

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. И. РАЗЗАКОВА**

На правах рукописи
УДК 621.791.16:621.785.527

Белекова Жылдыз Шаршеналыевна

**Исследование и разработка режима сварки СМТ (Cold Metal Transfer)
мелкозернистых лёгких сплавов**

05.02.08-технология машиностроения

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: д. т. н., проф. Рыспаев Т.А.

Бишкек - 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ	9
1.1 Сварка алюминиевых сплавов	9
1.2. Технология и особенности сварки алюминиевых листов системы Al-Mg-Si марки 6082, системы Al-Mg марки 5083	25
1.3. Современные методы сварки малой теплотой алюминиевых сплавов	36
Выводы.....	44
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	47
2.1 Материалы для сварки AW6082T6 (Al-Mg-Si), 5083 (Al-Mg).....	47
2.2 Оборудование для сварки, технология СМТ	48
2.3 Подготовка алюминиевых листов для сварки	51
2.4 Дефекты сварки и методы их устранения	52
2.5 Выбор параметров режима сварки и условий сварки	57
2.6 Установки для механических испытаний.....	58
2.7 Микроструктурный анализ	60
2.8. Методы аппроксимации результатов исследований	66
2.8.1 Методы аппроксимации функциональных зависимостей.....	66
2.8.2 Методы аппроксимации статистических зависимостей	68
2.9 Выводы.....	72

ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	73
3.1 Определение режимов и условий СМТ сварки позволяющих получить более высокое качество сварного шва	73
3.2 Разработка математической модели отражающей характер влияния скорости подачи проволоки на качество сварного шва	77
3.3 Закономерности влияния пористости швов на качество сварных соединений алюминиевых сплавов	83
3.3.1 Проверка нормальности распределений характеристик прочности сварных швов и количества пор	84
3.3.2 Определение коэффициентов корреляции Пирсона между характеристиками прочности сварных швов и количеством пор	88
3.3.3 Построение уравнений регрессии зависимостей характеристик прочности сварных швов от количества пор и выбор наиболее подходящих из них	88
3.3.4 Влияние пор на снижение характеристик прочности сварных швов.	103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	136
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ.....	137
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	138
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	144

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

СМТ-Cold Metal Transfer (Холодный перенос металла)

США- Соединенные Штаты Америки

ТУ МХП 4315 - 54 (чистый), негорючий бесцветный газ.

ГОСТ-Государственный образовательный стандарт

НИАТ- Национальный Институт Авиационных Технологий

ЦНИИТМАШ- Центральный научно-исследовательский институт
технологии машиностроения

Ar-аргон

He-гелий

Мпа-мега Паскаль

РД-Ручная дуговая сварка

РАД- Ручная сварка в аргоне

МП- Механизированная сварка электродом в среде активных газов.

МАДП- Механизированная сварка проволокой сплошного сечения в
смеси защитных газов

МПИ- Механизированная сварка порошковой проволокой в смеси
защитных газов методом

КПД-Коэффициент полезного действия

МАГ-Металл актив газ

ВВЕДЕНИЕ

В становление современной цивилизации технологических процессов сварка остается одним из ведущих технологических процессов в машиностроении. Промышленность развитых стран в основном составляет сварка и технологии сварочных производств. Большой интерес в становлении требований из-за веса, экономическом и экологическом аспекте применение алюминия и алюминиевых сплавов пользуется большим спросом в машиностроении и самолетостроении. До 2/3 мирового потребления стального проката идет на производство сварных конструкций и сооружений. На втором месте по применению занимает алюминий и алюминиевые сплавы. Основным аспектом сварочного производства- выпуск экономичных конструкций, которые по прочностным свойствам отвечают назначению и тем условиям эксплуатации, для которых они создаются. Учитывая все процессы которые происходят при сварочных процессов.

Развитие современной технологии дало большой толчок развитие технологии в машиностроении. Невозможно, представить в машиностроении без сварочных технологий. Важность сварочного процесса заключается в качественном сварочном шве соответствующими механическими свойствами. На производстве Кыргызстана все широко начали использовать сварочные технологии. Немаловажной задачей считается фактор времени и экономичность всего процесса. Для улучшения всего процесса обращается внимания на весь технологический процесс сварки. Квалификация сварщика на сварочное оборудование, параметры сварочного процесса. В связи развитием машиностроительных производств в Кыргызской Республике стал вопрос о более детального изучения одного из видов сварки и улучшения параметров при сварки алюминиевых сплавов. Задача производства заключается в сварке детали оборонного назначения из алюминиевых сплавов. Деталь оборонного назначения сваривается, но старое оборудование и качества шва было неудовлетворительным, из-за этого стал вопрос о решении этой задачи.

Совместно, с Техническим университетом Клаусталь (Германия) экспериментальная часть проводилась в лаборатории «Сварки и технологии резки металлов».

Актуальность темы диссертации. Согласно анализу литературных данных, сварка алюминиевых сплавов (5083, 6082) новейшим методом сварки с малой теплотой (СМТ- Cold Metal Transfer) проводилась. Однако, до настоящего времени не было достаточных работ по СМТ алюминиевых сплавов 6082 и 5083 с толщиной листа 2 мм, которые широко применяются для изготовления труб.

Сварка алюминиевых сплавов сопровождается такими трудностями, как: оксидная пленка, горячие и холодные трещины. Более того, возникающая пористость при сварке усложняет процесс сварки, и требует применения специального сварочного оборудования.

Необходимо отметить, что в литературе отсутствуют комплексные работы по сварке тонких листов алюминиевых сплавов методом СМТ, в которых было подробно рассмотрено влияние микроструктуры на свойства сварочного шва и основного материала. Также, не достаточно данных о влиянии параметров СМТ-сварки на механические свойства получаемых соединений.

Связь темы диссертации с приоритетными научными направлениями: в рамках проекта «Wolkswagen Stiftung»: Создание кыргызско-немецкого Компетент Центра для сварки при КГТУ им. И.Раззакова.

Целью работы является: определение путей и методов повышения качества сварки СМТ алюминиевых сплавов.

Для достижения вышеизложенных целей были поставлены следующие задачи:

- выявить параметры СМТ-сварки, влияющие на качество сварного соединения;

- определить характер влияния скорости подачи проволоки при СМТ-сварке на характеристики прочности сварного соединения;
- разработать эмпирические модели, отражающие степень влияния скорости подачи проволоки на качество сварного соединения.

Научная новизна полученных результатов:

- на основании результатов обширно проведенных экспериментов разработаны эмпирические модели позволяющие рассчитать предел прочности сварного шва в зависимости от скорости подачи проволоки и количества пор;
- определена эмпирическая модель, позволяющая рассчитать величину снижения характеристик прочности сварных швов в зависимости количества пор.

Практическая значимость полученных результатов:

- определены режимы и условия СМТ сварки позволяющие получить высокое качество сварного шва:
 - инертный газ чистый аргон и смесь газ Ar/He 30;
 - диаметр сварочной проволоки 1,2 мм;
 - скорость сварки 0,4 м/мин;
 - скорость подачи сварочной проволоки 3,5;4;4,5;5 м/мин;
- полученные результаты диссертационной работы рекомендуется использовать при сварке 5083 (Al-Mg), 6082 (Al-Mg-Si) материалов.

Экономическая значимость полученных результатов.

Экономическая эффективность использования результатов работы является повышение качества и надежности сварных швов алюминиевых сплавов 5083 (Al-Mg) и 6082(Al-Mg-Si), полученных методом сварки СМТ, выраженное в увеличении срока службы сваренных изделий.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- характер влияния параметров режима, сварки СМТ алюминиевых сплавов 5083 (Al-Mg) и 6082(Al-Mg-Si) на качество сварного соединения;

- эмпирическая модель, отражающая влияние скорости подачи проволоки на предел прочности сварного соединения;
- эмпирическая модель, отражающая влияние количества пор на характеристики прочности сварного соединения.

Личный вклад соискателя. Научные и экспериментальные исследования и обработка результатов проведены соискателем лично. В соавторстве д.т.н. профессором Рагриным Н.А. разработаны эмпирические модели.

Апробация результатов диссертации. Основные положения диссертационной работы доложены на четырнадцатой общероссийской научно-практической конференции «Инновационные технологии и технические средства специального назначения», (г. Санкт-Петербург, 15–19 ноября 2021 г.), на Международной научно-практической конференции «Инновации в науке и технике» (г. Бишкек 20-21 апреля 2022 г.), на VIII Международной сетевой научно-практической конференции «Современные интеграционные процессы в развитии инноваций в образовании и науке» (г. Бишкек 12 мая 2022 г.) заседание в Доме Учёных секции «Технологии машиностроения и приборостроения» (г. Бишкек 23 мая 2022 г) в удалённом режиме.

Полнота отражения результатов диссертации в публикациях. По теме диссертации опубликованы 12 научных работ, из них 5 статей - в научных журналах, индексируемых системой РИНЦ, RSCI (ядро РИНЦ) в России.

Структура и объем диссертации. Работа изложена на 132 страницах машинописного текста. Состоит из введения, 3 глав, выводов, списка литературы, включающего 65 источников. Работа содержит 54 рисунка, 66 таблиц.

ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1.1 Сварка алюминиевых сплавов

Применение алюминия всегда больше в технике, даже в тех областях где применялась сталь. Алюминий считается вторым по применению после стали. Ниже представлен рисунок 1 где представлена развития цветных материалов [1].

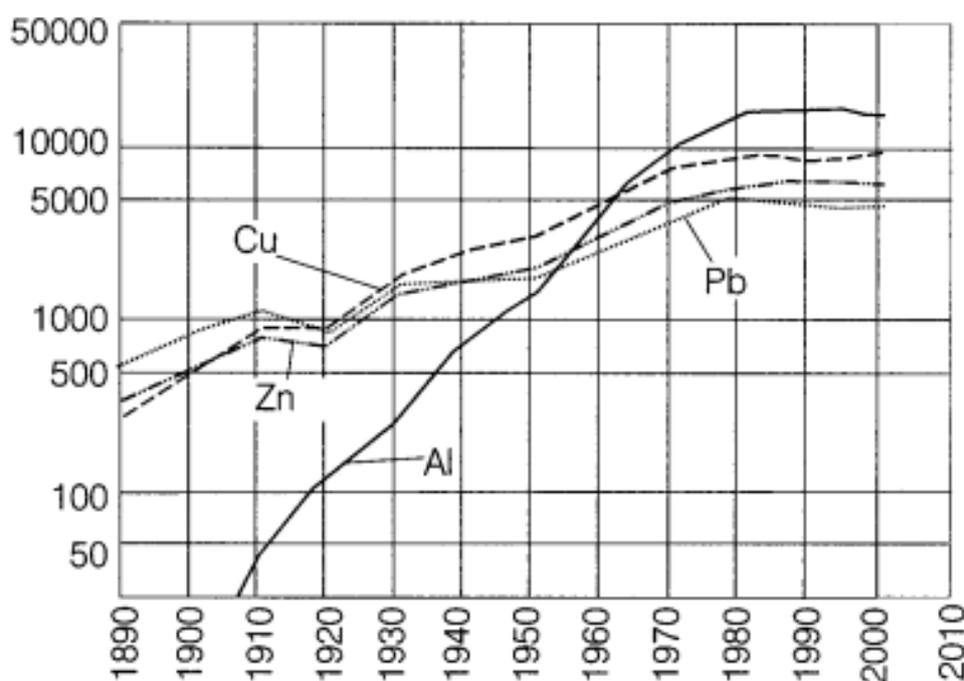


Рисунок 1.1 – Мировая продукция алюминия, меди, цинка и свинца в 1000 тоннах

График показывает, спрос алюминия возрастал с каждым годом. Из-за своих физических и химических свойств, применение алюминия нашли во многих отраслях техники. Алюминий считается безотходным производством, так как после потребления упаковок или изделий из алюминия его можно второй раз переработать. На следующей таблице показана общая картина

потребления алюминия во всех странах мира. На первом месте стоит Азия по количеству потребления алюминия, втором Европа, и в третьем Америка. Ниже будут представлены диаграммы, которые взяты из источника, именно в каких областях потребляется алюминий. На рисунке 1.2 представлена диаграмма потребления алюминия в Китае, как показано 40% алюминия применяется в строительстве. Далее на рисунке 1.3 показана диаграмма Европы, так как они на втором месте по потреблению алюминия в мире. На рисунке 1.4 показана диаграмма США [2].

Потребления алюминия во всем мире в 1000 тоннах.

Таблица 1.1

Регион	2006	2007	2008	2009	2010
Европа	12,000	12,700	12,200	9,200	11,000
Азия	18,500	22,400	22,400	23,300	26,800
Африка	0,500	0,500	0,700	0,800	0,800
Америка	12,600	12,300	11,300	9,900	10,000
Океания	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500
Итого	44,100	48,400	47,100	43,700	49,100

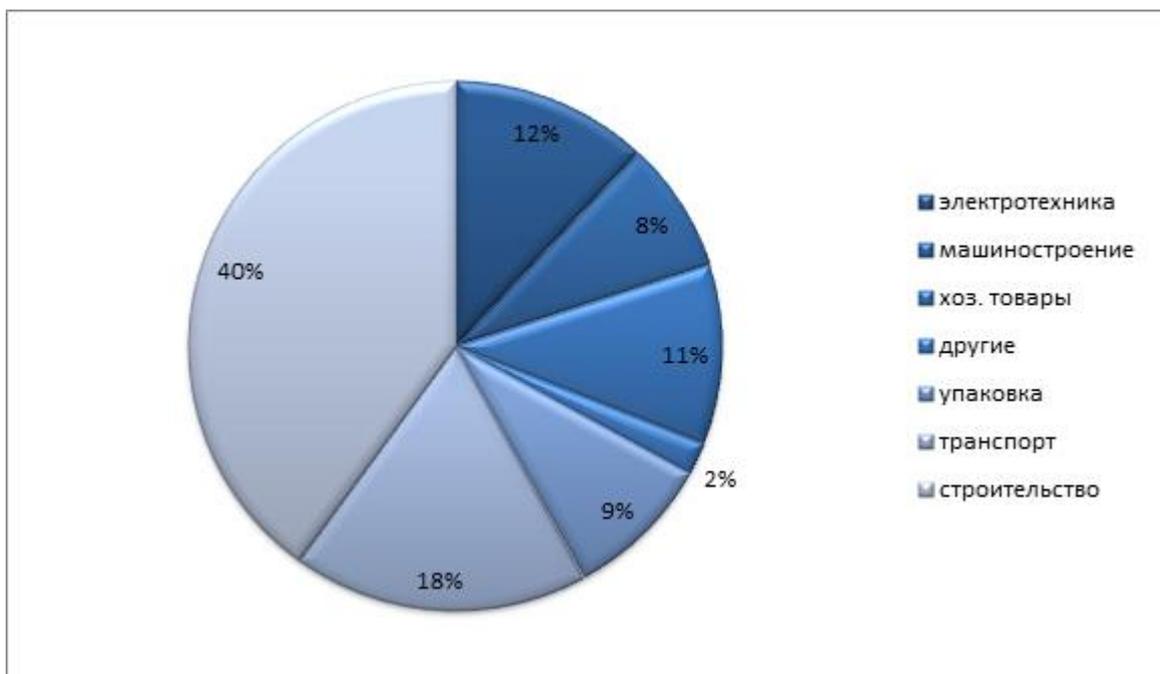


Рисунок 1.2 – Области потребления алюминия в Китае в 2009 году

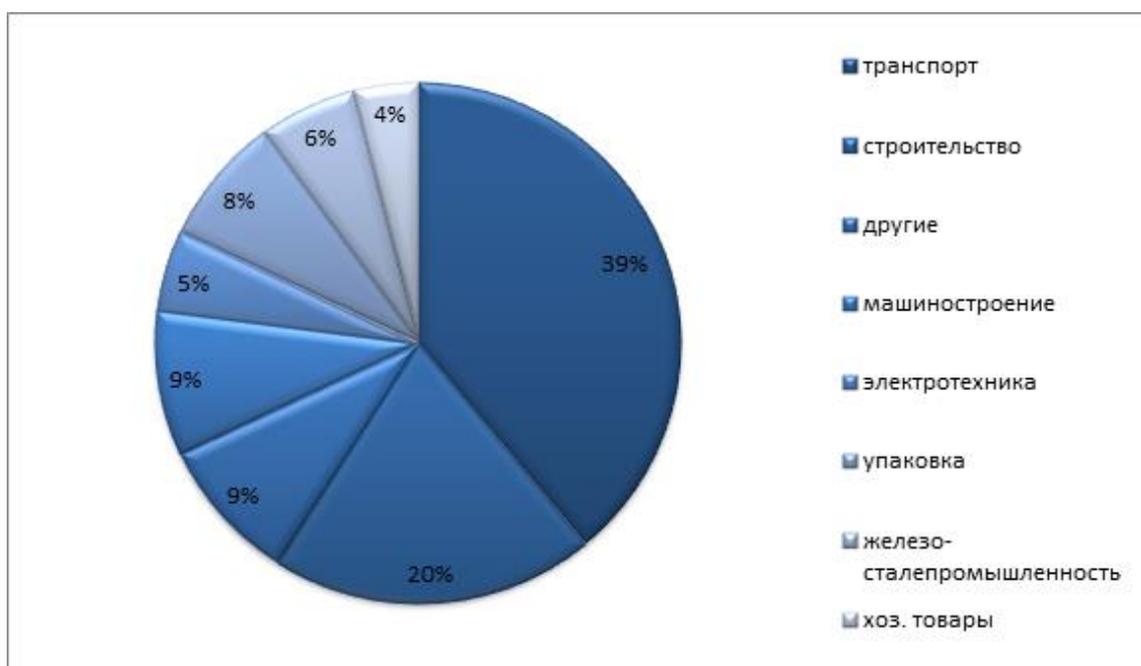


Рисунок 1.3 – Области потребления алюминия в Германии в 2013 год

В Германии большая часть алюминия применяется в транспорте, на втором месте строительство.

