. December 3–5, 2007, Moscow, Russia.

96. Skinner M. The use of friction stir welding on aerospace structures // First International Conference and Exhibition *Joining of Aluminium Structures*. December 3–5, 2007, Moscow, Russia.

97. Техника и микроструктура соединений толстых листов из Al-сплава 2519, полученных сваркой трением вращающимся инструментом / Zhou Peng-zhang, Zhong Jue, He Di-giu, Shu Xia-yun // J. Cent. S. Univ. Sci. and Technol. – 2006. – 37, № 1. – С. 114–118.

98. He You-sheng Изучение соединений толстых листов из Al 7075, полученных сваркой трением вращающимся инструментом // J. Zhuzhou Inst. Technol. – 2006. – 20, № 2. – С. 56–58.

99. Микроструктура и механические свойства соединений толстых листов из алюминиевого сплава, выполненных сваркой трением вращающимся

инструментом / Xu Weifeng, Liu Jinhe, Luan Guohong, Dong Chunlin // *Acta met. sin.* – 2008. – 44, № 11. – С. 1404–1408.

100. Пат. № 2357843. Российская Федерация. МПК В23К20/12. Инструмент для сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов и способ сварки / Алифиренко Е. А., Зарубин В. М., Орыщенко А. С., Осокин Е. П., Павлова В. И. Патентообладатель ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей». – № 2007128635/02 заявл. 25.07.2007; опубл. 27.01.2009.

101. Павлова, В. И. Исследование температурно-временных условий сварочного нагрева, структуры и свойств металла стыковых соединений алюминивно-магниевого сплава, выполненных СТП / В. И. Павлова, Е. А. Алифиренко, Е. П. Осокин // *Вопросы материаловедения.* – 2009. – №4 (60). – С. 63–75.

102. Алифиренко, Е. А. Перспективы применения сварки трением с перемешиванием при изготовлении тонкостенных профилированных конструкций из алюминиевых сплавов систем Al-Mg и Al-Mg-Si / Алифиренко Е. А., Осокин Е. П. // *Сб. докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения выдающегося ученого-металловеда, академика РАН И. Н. Фридляндера.* – 2013.

103. Лабур, Т. М. Прочность и особенности разрушения сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов при низкой температуре / Т. М. Лабур // *Автоматическая сварка.* – 2011. – № 5. – С. 18–25.

104. Дриц, А. М. Технологические свойства листов из свариваемого алюминиевого сплава 1565ч для производства цистерн. / А. М. Дриц, В. В. Овчинников, Р. Н. Растопчин // *Технология легких сплавов.* – 2012. – № 3. – С. 20–29.

105. Дриц, А. М. Исследование свойств сварных соединений сплава 1565ч применительно к изготовлению сварных автоцистерн / А. М. Дриц, В.В. Овчинников, Р. Н. Растопчин // *Цветные металлы.* – 2012. – № 12. – С. 10–16.

106. Дриц, А.М. Механические свойства сварных соединений листов из сплава 1565чНН / А. М. Дриц, В. В. Овчинников // *Технология легких сплавов.* – 2014. – № 4. – С. 32–39.

107. Елагин, В. И. Алюминиевые сплавы, легированные скандием / В. И. Елагин, В. В. Захаров, Т. Д. Ростова // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1992. – № 1. – С. 24–28.

108. Структура и свойства соединений, полученных при сварке сплава АМг6 с использованием присадочных проволок со скандием / А. Я. Ищенко, А. В. Лозовская, А. Г. Покляцкий и др. // *Автоматическая сварка*. – 1999. – № 4. – С. 19–25.

109. Принципы оптимизации химического состава и разработка сварочной проволоки для сварки высокопрочных алюминиевых сплавов / Н. А. Махмудова, А. Г. Макаров, А. И. Пась, Б. Г. Кривков // *Вопросы материаловедения*. – 1999. – № 3. – С. 232–240.

110. Lloyd's Register Rulefinder 2015 – Version 9.24. Lloyd's Register Rules and Regulations 2015 - Rules for the Manufacture, Testing and Certification of Materials. – July 2015. – Ch. 8: Aluminium Alloys.

111. Bureau Veritas – Rules on Materials and Welding for the Classification of Marine Units. – January 2014. – NR 216 DT R07 E. – Ch. 3: Non Ferrous Alloy Products. Section 2: Aluminium Alloys. – P. 128–136.

112. ГОСТ 7727-81 Сплавы алюминиевые. Методы спектрального анализа. введ. 01.07.82 г. – Москва.: ИПК Изд-во стандартов. – 14 с.

113. Экспериментальное исследование влияния криогенных температур на характеристики прочности и трещиностойкости основного металла и сварных соединений алюминиево-магниевых сплавов марок 1565чМ и 1550М / А. А. Булгаков, С. Д. Кноринг, Г. Б. Крыжевич, В. М. Шапошников // *Труды Крыловского государственного научного центра*. – 2014. – № 83 (367). – С. 109–116.

114. Степнов, М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. / М. Н. Степнов. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.

115. Филатов, Ю. А. Структура и свойства деформированных полуфабрикатов из алюминиевого сплава 01570С системы Al-Mg-Sc для изделия РКК «Энергия» / Ю. А. Филатов, А. Д. Плотников // *Технология легких сплавов*. – 2011. – № 2. – С. 15–26.