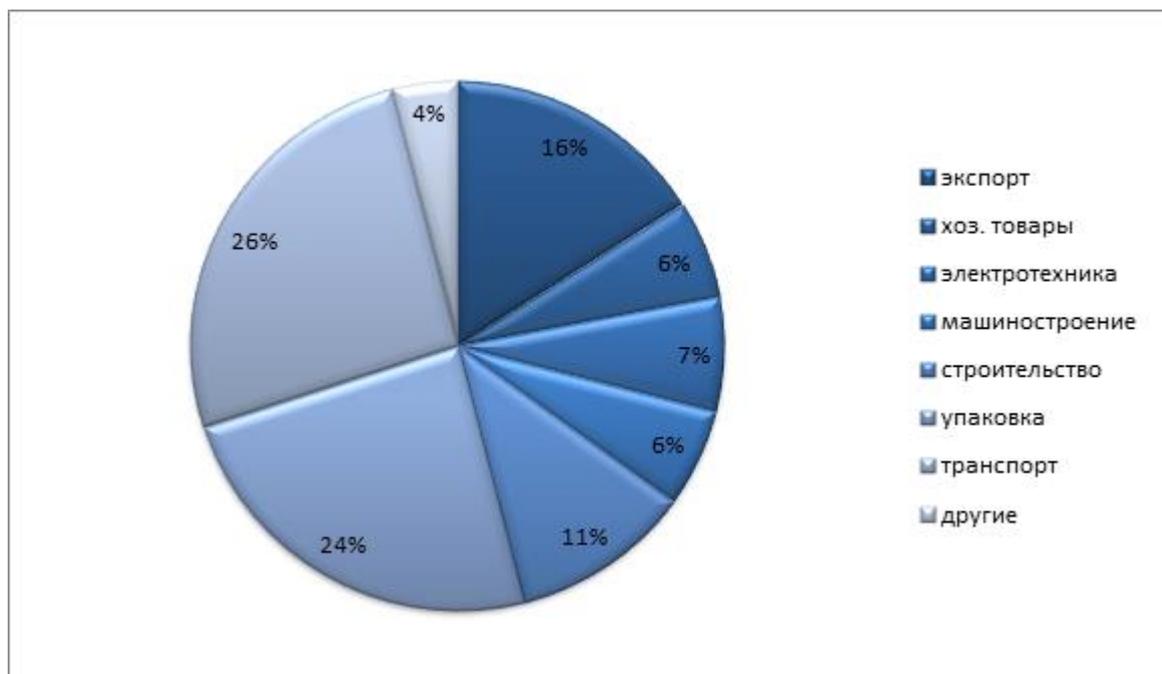


Рисунок 1.4 – Области потребления алюминия в США в 2010 год

В США на первом месте стоит транспорт и на втором упаковка. Но из всех диаграмм видно, что применения алюминия имеет широкий масштаб. Особенность алюминия малая плотность, высокая коррозионная стойкость с каждым годом расширяет его производство. Как известно из литературного источника [3] первым сварочным процессом была сварка ковкой. Большой вклад в развитие сварки внесли изобретатели Н. Н. Бенардос и Н. Г. Славянов. Они в 1881—1882 годах работая независимо друг от друга, разработали способ соединения металлических деталей с использованием сварки [3,4]. Н.Г. Славянов разработал металлургические основы электродуговой сварки и организовал первый в мире электросварочный цех. Н. Н. Бенардос и Н. Г. Славянов положили начало автоматизации сварочных процессов, создав первые устройства для механизированной подачи электрода в дугу. В развитие сварки внес свой вклад Евгений Оскарович Патон, который разработал новый способ сварки, получивший название –автоматическая сварка под флюсом. Это процесс, который происходит за счет увеличения мощности сварочной дуги и надежной изоляции плавильного пространства от окружающего воздуха

позволяет резко повысить производительность процесса, обеспечивать стабильность качества сварного соединения, улучшить условия труда и получить значительную экономию материалов [4].

Необходимо также учитывать, что запасы оксида алюминия в земной коре практически неисчерпаемы. Совокупность всех этих факторов обеспечила быстрое увеличение объема применения алюминиевых сплавов во всем мире. Наиболее широко алюминиевые сплавы применяются в авиационной промышленности и ракетной технике, в строительстве, в электротехнике, в судостроении и в транспортном машиностроении. Анализ распределения объема производства алюминиевых сплавов по видам и направлениям потребления показал, что основную часть суммарного мирового производства алюминиевых сплавов составляют: деформированные сплавы- более 85%, в том числе на изготовление листов потребляется- до 45%, прессованных полуфабрикатов-более 20%, проволоки и кабелей-до 7% запасов алюминиевой руды. Литейные алюминиевые сплавы составляют до 15% от общего объема производства алюминиевых сплавов. Сплавы для силовых конструкций самолетов, вертолетов, ракет, спутников, морских судов, автобусов, вагонов, цистерн, должны удовлетворять многообразным требованиям. В большинстве случаев сплавы должны быть рассчитаны на длительный срок эксплуатации (20-30 лет практически в любом климатическом поясе земного шара), обеспечивая при этом надежность и работоспособность конструкции. В то же время для сверхзвуковых самолетов важное значение приобретает способность материала работать при высоких температурах, а в криогенной технике (суда, перевозящие сжиженный газ, баки с жидким кислородом или водородом)-сохранять пластичность, не охрупчиваться при температурах вплоть до -273°C . Для гермосиловых конструкций разового применения важное значение приобретают вопросы сохранения герметичности в течение хранения (до 10 лет) и высокая статическая прочность. Для изделий многоразового пользования (пассажирские и транспортные самолеты, космические системы многоразового применения типа «Спейс Шатл» и «Буран»), надежность и работоспособность

конструкций определяются не только статической прочностью сплавов. Решающее значения при этом приобретают характеристики циклической прочности, поскольку элементы таких конструкций испытывают разного рода переменные нагрузки-от полетов в беспокойном потоке воздуха, вибрации двигателя, акустических колебаний и.т.п. Для создания силовых и гермосиловых конструкций из алюминиевых сплавов широкое применение находят различные методы сварки плавлением и давлением. Все алюминиевые сплавы можно сваривать методами сварки давлением (точечная, шовная, стыковая), а специальные сплавы-методами сварки плавлением [53].

Маркировка алюминиевых сплавов в России и за рубежом отличается. В литературном источнике [5] значительное внимание уделяется маркировкам в Российской Федерации ГОСТ 4784 "Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки" дает маркировку сплавов тремя способами: как в буквенно-цифровом виде, так и только в цифровом виде, а также и с учетом требований международного стандарта (международная маркировка) ИСО 209 - 1 (ISO 209-1 Wrought aluminium and aluminium alloys - Chemical composition and forms of products - Part 1: Chemical composition). При этом цифровая маркировка по ГОСТ не совпадает с международной маркировкой алюминиевых сплавов [18]. Из источника [5] вытекает что, цифровая маркировка по ГОСТ обозначает слева - направо: первая цифра - основной металл (1-алюминий); вторая цифра - легирующая система; третья и четвертая цифры - марка и модификация. Марка и группа легирования сплавов приведена в таблице 1.2.

Марка и группа легирования сплавов. ГОСТ 4784 "Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые"

Таблица 1.2

Марка	Группа сплавов, основная система легирования
1000–1018	Технический алюминий
1019, 1029 и т.д.	Порошковые сплавы
1020–1025	Пеноалюминий
1100–1190	Al—Cu—Mg, Al—Cu—Mg—Fe—Ni
1200–1290	Al—Cu—Mn, Al—Cu—Li—Mn—Cd
1300–1390	Al—Mg—Si, Al—Mg—Si—Cu
1319, 1329 и т. д.	Al-Si, порошковые сплавы САС
1400-1419	Al-Mn, Al-Be-Mg
1420–1490	A Al-Li
1500–1590	A Al-Mg
1900–1990	Al Al-Zn—Mg, Al—Zn—Mg—Cu

Из источника [7,16] известно свариваемость алюминиевых сплавов, ниже в таблице представлена предварительный анализ свариваемости алюминиевых сплавов таблица 1.3.

Свариваемость алюминиевых сплавов [7]

Таблица 1.3

Чистый алюминий (Al99,9; Al99,5 и т.д)	Хорошая свариваемость
Естественно прочные сплавы (AlMg и AlSi сплавы)	Хорошая свариваемость
Упрочняемые сплавы (AlMgSi и AlZnMg)	Хорошая свариваемость
AlCu (около 6% Cu или Zn) AlCuMg и AlZnMgCu (около 1,4-3,0% Cu образование трещин)	Хорошая свариваемость лишь ограничено пригодный

В промышленности широкое применение различные сплавы в этой системы: низколегированные (АМг1,АМг2,АМг3), промежуточный (АМг4) и высоколегированные (АМг5,АМг6,АМг61). Марганец, цирконий, хром повышают прочностные характеристики сплавов этой системы, ухудшают свариваемость и сопротивление коррозионным воздействиям. Примесь меди в сплавах в этой системы ухудшает коррозионную стойкость и свариваемость, поэтому содержание ее во всех сплавах ограничено 0,01-0,1%. Примесь натрия при концентрации 0,01 % и более резко снижает механические свойства слитков и полуфабрикатов, особенно пластичность при комнатной и повышенной температуре. Поэтому содержание натрия в сплавах не должно превышать 0,0035%. Алюминиевые сплавы при содержании магния 6-7% не обладает эффектом закалки и эффектом старения. Свойства сплавов в отожженном, закаленном и состаренном состоянии практически одни и те же. Характерной чертой всех сплавов системы Al-Mg является состояние пересыщенного твердого раствора магния в алюминии. Пока он сохраняется (при отсутствии условий вызывающих его распад), сплавы обладают высокой пластичностью и хорошей коррозионной стойкостью. При распаде пересыщенного твердого раствора и образовании непрерывных цепочек фазы типа Al_2Mg по границам зерен пластичность и коррозионная стойкость падают. В связи с этим большое значение имеют температура и длительность отжига. Они должны быть такими, чтобы, с одной стороны, вызвать достаточную полноту распада пересыщенного раствора, а с другой- не привести к повторной закалке при охлаждении на воздухе в случае излишне высоких температур отжига. Оптимальный температурный интервал отжига сплава АМг6 310-335⁰С. При этом достигается равномерное распределение фазы по зерну. Прочностные характеристики сплавов системы Al-Mg, особенно предел текучести, существенно повышаются в результате холодной нагартовки, при этом пластичность сплавов понижается и коррозионная стойкость ухудшается. Нагартовку широко используют в серийном производстве сплавов. У всех сплавов системы Al-Mg с понижением температуры испытания повышаются

прочностные характеристики и пластичность. Однако у сплава АМг6, особенно в нагартованном состоянии (АМг6Н), при температуре -196°C и ниже начинают проявляться чувствительность к концентраторам напряжений, снижение пластичности, склонность к расслаиванию при технических испытаниях. При температуре -253°C снижается пластичность материала. При повышении температуры прочность сплавов интенсивно снижается, но их можно использовать в конструкциях, подвергающихся однократному кратковременному нагреву. При длительных нагревах сплавов АМг5 и АМг6, даже низкотемпературных, происходит распад пересыщенного твердого раствора магния в алюминии и образование непрерывных цепочек фазы, что резко ухудшает коррозионную стойкость. Поэтому длительные нагревы сплавов данной системы должны быть строго регламентированы. Сплавы АМг4 и другие низколегированные сплавы системы Al-Mg не реагируют на нагревы и их можно использовать без подобных ограничений [53].

Предварительный анализ показал, что не все алюминиевые сплавы хорошо свариваются. Ряд работ [8,9,10] показывает что, свариваемость 5000 (AlMg) и 6000 (AlMgSi) сплавов выше чем у других алюминиевых сплавов. Но метод сварки и параметры сварки не раскрыты. Исследования по материалостойчивому поведению алюминиевых сварных конструкций под рассмотрением локальной геометрии сварного шва, здесь рассматриваются 5000 и 6000 сплавы. При сварке главным является геометрия шва. Действительности при сварке алюминиевых сплавов важным является каждый этап сварочных процессов. Важным моментом является подготовка к сварочному процессу, чистота рабочей зоны, предварительная очистка свариваемых листов от оксида алюминия. При сварке учитываются свойства как: теплопроводность, электропроводность, оксидный слой, коэффициент теплового расширения и.т.д [8].

Тема влияния деформации на структуру и механические свойства Al-Mg-Sc-Zr сплава [9]. В источнике [10] описывается решении проблемы усталостные свойства сотового ядра сэндвич-панели из алюминия. Из литературного обзора

известно, что, количество работ связанных со сваркой алюминиевых сплавов очень минимально. В обзоре литературы [11] рассматривается вопрос о свариваемости высокопрочных алюминиевых сплавов, а именно 7000 сплавы. В статье [12] рассматривается вопрос о металлургических и механических свойствах термообработанного алюминия 6082. В диссертации из источника [13] речь идет о генерации и применение модулированных технологических газовых потоков в сварке инертным газом. Работа [14] содержит обзорные сведения что, в данный момент существует очень много разновидностей сварки. Для сварки алюминия в основном используется сварка плавлением. Ниже на рисунке 1.5 представлено распределение схемы сварки плавлением [17]

:

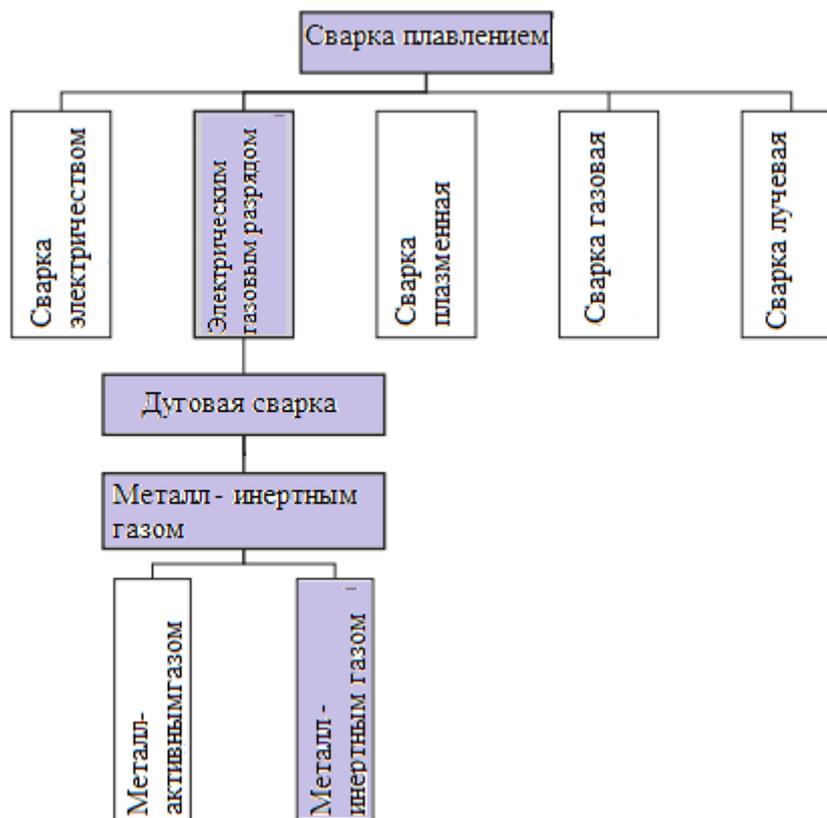


Рисунок 1.5 – Схема распределения сварки плавлением

Основная трудность при сварке алюминия и его сплавов- наличие окисной пленки. Температура ее плавления 2060°C , тогда как температура

плавления алюминия 660°C . Плотная тугоплавкая пленка может нарушить стабильность процесса сварки и таким образом, повлиять на качество формирования шва, вызвав появление внутренних дефектов в наплавленном металле[18].

По данным зарубежной практики, при сварке сплавов системы Al-Cu (серия 200) 2219,2014,2024 склонность к трещинообразованию уменьшается при применении проволоки 2319 и особенно проволоки 4043 и 4145. Уменьшение склонности к трещинообразованию в последнем случае достигается за счет увеличения количества эвтектики Al-Cu и Al-Si-Cu. Для сплавов системы Al-Mg (серия 500) 5454,5086,5083 и 5456 рекомендуется присадочная проволока марки 5356. Для сварки сплавов с содержанием более 2,5% Mg не рекомендуется проволока системы Al-Si из-за понижения пластичности соединений. При сварке сплавов системы Al-Mg-Si (серия 600) 6061,6063,6070,6071 рекомендуется проволока 5556 или 4643 и 4043. Отмечается некоторое преимущество присадочной проволоки 4643, которая благодаря присутствию Mg обеспечивает повышенную прочность швов. В зависимости от толщины свариваемого металла определяют способ разделки кромок металла, диаметр вольфрамового электрода и сварочной проволоки. При выборе диаметра сварочной проволоки также учитывают конструктивные особенности сварного соединения. Силу сварочного тока и скоростные характеристики также определяют в зависимости от толщины и теплофизических свойств свариваемого металла и диаметра электрода. При оптимальном режиме достигаются устойчивость процесса сварки, необходимая глубина проплавления металла, хорошее качество соединения и высокая производительность. Глубина провара основного металла влияет на химический состав металла шва [19].

Для предупреждения или ограничения возникновения горячих трещин могут быть использованы различные меры: 1) технологические, предусматривающие определенную последовательность наложения швов и сборки конструкций, а также использование режимов сварки, обеспечивающих

снижение напряжений, возникающих в металле швов в процессе кристаллизации; 2) конструктивные, предполагающие рациональное проектирование узлов с целью снижения их жесткости и уменьшения деформации металла в процессе кристаллизации; 3) металлургические, основанные на выборе и корректировке состава присадочного металла с целью снижения его горячеломкости. Первые два направления можно рассматривать как общие, широко используемые в практике сварки различных конструкций. Третье направление применительно к сварке алюминиевых сплавов имеет некоторые особенности. Снижение горячеломкости сплава возможно через повышение его пластичности в твердо-жидком состоянии и уменьшение линейной усадки в интервале кристаллизации. Выбор средств для решения этих задач при сварке ограничивается рядом обстоятельств:

1. В процессе сварки доли участия основного и присадочного металлов в образовании металла шва могут изменяться в широких пределах. В связи с этим применение в качестве присадочного металла проволоки, существенно отличающейся по составу, может приводить к значительным изменениям состава металла шва, а следовательно, и склонности его к горячеломкости при различных условиях сварки.

2. Применение для сварки присадочного металла, близкого по составу к основному, ограничивает возможности снижения трещинообразования при сварке и приводит к необходимости одновременной корректировки не только присадочного металла, но и основного. В связи с этим понятие свариваемость сплава иногда отождествляется со склонностью к трещинообразованию металла шва, что строго говоря, не совсем верно, поскольку в отдельном конкретном случае можно, не изменяя состава и свойств свариваемого металла, предотвратить образование трещин в металле шва только за счет корректировки состава присадочного металла и применения оптимальных режимов сварки.

3. Наиболее приемлемым путем уменьшения склонности к трещинообразованию швов является введение в проволоку малых добавок

модификаторов, изменяющих структуру металла шва и подавляющих столбчатость в кристаллическом строении.

Снижение склонности к трещинообразованию в этом случае достигается за счет понижения температуры перехода от жидко-твердого состояния к твердо-жидкому, т.е. понижению верхней границы и таким образом сужению его, а также снижению температуры начала линейной усадки и уменьшению напряжений в шве к моменту завершения кристаллизации.

4. Эффективность действия модификатора по мере увеличения его концентрации исчерпывается при определенном его содержании в сплаве. Дальнейшее увеличение модификатора сверх этого предела целесообразно из-за образования грубых выделений интерметаллидов, не участвующих в процессе измельчения зерна. Поэтому, на наш взгляд, весьма перспективным является путь комплексного модифицирования одновременно несколькими модификаторами, образующими соединения, не способные к взаимному объединению и коагуляции [58].

В первые годы освоения аргоно-дуговой сварки рекомендовалось применять для алюминиевых сплавов аргон чистотой 99,7%, в котором содержание кислорода ограничивалось 0,05%. [20,21]. Эти рекомендации легли в основу разработки технических условий ТУ МХП 4315-54 которые действовали до 1-июля 1963г. В 1963 г. был утвержден ГОСТ 10157-62 на чистый аргон [22]. В основу ГОСТа положены результаты исследований сварки активных металлов (Zr, Ti, Nb и др.) проведенных НИАТ,ЦНИИТМАШ и других организациях страны. После промышленность выпускает в соответствии с ГОСТ 10157-73 три сорта аргона: высший (99,9%) первый (99,98%) и второй (99,95). Гелий до последнего времени в нашей стране мало применяли, так как его стоимость выше стоимости аргона. Между тем при одном и том же токе дуга в гелии выделяет в 1,5-2 раза больше энергии, чем в аргоне. Это позволяет получить более глубокое проплавление при меньшем разогреве основного металла, дает возможность значительно повысить скорость сварки. Во многих случаях рекомендуют в качестве защитного газа применять смеси аргона с

гелием. При этом реализуются преимущества обоих инертных газов: аргон-стабильности дуги гелия- высокая проплавающая способность. Оптимальная смесь при сварке вольфрамовым электродом состоит из 35-40% Ar и 60-65% He, а плавящимся электродом -20-25% Ar и 80-85% He [23].

Защитные газы делятся на две группы-инертные и активные. Газы первой группы с металлом, нагретыми до расплавленного состояния, не взаимодействуют и практически не растворяется в нем. Газы второй группы защищают зону сварки от воздуха, но сами либо растворяются в жидком металле, либо вступают с ним в химическое взаимодействие. К инертным газам, используемым при сварке, относятся аргон и гелий. Из активных газов основное значение имеет углекислый газ. Аргон-одноатомный инертный газ без цвета и запаха, тяжелее воздуха. Получают аргон из воздуха, где его содержится 0,935% (по объему). Аргон поставляется по ГОСТ 10157-79 двух сортов: высшего и первого. Высший сорт содержит 99,992% аргона, не более 0,006% азота и не более 0,0007% кислорода. Первый сорт содержит аргона 99,987% азота- до 0,01% и кислорода – не более 0,002%. Аргон поставляется и транспортируется для использования в газообразном виде в баллонах типа А (ГОСТ 949-73) под давлением 15 Мпа. Баллоны окрашены в серый цвет с зеленой полосой и зеленой надписью «Аргон чистый». Аргон применяют при сварке ответственных сварных швов при сварке высоколегированных сталей, титана, алюминия, магния и их сплавов. Гелий-одноатомный инертный газ без цвета и запаха. Газообразный гелий производится по ГОСТ 20461-75 двух сортов: гелий высокой чистоты (99,985% гелия) и гелий технический (99,8% гелия). Транспортируется и поставляется в баллонах типа А при максимальном давлении 15 МПа. Баллоны окрашены в коричневый цвет белой надписью «Гелий». Гелий используют так же, как аргон, но значительно реже ввиду дефицитности и высокой стоимости [39].

Алюминиевые сплавы свариваются лучше в среде защитных газов, а именно металл инертных газов (аргон, гелий). При сварке алюминиевых сплавов был выбран защитный газ аргон и гелий. Принцип работы сварки в

защитных газах состоит, загорается сварочная дуга расплавляет сварочную проволоку и заготовку образуя между ними сварочную ванну. Как правило сварочный электрод анод (плюс электрод) и основной материал катод (минус). Газ защищает сварочный расплав от нежелательных реакций атмосферы. При сварке газ влияет на характеристику формирования сварочного шва[24,25]. Ниже на рисунке 1.6 рисунке представлен принцип работы сварки в защитных газах [24]. Расход защитного газа устанавливают в зависимости от химического состава и толщины свариваемого материала[19].

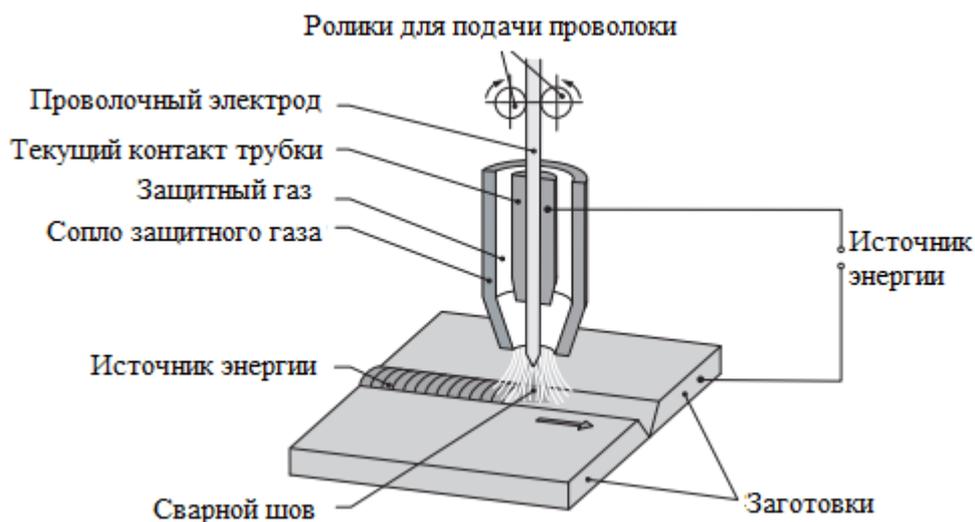


Рисунок 1.6 – Принцип работы сварки в защитных газах

При сварке важно соблюдать все меры для улучшения качества и формирования идеального сварочного провара. Сварка изделий связано с тремя пунктами, как показано ниже в рисунок 1.7, в соответствии с DIN 8528-1[26].



Рисунок 1.7 – Свариваемость изделий

Свариваемость конструкции зависит от пригодности свариваемости материала от безопасности сварки и сварочных возможностей. В связи с этим важно отметить при сварке черных (сталь и чугун) также цветных материалов важно соблюдать правила для экономии времени и средств [28].

При увеличении диаметра электродной проволоки и неизменном сварочном токе плотность тока на электроде уменьшается, одновременно усиливается блуждание дуги между концом электрода и поверхностью сварочной ванны, что приводит к возрастанию ширины шва и уменьшению глубины провара. И, наоборот, при уменьшении диаметра электродной проволоки плотность тока в ней увеличивается, уменьшается блуждание дуги, происходит концентрация теплоты на малой площади сварочной ванны, и глубина провара возрастает, ширина шва при этом уменьшается. Это позволяет при сварке тонкой электродной проволокой сравнительно на небольших токах получать глубокий провар[27]. Один важный параметр - скорость подачи

проволоки. Для устойчивого процесса сварки скорость подачи электродной проволоки должна быть равна скорости ее плавления. При недостаточной скорости подачи проволоки возможны периодические обрывы дуги, при слишком большой скорости происходят частые короткие замыкания электрода на сварочную ванну. Все это ведет к появлению непроваров и неудовлетворительному формированию шва.

1.2. Технология и особенности сварки алюминиевых листов системы Al-Mg-Si марки 6082, системы Al-Mg марки 5083

Алюминиевый сплав 5083 (AMg5) используется главным образом для изготовления прессованных профилей; он хорошо обрабатывается, хорошо сваривается, обладает высокой устойчивостью к коррозии. Сварка деталей из этого сплава ведется электродами из сплава 5356. Механические свойства сплава после сварки практически не изменяются, а прочностные характеристики следующие: предел прочности на разрыв – 302,3 МПа, предел текучести (образец длиной 50,8 мм) – 154,7 МПа, относительное удлинение (образец длиной 50,8 мм) – 16%. Важной характеристикой при выборе высокопрочного алюминиевого сплава для изготовления деталей, находящихся под нагрузкой, является его невосприимчивость к коррозии. Сопротивление коррозии у напряженной детали определяется в основном тремя факторами: составом сплава и его термообработкой, уровнем напряжений в детали и составом окружающей среды [56].

На рисунке 1.8 представлена основные типы сварных соединений. По форме сопряжения соединяемых деталей различают следующие типы сварных соединений: стыковое, угловое, торцовое, тавровое и нахлестанное [27,28].

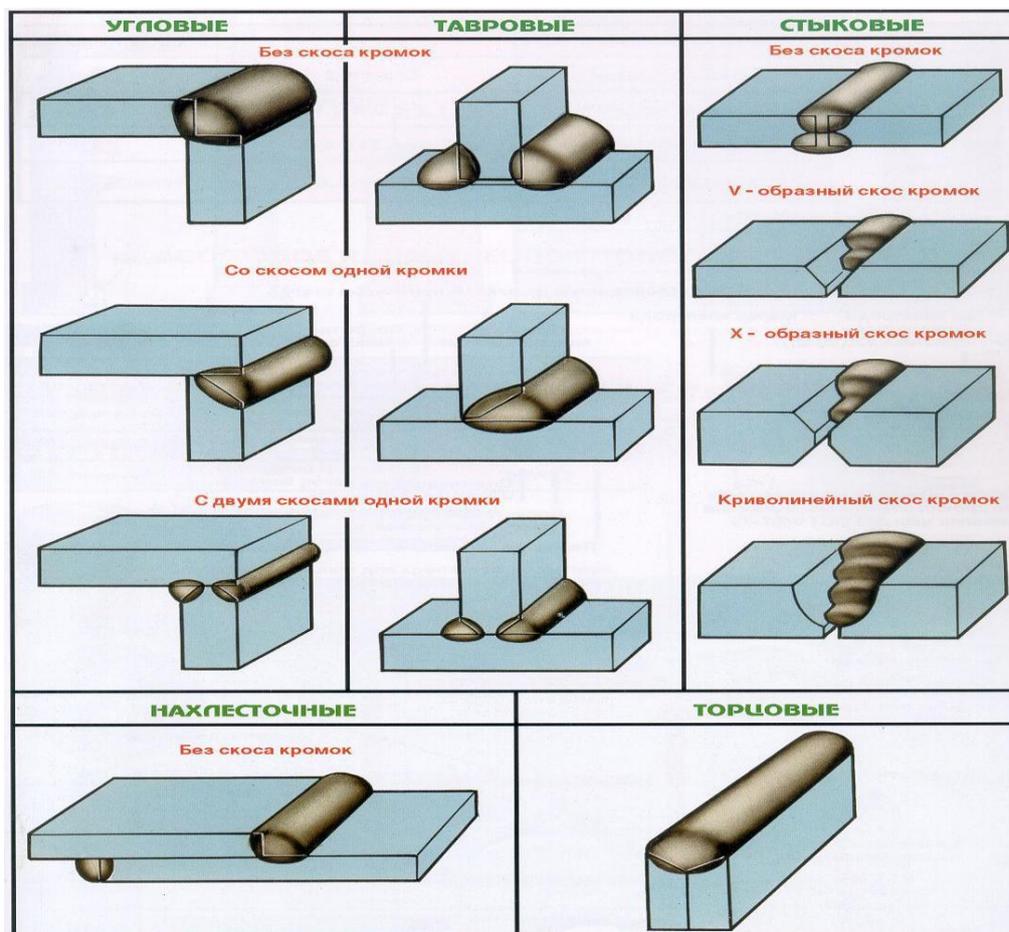


Рисунок 1.8 – Основные типы сварных соединений

По характеру выполнения сварные швы могут быть одно и двусторонними, а по числу слоев одно и многослойными, а также многопроходными рис. 1.9. [27].

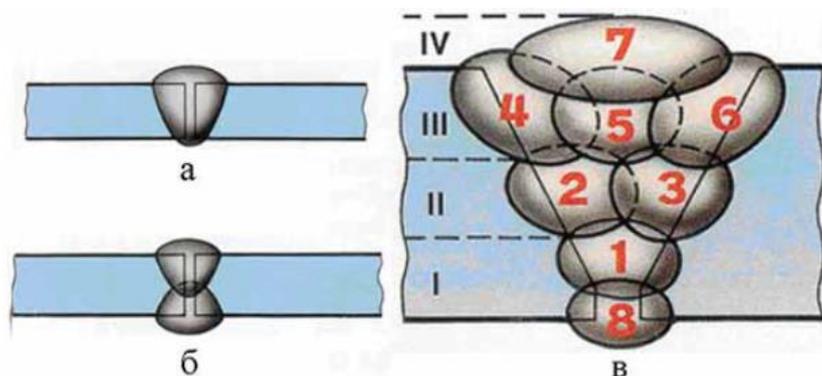


Рисунок 1.9 – Одно-(а) и двухсторонний (б) односторонние швы и многослойный многосторонний сварной шов (в):1-8-очередность выполнения проходов;1-корневой шов; 7-облицовочный шов;8-подварочный шов; I-IVслои

Известно что, элементами геометрической формы подготовки кромок под сварку являются : угол разделки кромок α , угол скоса кромки β ($30-50^\circ$); зазор между стыкуемыми кромками b , притупление кромок c , длина скоса листа при разности толщин L , смещение кромок относительно друг друга Δ . Угол разделки кромок $\alpha=(60-90^\circ)$ выполняется при толщине металла более 3мм, поскольку его отсутствие (разделки кромок) может привести к непровару по сечению сварного соединения, при отсутствии кромок увеличивается величина сварочного тока [28].

При толщине листов до 3 мм сварку можно вести за один проход на подкладках, которые одновременно служат и для защиты обратной стороны шва. С этой точки зрения нахлесточные, угловые и тавровые соединения менее технологичны. Металл толщиной 4-6 мм можно сваривать без скоса кромок за два прохода с двух сторон [29].

Согласно [19,27], параметры режима сварки выбирают исходя из толщины свариваемого металла и требуемой формы сварного шва, которая определяется глубиной проплавления и шириной шва. Режим сварки определяют по экспериментальным (справочным) таблицам или приближенным расчетом с последующей проверкой на технологических пробах. Обычно

режим сварки выбирают в следующем порядке: в зависимости от толщины свариваемого металла выбирают диаметр электродной проволоки, затем в зависимости от диаметра устанавливают силу сварочного тока, далее скорость подачи электрода и скорость сварки. При автоматической сварке [19] определяют скорость подачи проволоки и сварки, при механизированной сварке – скорость подачи проволоки.

Прожоги образуются в связи с высокой жидко текучестью алюминия и низкой прочностью при высоких температурах. Для их предотвращения при однослойной сварке или сварке первых слоев в многопроходных швов с большой погонной энергией необходимо применять формирующие подкладки из графита или стали. Пористость-один из основных дефектов, вызванный в первую очередь водородом. На рисунке 1.10 представлен изменение прочности и пластичности растворимости водорода.