116. Херцберг, Р. В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов / Р. В. Херцберг. Пер. с англ./ под ред. Бернштейна М. Л., Ефименко С. П. – М.: Металлургия, 1989. – 576 с.
117. Степанов, Г. А. Свойства цветных металлов применяемых в криогенной технике Вып.1. Алюминий, титан и их сплавы / Г. А. Степанов, А. М. Фаткина, О. А. Толкачова // М.: Изд. Стандартов, 1981. – 44 с.
118. Ерышев, О. Н. Свойства сварных соединений из сплавов Al-6%Mg, легированных скандием / О. Н. Ерышев, А. Г. Макаров, Н. А. Махмудова // Судостроительная промышленность. Сварка. – 1990. – № 10. – С. 17–19.
119. Осокин, Е. П. Свариваемость экономнолегированного скандием алюминиевого сплава 1575-1 и свойства сварных соединений / Е. П. Осокин, В. И. Павлова, С. А. Зыков // Вопросы материаловедения. – 2011. – № 2 (66). – С. 123–130.
120. Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов. НД № 2-020101-040. Российский морской регистр судоходства. СПб., 2014.
121. Пат. № 2553769. Российская Федерация. МПК В23К 9/09, В23К 33/00, В23К 103/10. Способ импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом алюминиевых сплавов / Зыков С. А., Павлова В. И., Якерсберг Л. М., Зайцев Д. В., Полякова И. Н., 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

УТВЕРЖДАЮ



Генеральный директор
ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей»

А.С. Орыщенко

2016 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

Зыкова Сергея Алексеевича

«Влияние конструктивных и технологических факторов сварки на свойства сварных соединений из алюминиевых сплавов при криогенных температурах»
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Комиссия в составе:

Шарапова М. Г. - заместитель генерального директора, начальник НПЭК;

Осокина Е. П. – заместитель начальника НПЭК, начальник лаборатории 129;

Алифиренко Е. А. – начальник сектора 129-1

рассмотрела результаты исследований и разработок ведущего инженера Зыкова С. А., пришла к заключению, что диссертационная работа направлена на решение одной из важнейших современных проблем в области сварочного производства – разработку технологии сварки отечественных деформируемых алюминиево-магниевых сплавов в широком диапазоне толщин применительно к конструкциям морского криогенного назначения.

Соискателем выполнены работы по совершенствованию технологии аргонодуговой сварки неплавящимся электродом и разработке технологии импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом в среде аргона полуфабрикатов из алюминиево-магниевых сплавов толщиной 40-80 мм на сварочном оборудовании ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей».

Разработана нормативно-техническая документация на сварку РД5.УЕИА.3622-2013 «Сварка типовых соединений из алюминиево-магниевых катаных листов и плит толщиной до 80 мм для конструкций емкостей газовозов. Технологическая инструкция».

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 газовозов для включения предложений в Правила РС.

Результаты работы изложены в публикациях автора: 8 статей и патент №2553769 (RU) от 17.09.2013 Бюл. №17.

Члены комиссии:

М. Г. Шарапов

Е. П. Осокин

Е. А. Алифиренко

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

УТВЕРЖДАЮ

Директор ПК «Центр научно-технических услуг «Прометей»,
кандидат технических наук,
заслуженный машиностроитель России

Ю. В. Зеленин
«04» 06



Зеленин Ю. В.
2016 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы ведущего инженера
ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» Зыкова С. А. на тему:
«Влияние конструктивных и технологических факторов сварки на свойства
сварных соединений из алюминиевых сплавов при криогенных температурах»
на соискание ученой степени кандидата технических наук

В рамках диссертационной работы Зыкова С. А. на соискание ученой степени кандидата технических наук проведен комплекс исследований, по результатам которого разработана технология аргонодуговой сварки плавящимся электродом толстолистовых полуфабрикатов из деформированных алюминиево-магниевого сплава, направленная на получение качественных сварных соединений.

Результаты работы в части конструктивного и технологического оформления сварного шва, техники и приемов ведения процесса сварки были использованы в ПК «Центр научно-технических услуг «Прометей» при оптимизации технологии сварки изделий «Загрузочных приспособлений для БИН с транспортировочной рамой» БЛИЦ.72.133-14 из алюминиево-магниевого сплава толщиной 30, 50 и 70 мм при выполнении многопроходных швов, что позволило существенно увеличить производительность сварочных работ и обеспечить качество сварных соединений.

Анализ результатов контроля, выполненного внешним осмотром, измерениями и радиографическим методом, показал соответствие сварных стыковых соединений требованиям, предъявляемым к изделию.

Работа выполнялась при личном участии Зыкова С. А.

Начальник СКТО, к.т.н.

Руководитель группы

Руководитель группы

Н. Г. Шведов
Д. В. Карпенко
И. А. Бахматова

Н. Г. Шведов

Д. В. Карпенко

И. А. Бахматова

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Утверждаю
Заместитель генерального директора
по научной работе, начальник НПЭК,
д. т. н., профессор
М. Г. Шарапов

PC ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ HEAD OFFICE RS
СОГЛАСОВАНО AGREED

314-03 Дата / Date 07 АПРЕЛЯ 2015 г.

«02» декабря 2015 г.

«Предложения для включения в Правила РС требований к
деформируемым алюминиевым сплавам, применяемым в конструкциях
систем хранения груза газовозов»

Начальник лаборатории
ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»

Е. П. Осокин

Руководитель работ,
к.т.н., доцент, начальник сектора
ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»

В. И. Павлова

Ведущий инженер

С. А. Зыков

Санкт-Петербург
2015