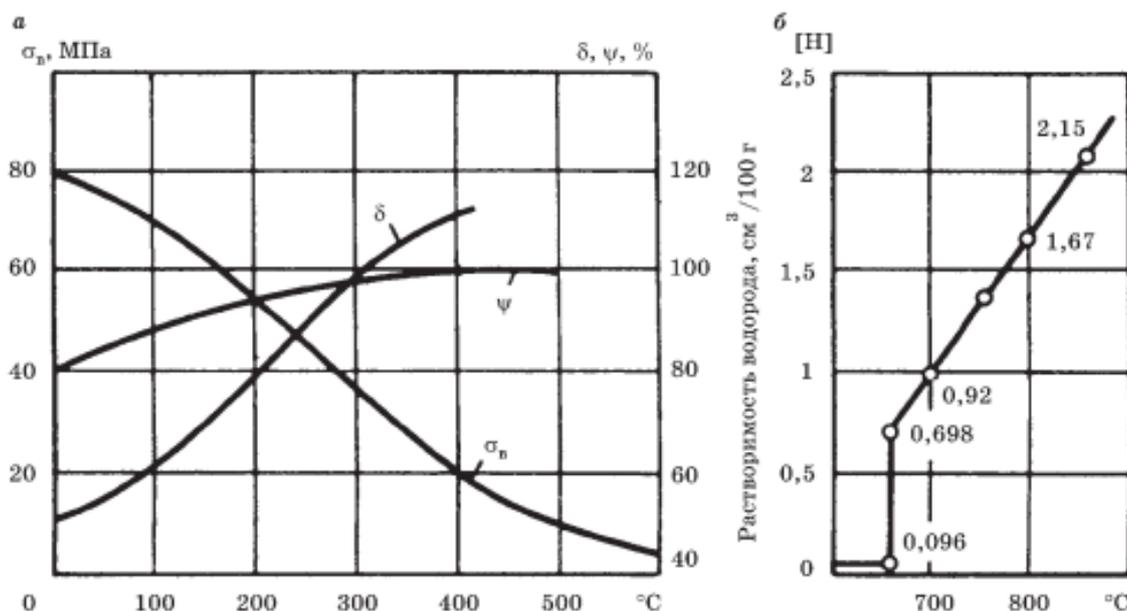


Рисунок 1.10. Изменение прочности и пластичности (а) и растворимости водорода (б) в алюминии в зависимости от температуры нагрева является влажность защитной среды присутствие газов и влаги на поверхности свариваемого материала и сварочной проволоки

В твердом алюминии водород практически нерастворим (рис.1.10б). Растворимость водорода наблюдается лишь при нагреве выше 660°C , снижается при введении алюминий Cu, Si Sn и растет при легировании Mn Ni Mg Fe и Cr. Упрочняемым алюминиевым сплавам относятся 6000 сплавы Al-Mg-Si, и не упрочняемым термической обработкой относят 5000 Al-Mg сплавы. Сплавы бxxx-групп имеют широкое применение, особенно в строительстве, авиационной и автомобильной промышленности [30]. В работе [31] рассматриваются материалы 5083 и 6082, как представители алюминиевых сплавов, которые хорошо свариваются лазерной сваркой. Способами сварки достигают приемлемых прочностей сваркой с малой теплотой, таким образом, меньшее влияние на микроструктуру, базовые материалы подвергаются уменьшенным искажениям [32]. Из рисунка 1.11 источника [31] следует, что результаты показывают, что сплав EN AW-5083 достигает тех же температур при более низких уровнях мощности, чем сплавы EN AW-6082 и EN AW-1050 при мощности лазера. Дальнейшее увеличение мощности приводит к линейному повышению температуры.

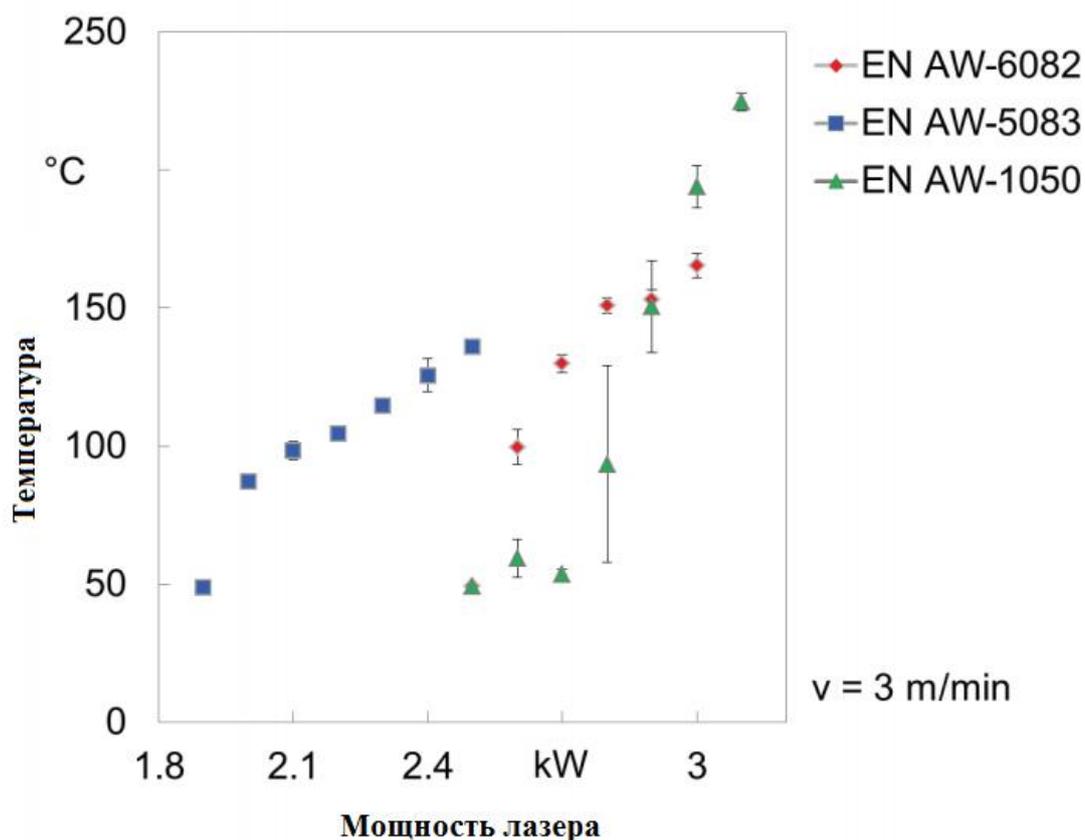


Рисунок 1.11 – Температура на поверхности, обращенной от лазера

Сплав EN AW6082 является одним из алюминий-магний-кремниевых сплавов и обладает очень хорошей свариваемостью, но его прочность снижается в зоне сварки[33].

Алюминий-магниевые сплавы представляют собой сплавы без термической обработки, которые обеспечивают хорошие механические свойства, коррозионной стойкости, хорошей обрабатываемости и свариваемости [34]. Во многих исследованиях основное внимание уделялось сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов, и хорошо известно, что некоторые из алюминиевых сплавов не могут быть сварены методом сварки плавлением. Согласно источнику [35] воздействие повышенных температур выше 150°C для сплавов 6082 и 250°C для 5083-N116 в течение любого периода времени приводит к изменению механических свойств как для алюминиевых сплавов 5083, так и 6082. Для обеих пластин 5083-N116

минимальное значение остаточного предела текучести происходит при 500 °С. Было обнаружено, что избыток Si ($Mg / Si > 1,73$) оказывает отрицательное влияние на пластичность сплавов Al-Mg-Si без наличия дополнительных легирующих элементов [36]. AA6XXX и AA5XXX виды алюминиевых сплавов, наиболее широко применяемые в сварочной области [37,38]. В алюминиевых сплавах бxxx группы образуют внутри интерметаллические частицы, которые образуются во время затвердевания. Легирующие элементы как Fe, Mn и Cr вызывает формирование нового фазового компонента [30]. Алюминий 5083 характеризуется хорошей свариваемостью, отличной коррозионной стойкостью и умеренной прочностью [38]. Алюминиевые сплавы с числом «6» в качестве первой цифры в обозначении сплава легируются комбинацией магния и кремния. Магний и кремний объединяются с образованием силиката магния (Mg_2Si), который, в свою очередь, образует простую эвтектическую систему с алюминием.

Появление пор в металле сварного шва может быть вызвано [54]:

- плохим качеством или неправильным подбором типа электродов;
- неправильным выбором технологического процесса сварки;
- малой продолжительностью существования сварочной ванны, вследствие чего газы не успевают выделиться из расплавленного металла;
- низким качеством основного и присадочного металла;
- плохой очисткой кромок

Основоположником макроструктурного анализа является русский инженер П.П. Аносов, который применил его для определения качества металла. Методов подготовки шлифов впервые были описаны Д.К. Черновым. В настоящее время макроструктурный анализ является наиболее распространенным методом предварительной оценки качества сварного соединения, выполненного тем или иным способом. Под макроструктурой сварных соединений понимают их строение, которое можно наблюдать на поверхности макрошлифов, приготовленных из этих соединений, невооруженным глазом или при увеличении 30 раз. Макрошлифом называют

образец со шлифованной и протравленной поверхностью, вырезанный из сварного соединения с целью на макро исследования. В отдельных случаях, когда необходимо определить макроструктуру, не прибегая к вырезке специального образца, макрошлифы готовятся непосредственно на сварном соединении (изделии). В сварных соединениях с помощью макроструктурного анализа выявляют форму и размеры шва, площадь и форму провара основного металла, направленность, рост и размеры кристаллитов, рост и размеры околошовной зоны, наличие в соединении в основном металле различных дефектов: непроваров, трещин, пор, шлаковых включений, химических неоднородностей. На основе данных макроструктурного анализа измерения твердости характерных участков сварного соединения можно составить предварительное, но весьма определенное представление о качестве сварного соединения можно составить предварительное, но весьма определенное представление о качестве сварного соединения и о тех изменениях, которые нужно внести в технологию сварки для улучшения качества швов [53].

Высокое качество достигается за счет надежной защиты расплавленного металла от взаимодействия с воздухом, его металлургической обработки и легирования расплавленным шлаком. Наличие шлака на поверхности шва уменьшает скорость кристаллизации металла сварочной ванны и скорость охлаждения сварного соединения. В результате металл шва не имеет пор, содержит пониженное количество неметаллических включений. Улучшение формы шва и стабильности его размеров, особенно глубины проплавления, обеспечивает постоянство химического состава и других свойств по всей длине шва [29].

Механические испытания определяют прочность и надежность сварных соединений. Основные методы определения механических свойств сварных соединений и их отдельных зон установлены в ГОСТ 6996-66. Он предусматривает статические и ударные испытания при нормальных а в некоторых случаях и при пониженных или повышенных температурах. Для

сварных соединений ответственных конструкций, изготовленных из высокопрочных материалов или предназначенных для работы в условиях отрицательных температур и вибрационных нагрузок, дополнительно проводят испытания на устойчивость против хрупкого разрушения и усталостную прочность. Механические испытания по характеру нагружения разделяют :

- на статические, при осуществлении которых усилие плавно возрастает или длительное время остается постоянным;
- динамические – усилие возрастает практически мгновенно и действует короткое время;
- усталостные – нагрузка многократно (при числе циклов от десятков до миллионов) величине и знаку.

Стыковые сварные соединения подвергают следующим статическим испытаниям: на растяжение, изгиб, ползучесть, твердость и т.д. Испытания на растяжение с целью определения прочности и пластичности сварного соединения. Для определения временного сопротивления σ_b сварного соединения при растяжении (представляющего себе напряжение, которое отвечает наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца) применяют образцы двух типов: один из них, с валиком шва на лицевой поверхности, позволяет найти относительное значение σ_b шва в сравнении с σ_b основного металла, а другие, у которых валик шва снят с основным металлом и выполнено специальная выточка шва, предопределяющая место разрушения [54,55].

Качество сварного соединения зависит от сварочных материалов (электродов, электродной проволоки, флюсов, защитных газов), квалификации заготовителей, сборщиков, сварщиков, качества металла, заготовок элементов конструкции для сборки, качества приспособлений, технического состояния технологического процесса, культуры и организации производства. Сварная конструкция должна быть спроектирована рациональна и с учетом возможности последующей диагностики. Необходимо помнить, что нерациональная сварная конструкция всегда потенциально опасно, поскольку

ее невозможно качественно проконтролировать. Изготовить сварную конструкцию совершенно без дефектов практически невозможно. Задача состоит в том, чтобы сварное изделие было с минимальным количеством допустимых несплошностей. В зависимости от вида, размера и места расположения дефекты можно подразделить (с учетом степени влияния на качество сварных соединений) на несплошности сварных соединений допустимые и недопустимые. Вид и размер допустимых и недопустимых дефектов зависят от условий эксплуатации конструкции и указываются в технических условиях (ТУ) на изготовление. По расположению в сварных соединениях дефекты бывают наружные, внутренние и сквозные. К наружным дефектам относятся изменения формы шва (неодинаковая ширина и высота, наплывы, бугристость, свищи, подрезы, резкие или крутые переходы шва к основному металлу, чрезмерная либо недостаточная высота усиления шва и др.). Внутренние дефекты – это газовые, шлаковые и инородные включения, трещины, непровары и несплавления, дефекты структуры. Сквозные несплошности-трубчатые поры, прожоги, трещины, непровары, несплавления, шлаковые пробки и др. По природе образования дефекты подразделяется на следующие:

- возникающие из-за пороков основного металла (расслоений, трещин, сульфидных включений, раковин, плен, закатов и др.) При этом в сварных соединениях могут возникать дефекты формирования (непровары, подрезы, прожоги, неравномерная ширина и высота шва, наплывы и др.), трещины, шлаковые и газовые включения, выплески и др;
- образующиеся в результате неудовлетворительной подготовки и сборки деталей под сварку: остатки ржавчины, окалин, графа и другие загрязнения на кромках и вблизи них; неправильная разделка кромок деталей; превышение размера кромок и неравномерный зазор между ними, трещины и непровары в прихватках, жесткое закрепление собранных деталей, исключаящее их перемещение при усадке металла шва, перекося собранных деталей и др. Все это приводит к образованию в швах пор и шлаковых

включений, дефектов формирования, непроваров, трещин выплесков, недопустимых деформаций;

- появляющиеся вследствие несоответствия химического состава основного и присадочного материала и неудовлетворительной свариваемости; трещины, дефекты структуры, низкие физические и механические свойства соединения;

- обусловленные составом и технологическими свойствами флюса, защитных газов, условиями защиты сварочной ванны и т.п.: трещины, шлаковые и газовые включения, дефекты формирования, повешенное содержания в металле шва кислорода, азота, серы, фосфора и др.;

- пороки сварных соединений, связанные с нарушением технологии сварки и термообработки: непровары, прожоги, выплески, шлаковые и газовые включения, трещины, дефекты формирования, подрезы, закалка околошовной зоны и дефекты структуры, значительные деформации, кратеры и др.

- возникающие в процессе транспортировки, монтажа и эксплуатации сварных конструкций: задиры, деформации, надрывы, трещины, коррозионные повреждения.

Дефекты также разделяются по форме: плоские, округлые или объемные. Примером первых являются трещины и непровары, вторых- поры и твердые включения; по величине: малые, средние, крупные; по массовости: единичные, групповые и распространенные [55].

В результате взаимодействия алюминия с газами окружающей атмосферы возможно образование карбидов, нитридов и окислов алюминия.

Нитриды и карбиды алюминия также, как и окись алюминия, имеют высокую температуру плавления, не растворяются ни в твердом, ни в жидком металлах и образуют на его поверхности твердые пленки. В связи с этим становится понятной необходимость защиты сварочной ванны от взаимодействия не только с кислородом и водяными парами, но также и от взаимодействия, с азотом и сложными газами.

Судя по многочисленным литературным данным, в большинстве случаев аргоно-дуговой сварки плавящимся и неплавящимся электродами в ванне наблюдается дополнительное растворение водорода. По результатам, полученным автором и с сотрудниками, концентрация водорода в металле швов, определенная экспериментально, намного выше рассчитанной по долям участия основного и присадочного металлов в образовании шва.

Вероятными источниками дополнительного водорода, растворяющегося в ванне в условиях аргоно-дуговой сварки алюминия, могут быть: 1) водород, содержащийся в защитном газе, и водород, образующийся в результате диссоциации в дуге паров воды, присутствующих в нем или попадающих в зону дуги из атмосферы; 2) водород, содержащийся в основном металле, переходящий в шов в результате диффузии, в связи с большей растворимостью в жидком металле; 3) водород, образующийся в результате взаимодействия с нагретым металлом влаги, адсорбированной поверхностями основного и присадочного металлов, и влаги, входящей в состав гидратированных окислов[58].

1.3. Современные методы сварки малой теплотой алюминиевых сплавов

Новый технологический уровень сварочного оборудования задает высокие требования к сварочному оборудованию, основными из которых являются[57]:

- Качество и производительность сварки,
- Унификация – ограниченный набор узлов для различного сварочного оборудования,
- Универсальность – все возможные способы сварки: РД, РАД, МП, МАДП, МПИ,
- Энергоэффективность: КПД > 90%, • Широкий температурный диапазон работы: -40С - +50С,

- Высокая нагрузочная способность при 40С ПН=100%,
- Малый вес и габариты,
- Возможность работы на «длинном» кабеле и от генератора,
- Надежность и ремонтпригодность,
- Конкурентная стоимость приобретения и эксплуатации.

При сварке с короткими замыканиями для стабилизации процесса сварки автоматически изменяются на каждом цикле сварки:

- скорость нарастания тока при коротком замыкании,
- скорость спада тока при дуговом процессе,
- продолжительность дугового процесса,
- напряжение дугового процесса.

Высокая производительность сварки достигается применением:

- импульсной сварки,
- комбинированных процессов,
- механизированной, автоматизированной и роботизированной сварки,
- форсированных режимов сварки,
- дистанционных пультов,
- продолжительной непрерывной работой источника,
- длинных (до 100м) соединительных кабелей для подающего механизма,
- «цифровых» горелок с кнопками и дисплеем.

Уменьшение разбрызгивания при сварке с короткими замыканиями обеспечивается:

- резким снижением тока при наступлении и завершении короткого замыкания,
- оптимальным управлением формой нарастания тока при коротком замыкании,
- соблюдением оптимального баланса продолжительности КЗ и дугового процесса.

До этого времени, под холодной дугой или сваркой малой теплотой, понимали холодную сварку под давлением. Холодная сварка это –сварка

давлением при значительной пластической деформации без внешнего нагрева соединяемых поверхностей [39]. В настоящее время рынок промышленной индустрии предлагает большой спектр оборудований для различных сплавов. С каждым годом растет спрос на модернизацию оборудования, связи с этим производители разных стран каждый раз совершенствует оборудования. Из литературного источника [40] вытекает, подавляющее часть объема сварочных работ приходится на традиционные способы сварки (плавлением): электродугую (70-80% от общего объема работ), контактную и газовую. Термин холодная сварка подразумевает сварку под давлением, поэтому целесообразно использовать термин сварка с минимальной теплоотдачей. Минимальная теплоотдача является актуальным решением для многих производств при сварке цветных металлов. На рисунке 1.12 представлены основные фирмы, выпускающие оборудование, на котором реализуются процессы сварки с коротким замыканием.

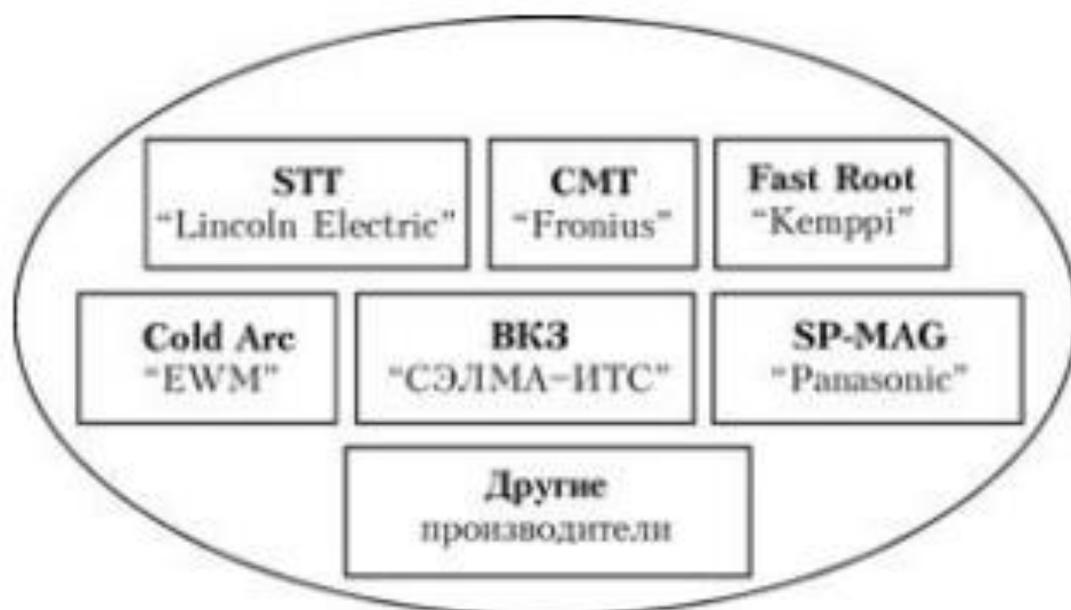


Рисунок 1.12 – Фирмы-производители оборудования процесса сварки в защитных газах с коротким замыканием

На следующем рисунке показан сравнение между стандартной дугой и дугой минимальной теплоотдачей [41].

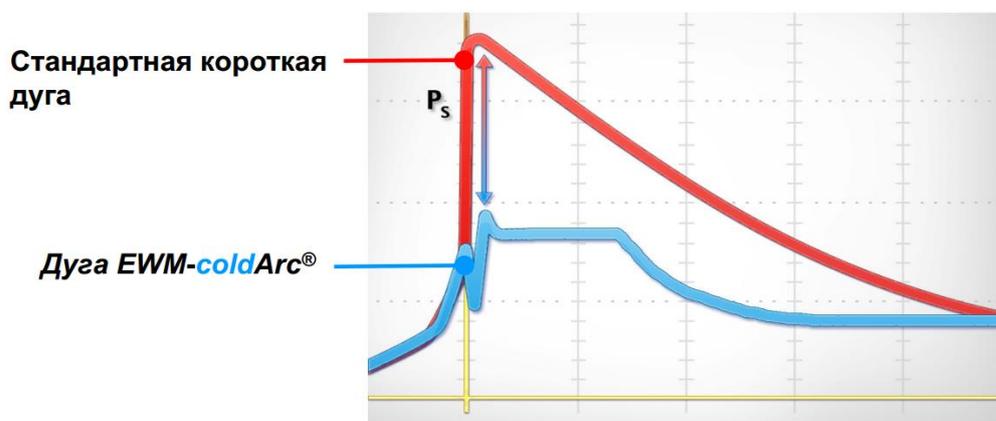


Рисунок 1.13 – Сравнение сварочных дуг стандартная и дуга EWM-coldArc

Очень много попыток было улучшить поведения короткой дугой при зажигании после короткого замыкания и использования ее малым теплом вложением. Из источника [41] известно, что, еще в 80-е годы осуществлялась снижение тока непосредственно перед разрывом закорачивающегося моста и после этого подводили к нему высокий импульс напряжения для облегчения зажигания. В результате снижалось брызгообразование, но тепло вложения снижалось незначительно, [42] и [43]. Следующим этапом на этом пути стали модифицированные короткие дуги ChopArc [44] и [45] благодаря чему был достигнут значительный прогресс в сварке МАГ диапазоне тонких листов от 0,8 до 0,2 мм. Более того, была разработана адаптивная система регулирования, которая оптимизировала качество процесса в режиме реального времени, [46]. Модернизированные разработки работают с прерывистой подачей проволоки, то есть длительность короткого замыкания уменьшается благодаря тому, что проволочный электрод при коротком замыкании незначительно оттягивается, чтобы лучше разорвать закорачивающийся мост[41].

Таким образом был получен процесс с минимальной теплоотдачей, минимальная мощность и малая брызгообразования[47]. Благодаря модернизированным технологиям можно использовать различные виды дуг. На следующем рисунке 1.14 показаны виды дуг в оборудовании EWM-Coldarc [41].

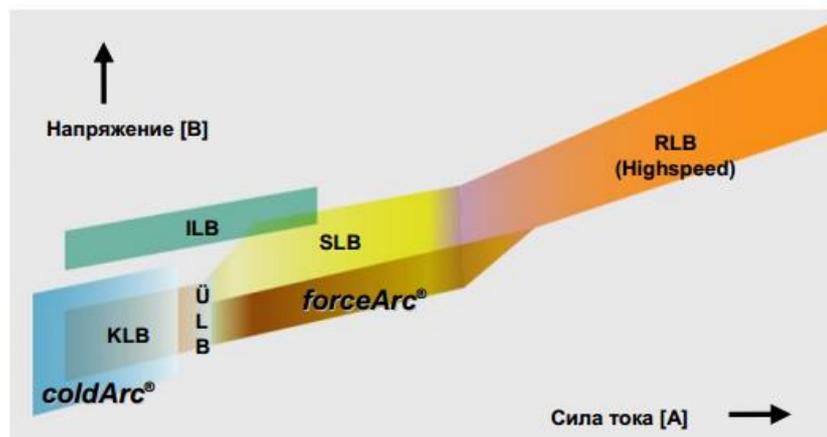


Рисунок 1.14 – Виды дуг

Из рисунка видно, что дуга минимальной теплоотдачей, где минимальный ток и напряжение это- Coldarc, далее forceArc – верхний диапазон мощности.

СМТ процесс известен как Cold Metal Transfer (холодный перенос металла) производство компании Фрониус, известно с 2005 года. Как уже писал журнал [15], революционность СМТ процесса, состоит в том, что в ней впервые в ходе сварки (пайки) напрямую используется процесс движения проволоки, а цифровое управление позволяет оперативно обнаруживать момент короткого замыкания и отделять металл в сварочную ванну буквально по капле. На следующем рисунке 1.15 представлены виды дуг, с которыми работает процесс СМТ.

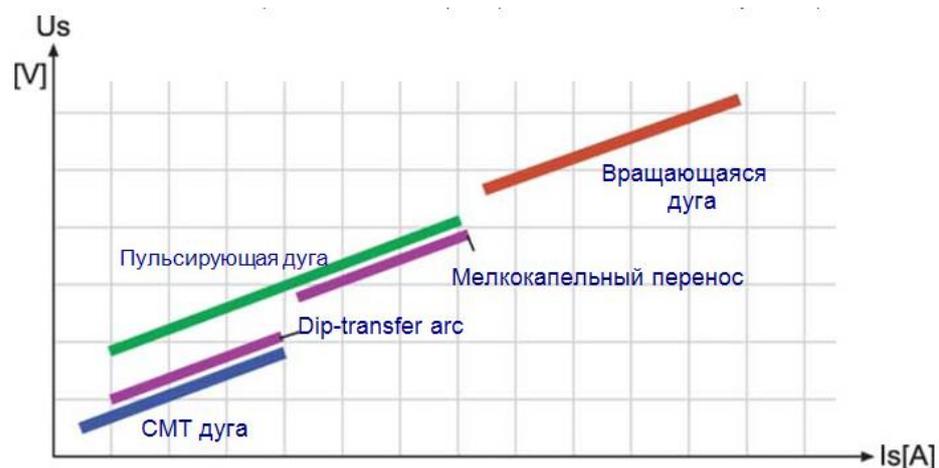


Рисунок 1.15 – Виды дуг

СМТ дуга предназначена для цветных материалов где требуется минимальная мощность, которая соответствует минимальная теплоотдача, формирующая качественный сварочный шов.

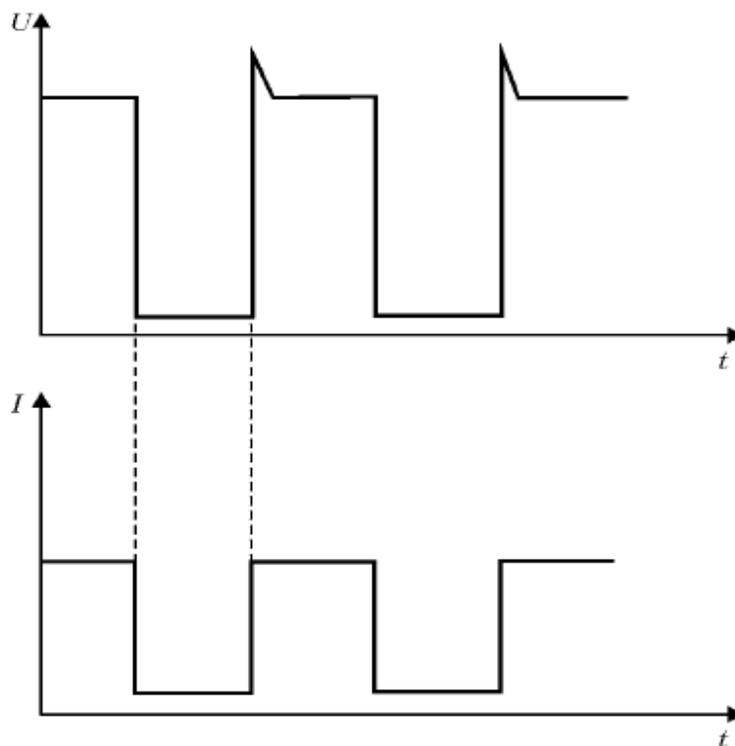


Рисунок 1.16 – Переход материала в шов, осуществляемый почти без тока

Cold Metal Transfer (CMT) - проверенный тип сварочного метода с использованием металлического инертного газа (MIG). С помощью CMT процесса соединять не только одинаковые материалы, но и разнородные материалы[49]. При CMT тепловой эффект постоянно меняется с горячего на холодный, создавая подобие контрастного душа [50]. Минимальной теплоотдачей также занимается известная немецкая фирма Merkle, процесс называется ColdMiG. Теплоотдача при этом методе на 20-30% меньше чем при традиционной сварке. Модернизированная технология сварки SpeedRoot создана компанией Lorch для разрешения многих проблем, при процессе сварки по новой технологии сварной шов заполняется еще «холодным» металлом, и вероятность разрыва перетекающей капли контролируется умной электроникой, также при этом минимальна передача тепла на свариваемые детали[40]. Свой вклад в развитие холодной дуги сделало финский производитель сварочного оборудования Kemppi. Известны методы сварки как Wise Root-сварочный процесс холодной дуги и WiseThin -для сварки тонколистового материала.

В последние годы для сварки тонколистового металла находит применение импульсная дуга. Основной металл расплавляет дугой, горячей периодически отдельными импульсами постоянного тока с определенными интервалами во времени [51]. Оптимизация приведенных параметров, воздействующих на перенос металла при сварке плавящимся электродом зависит от конкретных технологических задач рисунок 1.14 [52].

В рисунке 1.17 показан оптимизация импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом. Наиболее высокое качество соединений обеспечиваются автоматическая и ручная сварка неплавящимся электродом, а минимальную коррозионную стойкость-ручная сварка покрытыми электродами.



Рисунок 1.17 – Схема основных параметров сварочного процесса, воздействующих на перенос металл электрода

Оптимизация приведенных на рисунке 1.17 параметров, воздействующих на перенос металла при сварке плавящимся электродом, зависит от конкретных технологических задач. Как правило, сначала оптимизируется какой-либо один параметр, а затем с учетом эффективности управления — следующий [52].

Дуговые и плазменные источники теплоты также способны создавать на поверхности металла довольно высокие температуры, например у сталей –до 230К. При электрошлаковом процессе температура жидкого присадочного металла, проходящего через активную зону шлаковой ванны (где выделяется теплота), достигает температуры шлака, которая в средней по высоте части шлаковой ванны составляет 2100...2200 К, а на поверхности шлака около 2000 К. При способах сварки плавлением, особенно с использованием дуги, происходит интенсивное перемешивание жидкого металла как вследствие его движения итак головной части ванны в хвостовую, так в результате воздействия источника теплоты на жидкий металл. Происходит интенсивный

теплообмен между отдельными порциями различно нагретого жидкого металла, а также отвод теплоты в твердый металл. Поэтому состояние ванны целесообразно характеризовать не только возможными максимальными и минимальными температурами, но и средней температурой жидкого металла. Она зависит от режима сварки (сварочного тока, напряжение дуги, скорости сварки), характера подачи присадочного металла, устойчивости дуги и положения ее активного пятна. Например, средняя температура ванны при аргонодуговой сварке алюминиевого сплава АМг6 может изменяться от 650 до 780⁰С (при возрастании тока от 300 до 450А) при $U_d=14В$ и от 800 до 930⁰С при $U_d=8В$, в то время как температура плавления сплава АМг6 составляет 610⁰С [59].

Выводы

1. Сварка алюминиевые сплавов сопровождаются такими трудностями как: наличие оксидной пленки, горячие и холодные трещины, пористость, которые усложняют процесс сварки и требует применения специального сварочного оборудования.

2. При уменьшении диаметра электродной проволоки плотность тока в ней увеличивается, уменьшается блуждание дуги, происходит концентрация теплоты на малой площади сварочной ванны, и глубина провара возрастает, ширина шва при этом уменьшается. Это позволяет при сварке электродной проволокой малого диаметра сравнительно на небольших токах получать глубокий провар.

3. Проволока недостаточного диаметра может вызывать дуговые разряды между проволокой и внутренней поверхностью наконечника, что приводит к повышенному изнашиванию наконечника и его сплавлению с проволокой. Проволока слишком большого диаметра требует излишнего усилия при подаче, приводит к закупориванию наконечника, рывкам проволоки и простоею оборудования.

4. Химический состав сварочной проволоки влияет на качество и прочность сварного шва.

5. Состав защитного газа существенно влияет на качество сварного шва и зависит от марки свариваемого материала и типа соединения. Аргон и аргонно-гелиевая смесь обеспечивает высокую стабильность горения дуги и тепловую мощность.

6. Скорость подачи проволоки является одним из наиболее важных параметров режима сварки. При недостаточной скорости подачи проволоки возможны периодические обрывы дуги, при слишком большой скорости происходят частые короткие замыкания электрода на сварочную ванну.

7. Одним из наиболее важных параметров, характеризующих качество сварного шва, является временное сопротивление растяжению (предел прочности σ_B).

9. До настоящего времени не было работ связанных с контактной дуговой сваркой (СМТ) плавящимся электродом в среде инертных газов алюминиевых сплавов 6082 и 5083 при толщине листа 2 мм, широко применяемых для изготовления труб.

10. Не рассматривались комплексные работы, в которых было рассмотрено влияние микроструктур на свойства сварочного шва и основного материала. В абсолютном большинстве современных исследований отсутствуют данные о влиянии сварки (СМТ) на механические свойства получаемых соединений.

11. В настоящее время отсутствуют математические зависимости характеризующие влияние режима и условий контактной дуговой сварки плавящимся электродом в среде инертных газов сварки на качественные показатели сварного шва.

На основании анализа проблемы и в соответствии с целью исследований разработаны задачи исследований:

1. Определить режимы и условия СМТ сварки позволяющие получить высокое качество сварного шва.

2. Определить характер влияния основного параметра режима СМТ сварки и дефекта сварного шва на характеристики прочности сварных швов.

3. Разработать математические модели отражающие характер влияния параметра режима и дефекта СМТ сварки на качество сварного шва.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Материалы для сварки AW6082T6 (Al-Mg-Si), 5083 (Al-Mg)

С целью решения поставленных задач и в соответствии с целью исследований проведены испытания сварка алюминиевых сплавов. Для сварки алюминиевых сплавов были выбраны алюминиевые сплавы по ГОСТ 4784-97, которые хорошо свариваются. В качестве материала исследований выбраны сплавы серии AW6082T6 (Al-Mg-Si), 5083 (Al-Mg). Российские аналоги материалов AW6082T6 - АД35, 5083- АМг4,5. Химические составы сплавов приведены в таблицах 2.1, 2.2. Выбор присадочного материала осуществлялся по виду основного материала, принимая во внимания механические и химические нагрузки [28]. Диаметр проволоки заранее был определен, проделаны эксперименты с диаметром проволок 1,2 и 1,6 мм. В качестве сварочной проволоки применялся сплав 5087 (AlMgMn) и 5183(AlMg4,5Mn0,7). Химический состав проволоки приведен в таблице 2.3 Для сварки использовались листы толщиной 2 мм.

Химический состав сплава 6082 AlSi1MgMn (масс. %)

Таблица 2.1

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0,7-1,3	0,5	0,1	0,40-1,0	0,6-1,2	0,25	0,2	0,1	ост.

Химический состав сплава AlMg4,5 5083 (масс. %)

Таблица 2.2

Mg	Fe	Cu	Mn	Si	Cr	Zn	Ti	Al
4,0-4,9	0,40	0,10	0,40-1,0	0,40	0,05-0,25	0,25	0,15	ост.

**Химический состав сплава AlMg4,5Mn Zr 5087 (сварочная проволока)
(масс. %)**

Таблица 2.3

Mg	Fe	Cu	Mn	Si	Cr	Zn	Ti	Al
4,5-5,2	0,40	0,05	0,7-1,1	0,25	0,05-0,25	0,25	0,15	ост.

**Химический состав сплава AlMg4,5Mn0,7 5183 (сварочная проволока)
(масс. %)**

Таблица 2.4

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Be	Ti	Al
0,4	0,4	0,1	0,5	4,3	0,05	0,25	0,008	0,06	Осн.

2.2 Оборудование для сварки, технология СМТ

Сварные соединения серии 6082 (Al-Mg-Si) и 5083 (Al-Mg) получали методом сварки СМТ Cold Metal Transfer (Холодный перенос металла). Все эксперименты проводились в техническом университете Клаусталь (Германия), в институте «Сварки и резки металлов». Ниже представлена оборудование СМТ от фирмы «Фрониус» рисунок 2.1. На рисунке цифрами обозначены 1-сварочный робот «Кука», 2-

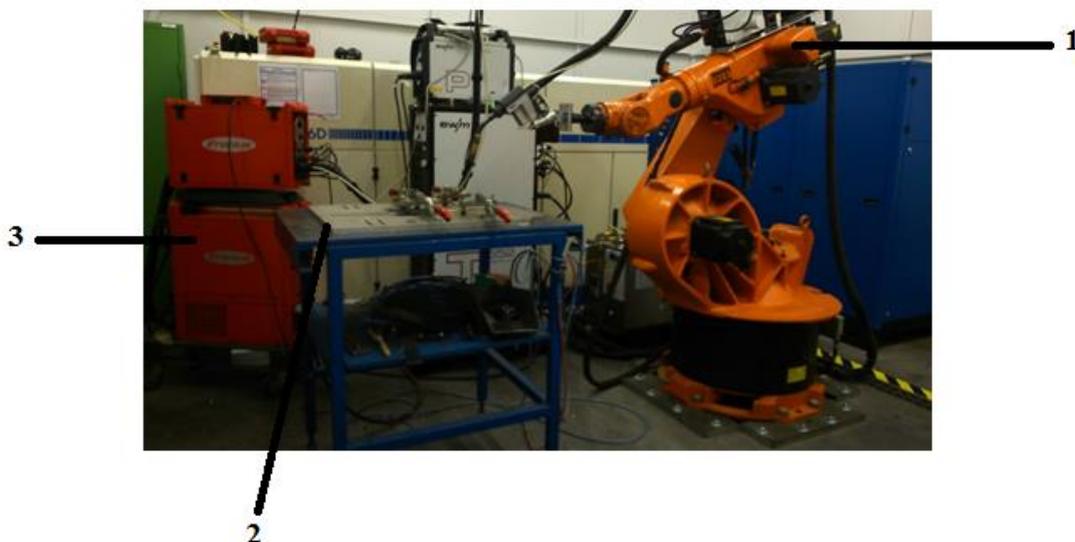


Рисунок 2. 1 – Сварочное оборудование СМТ,1-сварочный робот «Кукa»,2-сварочный стол,3-сварочная установка

Сварочный аппарат компании «Фрониус» отличается цифровыми панелями управления и встроенной подачей проволоки, что намного облегчает процесс сварки. СМТ означает «холодный» перенос материала, который обеспечивает стабильную дугу и более точное управление процессом. На рисунке 2.2. показан принцип работы СМТ, при сварке проволока движется вперед, а как только происходит короткое замыкание, она отводится назад. За счет этого сама дуга в фазе горения оказывает тепловое воздействие в очень короткий промежуток времени. В фазе горения дуги присадочный материал переносится в ванну. При погружении присадочного материала в ванну дуга гаснет. Сварочный ток уменьшается. Обратное движение проволоки способствует отрыву капли во время короткого замыкания. Ток короткого замыкания поддерживается при низком уровне. Направление движение проволоки меняется и процесс начинается заново.



Рисунок 2. 2 – Принцип работы СМТ дуги

При сварке СМТ возможны такие виды как: СМТ и СМТ импульс. СМТ импульс имеет большее тепловое воздействие на материал чем при сварке СМТ. Целенаправленное регулирование импульсов обеспечивает большой диапазон мощности. На рисунке 2.3 показана общая установка и состав СМТ системы.

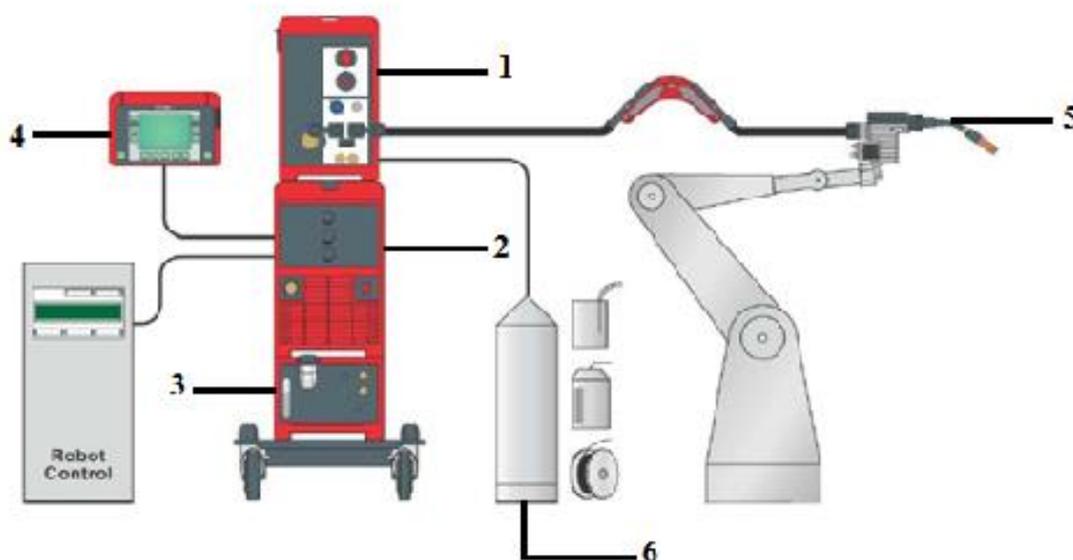


Рисунок 2. 3 – Общая установка и состав СМТ системы

СМТ система состоит из 1-устройство для подачи проволоки, 2-источник тока с цифровым управлением, 3-блок охлаждения, 4-пульт для дистанционного управления, 5-сварочная горелка, которая обеспечивает точную подачу проволоки и постоянное прижимное усилие, 6-газ.

2.3 Подготовка алюминиевых листов для сварки

На рисунке 2.4., показан процесс снятия оксидного слоя с алюминиевых сплавов с помощью абразивного круга. Специальная машина, насадка из электрокорунда, основа абразивного круга состоит из высокопроцентный оксид алюминия Al_2O_3 с добавлением окиси кальция. Во время рабочего процесса, были надеты специальные наушники, защитные очки и перчатки. Лист для сварки был закреплен в тисках с двух сторон. Операция шлифования удаляет с поверхностей различные виды загрязнений. После образцы были очищены этиловым спиртом (этанол) и протравлены 5% гидроксидом натрия NaOH «каустической соды». Рисунок 2.5 показывает готовые листы для сварки. Угол разделки кромок $\alpha=(60-90^0)$ выполняется при толщине металла более 3мм, поскольку его отсутствие (разделки кромок) может привести к непровару по сечению сварного соединения, при отсутствии кромок увеличивается величина сварочного тока [28].



Рисунок 2. 4 – Зачистка листов для сварки.

Размеры листов для сварки 200x105 мм.

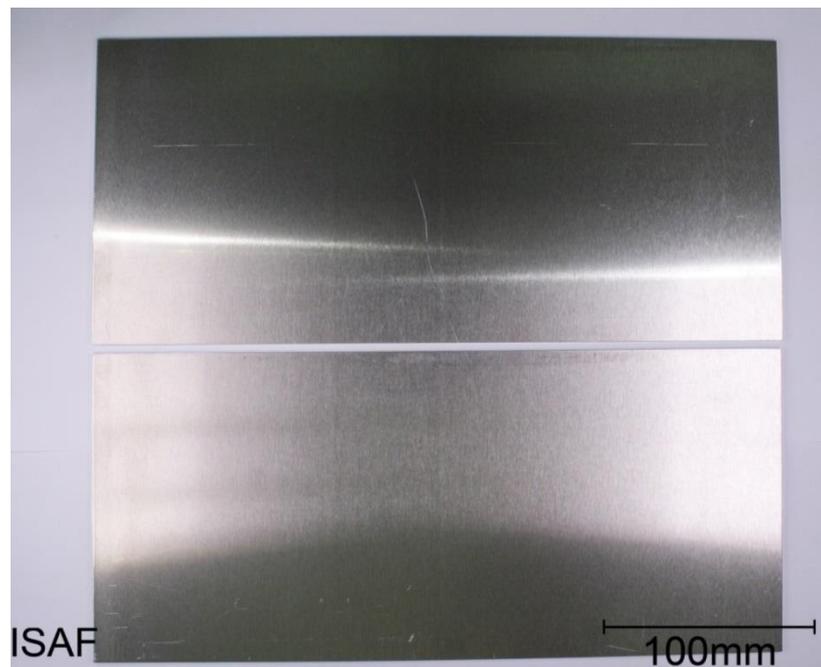


Рисунок 2. 5 – Готовые листы для сварки

2.4 Дефекты сварки и методы их устранения

Качество сварного соединения зависит от сварочных материалов (электродов, электродной проволоки, флюсов, защитных газов), квалификации заготовителей, сборщиков, сварщиков, качества металла, заготовок элементов конструкции для сборки, качества приспособлений, технического состояния технологического процесса, культуры и организации производства. Сварная конструкция должна быть спроектирована рациональна и с учетом возможности последующей диагностики. Необходимо помнить, что нерациональная сварная конструкция всегда потенциально опасно, поскольку ее невозможно качественно проконтролировать. Изготовить сварную конструкцию совершенно без дефектов практически невозможно. Задача состоит в том, чтобы сварное изделие было с минимальным количеством допустимых несплошностей. В зависимости от вида, размера и места расположения дефекты можно подразделить (с учетом степени влияния на качество сварных соединений) на несплошности сварных соединений

допустимые и недопустимые. Вид и размер допустимых и недопустимых дефектов зависят от условий эксплуатации конструкции и указываются в технических условиях (ТУ) на изготовление. По расположению в сварных соединениях дефекты бывают наружные, внутренние и сквозные. К наружным дефектам относятся изменения формы шва (неодинаковая ширина и высота, наплывы, бугристость, свищи, подрезы, резкие или крутые переходы шва к основному металлу, чрезмерная либо недостаточная высота усиления шва и др.). Внутренние дефекты – это газовые, шлаковые и инородные включения, трещины, непровары и несплавления, дефекты структуры. Сквозные несплошности-трубчатые поры, прожоги, трещины, непровары, несплавления, шлаковые пробки и др. По природе образования дефекты подразделяется на следующие:

- возникающие из-за пороков основного металла (расслоений, трещин, сульфидных включений, раковин, плен, закатов и др.) При этом в сварных соединениях могут возникать дефекты формирования (непровары, подрезы, прожоги, неравномерная ширина и высота шва, наплывы и др.), трещины, шлаковые и газовые включения, выплески и др;
- образующиеся в результате неудовлетворительной подготовки и сборки деталей под сварку: остатки ржавчины, окалин, графа и другие загрязнения на кромках и вблизи них; неправильная разделка кромок деталей; превышение размера кромок и неравномерный зазор между ними, трещины и непровары в прихватках, жесткое закрепление собранных деталей, исключаящее их перемещение при усадке металла шва, перекося собранных деталей и др. Все это приводит к образованию в швах пор и шлаковых включений, дефектов формирования, непроваров, трещин выплесков, недопустимых деформаций;
- появляющиеся вследствие несоответствия химического состава основного и присадочного материала и неудовлетворительной свариваемости; трещины, дефекты структуры, низкие физические и механические свойства соединения;

- обусловленные составом и технологическими свойствами флюса, защитных газов, условиями защиты сварочной ванны и т.п.: трещины, шлаковые и газовые включения, дефекты формирования, повешенное содержания в металле шва кислорода, азота, серы, фосфора и др.;
- пороки сварных соединений, связанные с нарушением технологии сварки и термообработки: непровары, прожоги, выплески, шлаковые и газовые включения, трещины, дефекты формирования, подрезы, закалка околошовной зоны и дефекты структуры, значительные деформации, кратеры и др.
- возникающие в процессе транспортировки, монтажа и эксплуатации сварных конструкций: задиры, деформации, надрывы, трещины, коррозионные повреждения.

Дефекты также разделяются по форме: плоские, округлые или объемные. Примером первых являются трещины и непровары, вторых - поры и твердые включения; по величине: малые, средние, крупные; по массовости: единичные, групповые и распространенные [55].

В результате взаимодействия алюминия с газами окружающей атмосферы возможно образование карбидов, нитридов и окислов алюминия.

Нитриды и карбиды алюминия также, как и окись алюминия, имеют высокую температуру плавления, не растворяются ни в твердом, ни в жидком металлах и образуют на его поверхности твердые пленки. В связи с этим становится понятной необходимость защиты сварочной ванны от взаимодействия не только с кислородом и водяными парами, но также и от взаимодействия, с азотом и сложными газами [58].

Для подбора качественного шва проводились несколько экспериментов на базу сварочной установки СМТ Фрониус. Сварочные листы были подготовлены толщиной 2 и 6 мм. При проведении эксперимента сваривали образцы толщиной 2 и 6 мм. После сварки, визуально проверяли качество шва лицевую и обратную часть сваренных алюминиевых сплавов. Часто встречаемые дефектами считались: непровар и прожог. На следующих рисунках 2.6 и 2.7 показаны сварные листы. Для подборки подходящих

параметров сварки, делался снимок с двух сторон сварочного листа. Как показывает рисунок 2.6, лицевая сторона шва показывает сформированный сварной шов, но обратная сторона шва непровар, что может свидетельствовать о меньшей энергии. Также были сделаны сварные швы толщиной листа 6 мм.



Рисунок 2. 6 – Лицевая сторона сварного листа толщиной 2мм



Рисунок 2. 7 – Обратная сторона сварного листа толщиной 2мм

При оптимизации сварочных режимов, предварительно выбрали лист, который с двух сторон показывал качественный шов.

На следующих рисунках 2.8 2.9 показаны листы алюминиевых листов толщиной 6мм.

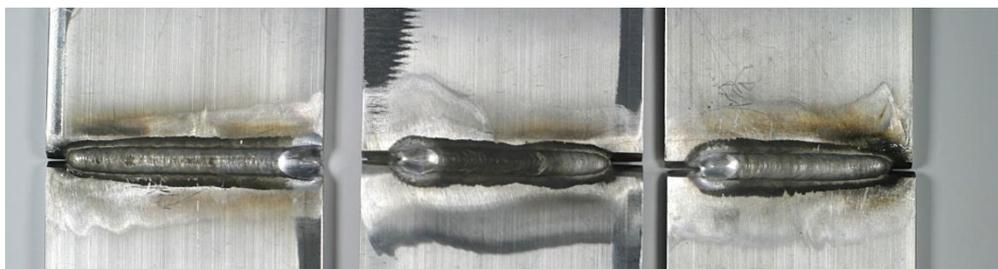


Рисунок 2. 8 – Лицевая сторона сварного листа толщиной 6мм

При сварке листов 6мм возникли проблемы сварочные листы не сваривались, вносимая энергия слишком мала для этих листов. При увеличении энергии (напряжение, ток)получается прожог. Это значит метод СМТ (холодный перенос металла) рассчитан только для тонких листов . Листы с толщиной 6 мм рекомендуется сваривать другими методами сварки. При выборе сварки листов, остановились на 2мм. При выборе сварочных параметров, отталкивались от результатов экспериментов. Одним из важных сварочных параметров это-газ. Газ защищает сварочный расплав от нежелательных реакций атмосферы. При сварке газ влияет на характеристику формирование сварочного шва. Эксперимент проводили между двумя газами аргон и гелий. Преимущества обоих инертных газов: аргона-стабильности дуги гелия- высокая проплавливающая способность. Качественный результат сварочного шва показало смесь Ar/He30. Расход защитного газа устанавливают в зависимости от химического состава и толщины свариваемого материала. При нашей толщине листов 2 мм, расход защитного газа будет составлять 20л/мин.

Режим сварки определяют по экспериментальным (справочным) таблицам или приближенным расчетом с последующей проверкой на технологических пробах. Обычно режим сварки выбирают в следующем порядке: в зависимости от толщины свариваемого металла выбирают диаметр электродной проволоки, затем в зависимости от диаметра устанавливают силу сварочного тока, далее скорость подачи электрода и скорость сварки.

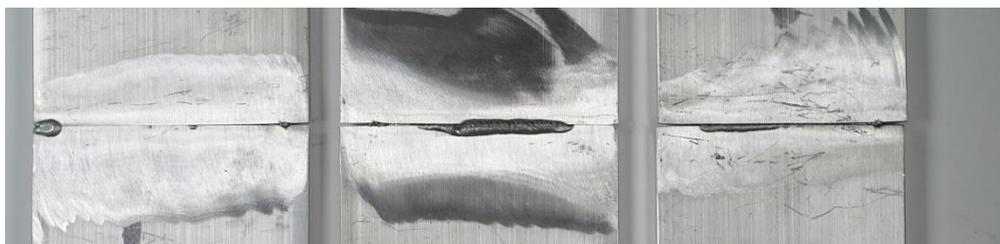


Рисунок 2. 9 – Обратная сторона сварного листа толщиной 6мм

Диаметр сварочной проволоки выбирается от толщины свариваемого материала. Эксперимент проводился между двумя диаметрами сварочной проволоки 1,2 и 1,6мм. Наиболее лучший результат качества показала сварочная проволока диаметром 1,2 мм.

Один важный параметр - скорость подачи проволоки. Для устойчивого процесса сварки скорость подачи электродной проволоки должна быть равна скорости ее плавления. При недостаточной скорости подачи проволоки возможны периодические обрывы дуги, при слишком большой скорости происходят частые короткие замыкания электрода на сварочную ванну.

2.5 Выбор параметров режима сварки и условий сварки

На основании предварительных исследований были выбраны и условия сварки СМТ позволяющие устранить большинство дефектов сварки:

После устранения дефектов с помощью экспериментальных данных, были выбраны следующие параметры для сварки:

- инертный газ чистый аргон и смесь газ Ar/He 30;
- свариваемые материалы
- толщина листа 2мм
- диаметр сварочной проволоки между 1,2 мм 1,6 мм;
- материалы сварочной проволоки
- скорость сварки 0,4 м/мин;

- скорость подачи сварочной проволоки 3,5;4;4,5;5 м/мин

Сварку алюминиевых сплавов 6082 (Al-Mg-Si) и 5083 (Al-Mg) толщиной 2 мм проводили на сварочном оборудовании СМТ, с параметрами режима сварки СМТ. Сварочные образцы закрепляются на столе. Процесс сварки управляется пультом с помощью робота.

2.6 Установки для механических испытаний

После сварки были вырезаны образцы для подготовки на растяжение как показано на рисунке 2.10

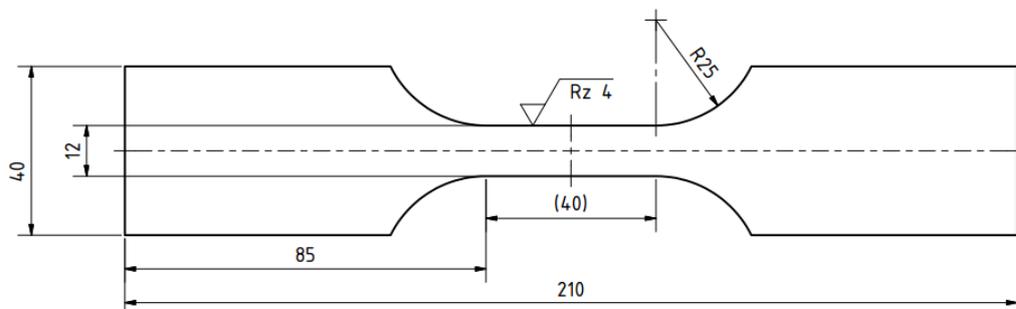


Рисунок 2. 10 – Эскиз образца для проведения испытаний сварных соединений

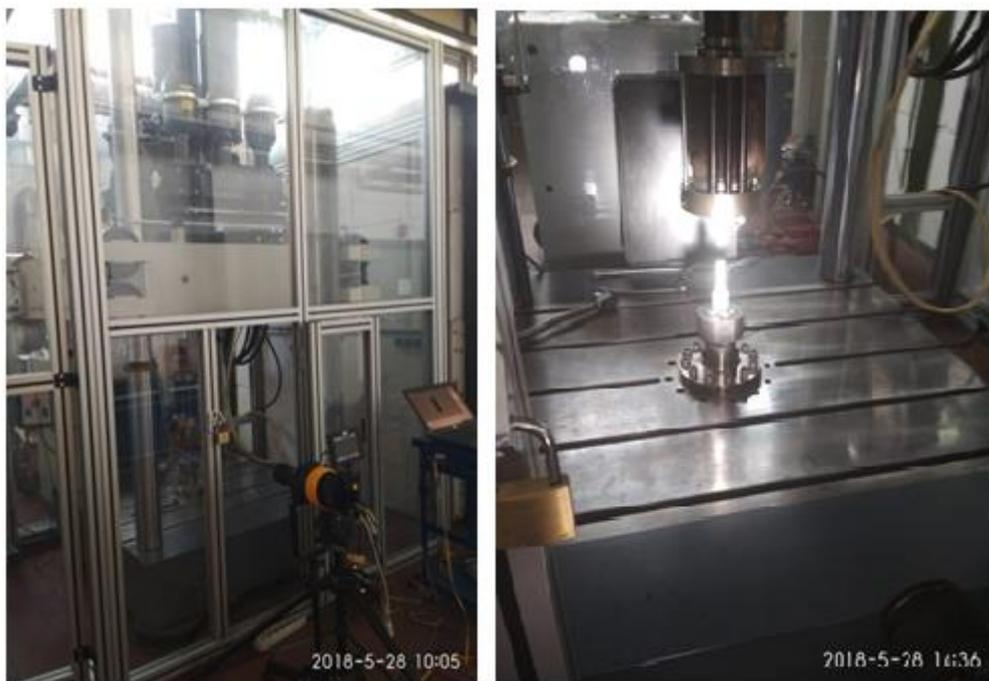
На рисунке 2.11 представлен готовый образец для испытания на растяжение.



Рисунок 2. 11 – Образец, подготовленный для испытания на растяжение

Испытание на растяжение алюминиевых сплавов AW6082T6 (Al-Mg-Si), 5083(Al-Mg) проводили с помощью испытательной машины.

На рисунке 2.12 представлен общий вид высокоскоростной испытательной машины для растяжения. Производство машины принадлежит фирме Zwick/Roell. Максимум испытательной силы 160 Кн. Максимальная скорость растяжения 20м/с, минимальная скорость растяжения 0,1 мм/с.



**Рисунок 2. 12 – Высокоскоростная испытательная машина
«Amsler НТМ 16020» на растяжение**

На рисунке 2.13 представлена схема установки образца на испытательной машине на растяжение. Образец закрепляют с двух сторон болтами с верхней и нижней стороны образца.

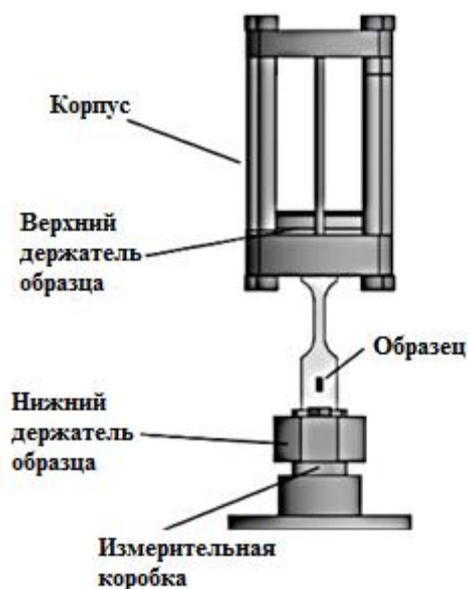


Рисунок 2. 13– Схема установки образца

2.7 Микроструктурный анализ

Микрошлифы алюминиевых сплавов AW6082T6 (Al-Mg-Si), 5083 (Al-Mg) были заранее подготовлены, прошлифованы и полированы. Для качественных снимков металлографическая обработка имеет важное значение. Металлографический анализ включает в себя обрезку сварного шва на установке для резки рисунок 2.14.



Рисунок 2. 14 –Установка для резки металла для микрошлифа



Рисунок - 2.15 Вырезанный микрошлиф

После металл вставляется в специально приготовленную смесь, чтобы было удобно работать дальше. По свойствам металла выбираем формовочную смесь (для мягких и твердых материалов). Также, этот процесс можно сделать автоматически на машине, если у вас заготовка не более чем 3см. На машине это займет 30 минут времени, можно и в ручную приготовить смесь для формовки рис. 2.16.



Рисунок - 2.16 Формы для микрошлифов

Микрошлифы можно сделать вручную так и автоматически на машине. Отличие, автоматической вставки от ручной формовки, во времени так и в качестве. Ручная вставка готовится из эпоксидной смолы, жидкая смола заливается вырезанный микрошлиф. Время остывания микрошлифа, 24 часа. При автоматической вставке, микрошлиф будет готовым в течении 20 минут. Но при этом, вставка будет хрупче, чем при ручной вставке. Поэтому, были выбрана именно ручная вставка.



Рисунок 2. 17 –Готовые микрошлифы для обработки

Начинаем самой грубой шлифовальной бумагой с зерном равным 800 мкм, потом идет 200 мкм, 120 мкм и т.д. Здесь важно отметить, что при каждом шлифовании наблюдается структуру материала на микроскопе. Это позволит, нам увидеть и проследить уменьшение рисков которые, при увеличении зерна бумаги уменьшаются шлифовальные риски. До, полировании желательно чтобы поверхность материала была гладкой и не было рисков, потому что, если плохо прошлифовать при полировании невозможно удалить эти риски. После

шлифования микрошлиф с помощью метана, высушивают и начинают полировать на специально полировальной машине рис. 2.18, (можно автоматически и в ручную) применяя специальную жидкость с величиной зерна 6 (шесть) мкм, а также впрыскивая специальную жидкость во время полирования.



Рисунок 2. 18 – Шлифование микрошлифов

После 6 мкм, переходят на величину зерна 3(три) мкм, после трех, на 1(один) мкм зерна в суспензии. При этом каждый раз, важно наблюдать процесс на микроскопе. После, еще раз заключительно полируем суспензией с величиной зерна на 0,5 мкм. Потом, можем посмотреть структуру материала на микроскопе. Если, структура материала плохо видно, (не считая риски) мы должны протравить материал рис. 2.19. Травление микрошлифов проводилось 3% щелочным раствором натрия (NaOH), после микрошлифы промывались водой рис.2.24, далее образцы высушивались.



Рисунок 2. 19 – установка для полирования микрошлифов



Рисунок 2. 20 –Травление микрошлифов



Рисунок 2. 21 – Промывание микрошлифов

Микроструктурный анализ проводился на микроскопе «**Leica DM 6000**». Ниже приведен рисунок 2.22, на котором проводили световую микроскопию. Микроскоп предназначен для изучения макро и микроструктуры материала.



Рисунок 2. 22 – Световой микроскоп

2.8. Методы аппроксимации результатов исследований

2.8.1 Методы аппроксимации функциональных зависимостей

В том случае, если в результате исследований получены линейные функциональные зависимости, для их математического выражения используются уравнения прямой в виде $y = a + bx$. Аппроксимация линейной функциональной зависимости сводится к решению системы из двух уравнений для двух экспериментальных точек $y_1 = a + bx_1$ и $y_2 = a + bx_2$, следующим образом: $a = y_1 - bx_1$, $y_2 = y_1 - bx_1 + bx_2$, тогда

$$b = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)},$$

где $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ – координаты двух точек экспериментальной кривой.

Во многих случаях результаты исследований выражаются нелинейными функциональными зависимостями, которые принято аппроксимировать степенными или экспоненциальными уравнениями вида $y = ax^b$, $y = ae^{bx}$, соответственно. В этом случае константы a и b находят решением системы логарифмических уравнений вида $\ln y = \ln a + b \ln x$ для степенного уравнения и экспоненциального уравнений. Тогда для степенного уравнения константы находятся следующим образом:

$$b = \frac{(\ln y_2 - \ln y_1)}{(\ln x_2 - \ln x_1)},$$

$$\ln a = \ln y_1 + b \ln x_1,$$

а для экспоненциального уравнения

$$b = \frac{(\ln y_2 - \ln y_1)}{(x_1 - x_2)}, \ln a = \ln y_1 + bx_1.$$

Экстремальные зависимости принято аппроксимировать уравнением вида [19]

$$y = ax^b e^{-cx}, \quad (2.1)$$

где a, b и c – константы.

Уравнение (2.1) является произведением степенной и экспоненциальной функций. Константы этого уравнения находятся решением системы из трех логарифмических уравнений для трех точек функциональной зависимости, расположенных по обе стороны экстремума. Система из трех логарифмических уравнений имеет вид

$$\ln y_1 = \ln a + b \ln x_1 - c x_1$$

$$\ln y_2 = \ln a + b \ln x_2 - c x_2$$

$$\ln y_3 = \ln a + b \ln x_3 - c x_3.$$

Формулы для расчета констант a , b и c получают последовательным решением представленной системы уравнений в следующем виде:

$$b = \frac{(x_2 - x_1)(\ln y_3 - \ln y_1) + (x_1 - x_3)(\ln y_2 - \ln y_1)}{(\ln x_2 - \ln x_1)(x_1 - x_3) + (x_2 - x_1)(\ln x_3 - \ln x_1)};$$

$$c = \frac{b(\ln x_2 - \ln x_1) - (\ln y_2 - \ln y_1)}{(x_2 - x_1)};$$

$$\ln a = \ln y_1 - b \ln x_1 + c x_1.$$

В работе [20] рекомендован простейший метод аппроксимации экстремальной зависимости посредством уравнения

$$y = y_0 \left(x^a e^{-x^b} \right)^n, \quad (2.2)$$

показатели степени уравнения (2.2) находятся в виде

$$b = \frac{1}{\ln x_0}, \quad a = \frac{e}{\ln x_0},$$

где x_0 и y_0 координаты точки максимума.

Для определения показателя степени n находятся значения

$$n_i = \frac{\ln \left(\frac{y_i}{y_0} \right)}{\ln x_i}$$

для всех точек, кроме (x_0, y_0) , а затем найденные значения усредняются.

После определения показателя степени n значения константы y_0 корректируются определением ее среднего значения

$$y_0 = \frac{\sum (V_i^b e^{V_i^c})^n}{\sum i},$$

где $\sum i$ общее количество вычисляемых значений y .

Погрешность расчетов проверяется степенью совпадения рассчитанных значений с фактическими. Средняя погрешность расчетов не должна превышать 10%.

2.8.2 Методы аппроксимации статистических зависимостей

При производственных испытаниях сверл исследованию подлежат случайные величины, для которых функциональные зависимости определить практически невозможно, поэтому методами корреляционного анализа находились статистические зависимости между случайными переменными.

Анализировались три вида уравнений регрессии: линейная ($y = \alpha + bx$), степенная ($y = \alpha x^b$) и экспоненциальная ($y = \alpha e^{bx}$) зависимости, как наиболее часто применяемые в стойкостных исследованиях. При расчете коэффициентов уравнений регрессии использовался метод наименьших квадратов для малого числа испытаний. Для этого составили таблицу 2.5.

**Исходные данные для определения коэффициентов уравнения
регрессии линейной зависимости**

Таблица 2.5

№	y _i	x _i	y _i ²	x _i y _i	x _i ²	y _i + x _i	(y _i + x _i) ²
1	y ₁	x ₁	y ₁ ²	x ₁ y ₁	x ₁ ²	y ₁ + x ₁	(y ₁ + x ₁) ²
2	y ₂	x ₂	y ₂ ²	x ₂ y ₂	x ₂ ²	y ₂ + x ₂	(y ₂ + x ₂) ²
3	y ₃	x ₃	y ₃ ²	x ₃ y ₃	x ₃ ²	y ₃ + x ₃	(y ₃ + x ₃) ²
4	y ₄	x ₄	y ₄ ²	x ₄ y ₄	x ₄ ²	y ₄ + x ₄	(y ₄ + x ₄) ²
5	y ₅	x ₅	y ₅ ²	x ₅ y ₅	x ₅ ²	y ₅ + x ₅	(y ₅ + x ₅) ²
6	y ₆	x ₆	y ₆ ²	x ₆ y ₆	x ₆ ²	y ₆ + x ₆	(y ₆ + x ₆) ²
7	y ₇	x ₇	y ₇ ²	x ₇ y ₇	x ₇ ²	y ₇ + x ₇	(y ₇ + x ₇) ²
8	y ₈	x ₈	y ₈ ²	x ₈ y ₈	x ₈ ²	y ₈ + x ₈	(y ₈ + x ₈) ²
Σ	Σy _i	Σx _i	Σ y _i ²	Σx _i y _i	Σ x _i ²		Σ(y _i + x _i) ²

В таблице 2.5 занесли статистические результаты испытаний, для которых исследовали характер взаимозависимости, например, y – средняя стойкость инструмента, x – средняя величина износа.

Для определения коэффициентов регрессии линейной статистической зависимости в таблице 2.5 заносятся фактические значения x и y. Последние два столбца этой таблицы используются для проверки точности расчетов по формуле: $\sum (y_i + x_i)^2 = \sum x_i^2 + 2\sum x_i y_i + \sum y_i^2$.

Коэффициенты уравнения регрессии рассчитываются по формулам:

$$b = \frac{n\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2},$$

$$a = \frac{(\sum y_i - b\sum x_i)}{n}.$$

Для проверки линейности полученной зависимости рассчитывается коэффициент корреляции по формуле

$$r = b \sqrt{\frac{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}{n\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}}.$$

Если значение коэффициента корреляции близко к единице ($r > 0,8$), то полученную зависимость можно считать линейной, т.е. искомое уравнение регрессии можно считать уравнением прямой. Погрешность расчетов определяется степенью совпадения рассчитанных значений с фактическими и не должна превышать 13%.

Для определения коэффициентов регрессии степенной статистической зависимости в таблице 2.6 заносятся натуральные логарифмы значений x и y .

**Исходные данные для определения коэффициентов уравнения
регрессии степенной зависимости**

Таблица 2.6

№	y_i	x_i	y_i^2	$x_i y_i$	x_i^2	$y_i + x_i$	$(y_i + x_i)^2$
1	$\ln y_1$	$\ln x_1$	$\ln y_1^2$	$\ln x_1 \ln y_1$	$\ln x_1^2$	$\ln y_1 + \ln x_1$	$(\ln y_1 + \ln x_1)^2$
2	$\ln y_2$	$\ln x_2$	$\ln y_2^2$	$\ln x_2 \ln y_2$	$\ln x_2^2$	$\ln y_2 + \ln x_2$	$(\ln y_2 + \ln x_2)^2$
3	$\ln y_3$	$\ln x_3$	$\ln y_3^2$	$\ln x_3 \ln y_3$	$\ln x_3^2$	$\ln y_3 + \ln x_3$	$(\ln y_3 + \ln x_3)^2$
4	$\ln y_4$	$\ln x_4$	$\ln y_4^2$	$\ln x_4 \ln y_4$	$\ln x_4^2$	$\ln y_4 + \ln x_4$	$(\ln y_4 + \ln x_4)^2$
5	$\ln y_5$	$\ln x_5$	$\ln y_5^2$	$\ln x_5 \ln y_5$	$\ln x_5^2$	$\ln y_5 + \ln x_5$	$(\ln y_5 + \ln x_5)^2$
6	$\ln y_6$	$\ln x_6$	$\ln y_6^2$	$\ln x_6 \ln y_6$	$\ln x_6^2$	$\ln y_6 + \ln x_6$	$(\ln y_6 + \ln x_6)^2$
7	$\ln y_7$	$\ln x_7$	$\ln y_7^2$	$\ln x_7 \ln y_7$	$\ln x_7^2$	$\ln y_7 + \ln x_7$	$(\ln y_7 + \ln x_7)^2$
8	$\ln y_8$	$\ln x_8$	$\ln y_8^2$	$\ln x_8 \ln y_8$	$\ln x_8^2$	$\ln y_8 + \ln x_8$	$(\ln y_8 + \ln x_8)^2$
Σ	$\Sigma \ln y_i$	$\Sigma \ln x_i$	$\Sigma \ln y_i^2$	$\Sigma \ln x_i \ln y_i$	$\Sigma \ln x_i^2$		$\Sigma (\ln y_i + \ln x_i)^2$

Точность расчетов проверяется по формуле:

$$\Sigma (\ln y_i + \ln x_i)^2 = \Sigma \ln x_i^2 + 2 \Sigma \ln x_i \ln y_i + \Sigma \ln y_i^2.$$

Коэффициенты уравнения регрессии степенной зависимости рассчитываются по формулам

$$b = \frac{n \Sigma \ln x_i \ln y_i - \Sigma \ln x_i \Sigma \ln y_i}{n \Sigma \ln x_i^2 - (\Sigma \ln x_i)^2},$$

$$\ln \alpha = \frac{(\sum \ln y_i - b \sum \ln x_i)}{n}.$$

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле

$$r = b \sqrt{\frac{n \sum \ln x_i^2 - (\sum \ln x_i)^2}{n \sum \ln y_i^2 - (\sum \ln y_i)^2}}.$$

Для определения коэффициентов регрессии экспоненциальной статистической зависимости в таблице 2.7 заносятся натуральные логарифмы значений y и фактические значения.

**Исходные данные для определения коэффициентов уравнения
регрессии экспоненциальной зависимости**

Таблица 2.7

№	y_i	x_i	y_i^2	$x_i y_i$	x_i^2	$y_i + x_i$	$(y_i + x_i)^2$
1	$\ln y_1$	x_1	$\ln y_1^2$	$x_1 \ln y_1$	x_1^2	$\ln y_1 + x_1$	$(\ln y_1 + x_1)^2$
2	$\ln y_2$	x_2	$\ln y_2^2$	$x_2 \ln y_2$	x_2^2	$\ln y_2 + x_2$	$(\ln y_2 + x_2)^2$
3	$\ln y_3$	x_3	$\ln y_3^2$	$x_3 \ln y_3$	x_3^2	$\ln y_3 + x_3$	$(\ln y_3 + x_3)^2$
4	$\ln y_4$	x_4	$\ln y_4^2$	$x_4 \ln y_4$	x_4^2	$\ln y_4 + x_4$	$(\ln y_4 + x_4)^2$
5	$\ln y_5$	x_5	$\ln y_5^2$	$x_5 \ln y_5$	x_5^2	$\ln y_5 + x_5$	$(\ln y_5 + x_5)^2$
6	$\ln y_6$	x_6	$\ln y_6^2$	$x_6 \ln y_6$	x_6^2	$\ln y_6 + x_6$	$(\ln y_6 + x_6)^2$
7	$\ln y_7$	x_7	$\ln y_7^2$	$x_7 \ln y_7$	x_7^2	$\ln y_7 + x_7$	$(\ln y_7 + x_7)^2$
8	$\ln y_8$	x_8	$\ln y_8^2$	$x_8 \ln y_8$	x_8^2	$\ln y_8 + x_8$	$(\ln y_8 + x_8)^2$
Σ	$\Sigma \ln y_i$	Σx_i	$\Sigma \ln y_i^2$	$\Sigma x_i \ln y_i$	Σx_i^2		$\Sigma (\ln y_i + x_i)^2$

Точности расчетов проверяется по формуле

$$\Sigma (\ln y_i + x_i)^2 = \Sigma x_i^2 + 2 \Sigma x_i \ln y_i + \Sigma \ln y_i^2.$$

Коэффициенты уравнения регрессии экспоненциальной зависимости рассчитываются по формулам

$$b = \frac{n \Sigma x_i \ln y_i - \Sigma x_i \Sigma \ln y_i}{n \Sigma x_i^2 - (\Sigma x_i)^2},$$

$$\ln \alpha = \frac{(\sum \ln y_i - b \sum x_i)}{n}.$$

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле

$$r = b \sqrt{\frac{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}{n \sum \ln y_i^2 - (\sum \ln y_i)^2}}$$

2.9 Выводы

Сварные соединения серии 6082 (Al-Mg-Si) и 5083 (Al-Mg) получали методом сварки СМТ Cold Metal Transfer (Холодный перенос металла). Все эксперименты проводились в техническом университете Клаусталь (Германия), в институте «Сварки и резки металлов».

ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Определение режимов и условий СМТ сварки позволяющих получить более высокое качество сварного шва

В табл. 3.1 приведены результаты сравнительного анализа качества сварного шва при сваривании сплавов марок 5083 и 6082 в среде инертных газов аргон и аргон/гелий.

Результаты сравнительного анализа качества сварного шва при сваривании сплавов марок 5083 и 6082 в среде инертных газов аргон и аргон/гелий

Таблица 3.1

№	Свариваемый материал	Диаметр проволоки, мм	Материал проволоки	Инертный газ	V, м/мин	σ_b , МПа
1	5083	1,2	5183	Ar/He	4	262
	5083	1,2	5183	Ar	4	237
2	6082	1,6	5183	Ar/He	6	174
	6082	1,6	5183	Ar	6	166

В табл. 3.1 видно, что предел прочности сварного шва выше в среде смеси инертных газов Ar/He.

В табл. 3.2 приведены результаты сравнительного анализа качества сварного шва при сваривании сплавов марки 5083 и 6082.

**Результаты сравнительного анализа качества сварного шва при
сваривании сплавов марки 5083 и 6082**

Таблица 3.2

№	Свариваемый материал	Диаметр проволоки, мм	Материал проволоки	Инертный газ	V, м/мин	$\sigma_{\text{в}}$, МПа
1	5083	1,6	5183	Ar	6	253
	6082	1,6	5183	Ar	6	166
2	5083	1,6	5183	Ar/He	6	242
	6082	1,6	5183	Ar/He	6	172
3	5083	1,6	5087	Ar	6	253
	6082	1,6	5087	Ar/He	6	176
4	5083	1,2	5183	Ar	4	216
	6082	1,2	5183	Ar	4	207

В табл. 3.2 видно, что во всех случаях предел прочности сварного шва выше при сваривании сплава марки 5083.

Известно, что при уменьшении диаметра электродной проволоки плотность тока в ней увеличивается, уменьшается блуждание дуги, происходит концентрация теплоты на малой площади сварочной ванны, и глубина провара возрастает, ширина шва при этом уменьшается. Это позволяет при сварке тонкой электродной проволокой сравнительно на небольших токах получать глубокий провар [27].

Анализ микрошлифов подтверждает более высокое качество сварного шва выполненного проволокой диаметром 1,2 мм (рис. 3.1), по сравнению с проволокой диаметром 1,6 мм (рис. 3.2).



Рисунок 3.1 - Микрошлиф сварного шва, выполненного проволокой диаметром 1,2 мм

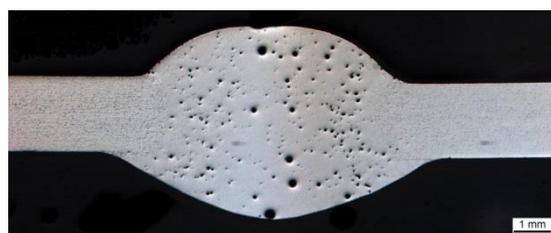


Рисунок 3.2 - Микрошлиф сварного шва, выполненного проволокой диаметром 1,6 мм

В табл. 3.3 приведены результаты сравнительного анализа качества сварного шва при сварке проволокой из материалов марок 5087 и 5183.

Результаты сравнительного анализа качества сварного шва при сварке проволокой из материалов марок 5087 и 5183

Таблица 3.3

№	Свариваемый материал	Диаметр проволоки, мм	Материал проволоки	Инертный газ	V, м/мин	σв, МПа
1	5083	1,6	5087	Ar	6	253
	5083	1,6	5183	Ar	6	253
2	6082	1,6	5087	Ar/He	6	176
	6082	1,6	5183	Ar/He	6	172

В табл. 3.3 видно, что марка материала проволоки практически не влияет на предел прочности сварного шва.

В табл. 3.4 приведен химический состав свариваемого сплава марки 6082, в табл. 3.5 - химический состав свариваемого сплава марки 5083 ГОСТ [60], в табл. 3.6 – химический состав сплава сварочной проволоки марки 5087, в табл. 3.7 - химический состав сплава сварочной проволоки марки 5183, аналог ГОСТ [61].

Химический состав свариваемого сплава марки 6082

Таблица 3.4

Mg	Fe	Cu	Mn	Si	Cr	Zn	Ti	Al
0,6-1,2	0,5	0,1	0,40-1,0	0,7-1,3	0,25	0,2	0,1	ост.

Химический состав свариваемого сплава марки 5083

Таблица 3.5

Mg	Fe	Cu	Mn	Si	Cr	Zn	Ti	Al
4,0-4,9	0,40	0,10	0,40-1,0	0,40	0,05-0,25	0,25	0,15	ост.

Химический состав сплава сварочной проволоки марки 5087

Таблица 3.6

Mg	Fe	Cu	Mn	Si	Cr	Zn	Ti	Al
4,5-5,2	0,40	0,05	0,7-1,1	0,25	0,05-0,25	0,25	0,15	ост.

Химический состав сплава сварочной проволоки марки 5183

Таблица 3.7

Mg	Fe	Cu	Mn	Si	Cr	Zn	Ti	Be	Al
4,3	0,40	0,1	0,5	0,4	0,05	0,25	0,06	0,008	ост.

Как известно качество сварного шва существенно зависит от того насколько близки химические составы свариваемого материала и материала

сварочной проволоки. Анализ табл. 4-7 показывает, что различие химических составов обеих марок материалов проволоки со свариваемыми материалами примерно равное.

В табл. 3.4-3.7 видно, что химический состав алюминиевого сплава марки 6082 существенно отличается от химического состава сплава марки 5083, и от химического состава сплавов сварочной проволоки марок 5087 и 5183. Поэтому предел прочности сварного шва у материала марки 6082 значительно ниже, чем у материала 5083 (табл. 3.1-3.3).

Вышеприведенный анализ позволил определить режимы и условия СМТ сварки позволяющие получить более высокое качество сварного шва: свариваемый материал – алюминиевый сплав марки 5083; инертный газ - смесь инертных газов Ar/He; диаметр сварочной проволоки - 1,2 мм; материал сварочной проволоки алюминиевый сплав марки 5087.

3.2 Разработка математической модели отражающей характер влияния скорости подачи проволоки на качество сварного шва

Из вышеперечисленных параметров режима сварки в большей мере влияющим на качество сварного шва является скорость подачи проволоки. График зависимости предела прочности сварного шва от скорости подачи проволоки имеет явно выраженный максимум в диапазоне скоростей подачи проволоки от 4 м/мин до 4,5 м/мин (рис. 3.4). Характерно, что график зависимости количества пор от скорости подачи проволоки имеет явно выраженный минимум (рис. 3.5), при этом диапазон скоростей подачи проволоки максимума на графике зависимости предела прочности сварного шва от скорости подачи проволоки совпадает с диапазоном скоростей подачи проволоки минимума на графике зависимости количества пор от скорости подачи проволоки.

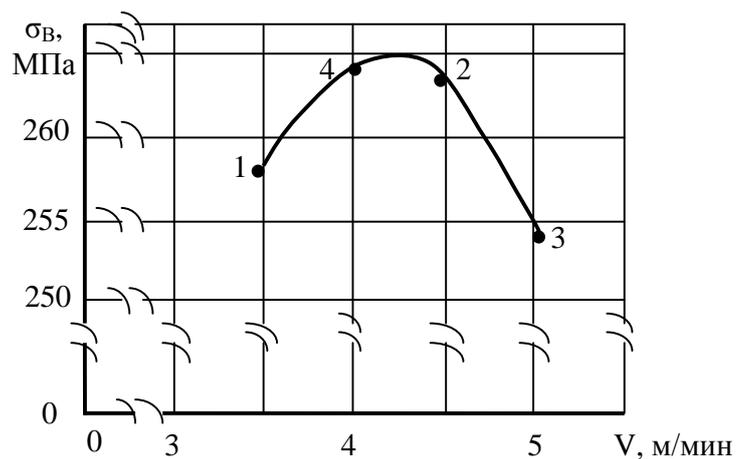


Рисунок 3.4 -Зависимость предела прочности от скорости подачи проволоки

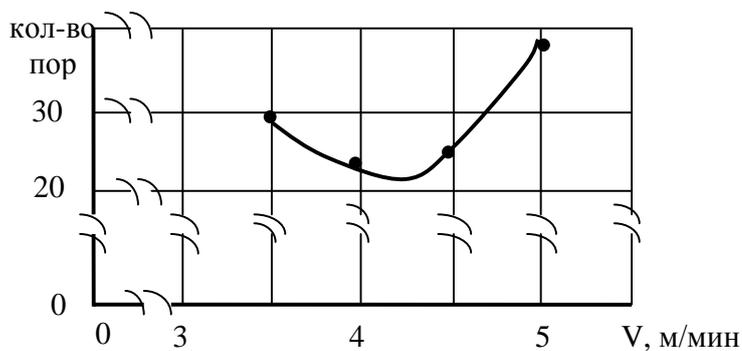


Рисунок 3.5 - Зависимость количества пор от скорости подачи проволоки

На рисунках 6-9 представлены характерные образцы микрошлифов сварного шва, полученные на скоростях подачи проволоки настоящих исследований.



Рисунок 3.6 - Микрошлиф сварного шва, $V = 3,5$ м/мин

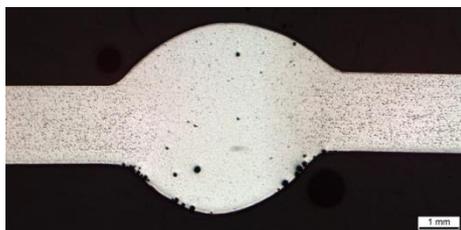


Рисунок 3.7 - Микрошлиф сварного шва, $V = 4$ м/мин

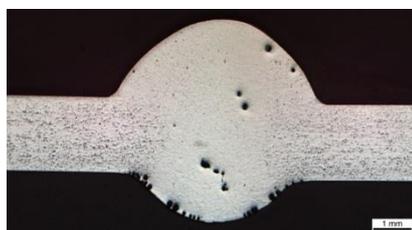


Рисунок 3.8 - Микрошлиф сварного шва, $V = 4,5$ м/мин



Рисунок 3.9 - Микрошлиф сварного шва, $V = 5$ м/мин

Для аппроксимации кривой графика, представленного на рис. 3.4 в работе [62] приведены зависимости вида

$$\sigma_B = aV^b e^{-cV}, \quad (3.1)$$

$$\sigma_B = \sigma_{Bm} \left(V^a e^{-V^b} \right)^n, \quad (3.2)$$

где σ_B – предел прочности на растяжение, МПа, V – скорость подачи проволоки, м/мин, a, b, c, n – характеристики степени, a и σ_{Bm} – константы.

Характеристики степени зависимости (3.1) находятся посредством решения системы логарифмических уравнений с координатами точек на аппроксимируемой кривой σ_{Bi} и V_i . В результате решения этих уравнений получены формулы для расчета характеристик степени в виде:

$$b = \frac{(V_2 - V_1)(\ln\sigma_{B3} - \ln\sigma_{B1}) + (V_1 - V_3)(\ln\sigma_{B2} - \ln\sigma_{B1})}{(V_1 - V_3)(\ln V_2 - \ln V_1) + (V_2 - V_1)(\ln V_3 - \ln V_1)} \quad (3.3)$$

$$c = \frac{b(\ln V_2 - \ln V_1) - (\ln\sigma_{B2} - \ln\sigma_{B1})}{(V_2 - V_1)};$$

(3.4)

Константа находится посредством решения логарифмического уравнения

$$\ln a = \ln\sigma_{B1} - b \ln V_1 + c V_1. \quad (3.5)$$

Решением уравнений (3.3) и (3.4) определены следующие характеристики степени уравнения (1):

$$b = 2,1707; c = 0,5258.$$

Решением уравнения (3.5) определена константа уравнения (1.1) $a = 107,0625$.

Подставив найденные характеристики степени и константу в уравнение (3.1) получим зависимость (3.6)

$$\sigma_B = 107,0625 V^{2,1707} e^{-0,5258 V}. \quad (3.6)$$

В таблице 8 показаны фактические и рассчитанные по зависимости (3.6) значения предела прочности и погрешность расчетов.

Фактические и рассчитанные по зависимости (3.6) значения предела прочности и погрешность расчетов

Таблица 3.8

V, м/мин	ΣВ факт., МПа	ΣВ расч., МПа	Δ, %
3,5	258	257,88	0,046
4,0	264	264,92	0,348
4,5	263	263,0157	0,006
5,0	254	254,17	0,067
			Δср= 0,117

В табл. 3.8 видно достаточно высокую адекватность зависимости (3.6) экспериментальным данным. Средняя погрешность расчетов составила 0,117%.

Характеристики степени уравнения (3.2) определяются следующим образом:

$$b = \frac{1}{\ln V_M}; \quad (3.7)$$

$$a = \frac{e}{\ln V_M}; \quad (3.8)$$

$$n_i = \frac{\ln\left(\frac{\sigma_{Bi}}{\sigma_{BM}}\right)}{\ln\left(V_i^a e^{-V_i^b}\right)}. \quad (3.9)$$

где V_M и σ_{BM} координаты точки максимума зависимости $\sigma_B = f(V)$ (рис. 3.4).

$V_M = b/c$, где b и c характеристики степени зависимости (3.6), тогда $V_M = 4,13$ м/мин. Для определения значения σ_{BM} воспользуемся зависимостью (3.6), подставив в нее значение $V_M = 4,13$ м/мин. Тогда значение $\sigma_{BM} = 265,208$ МПа.

По зависимостям (3.7) и (3.8) найдем характеристики степени b и a уравнения (3.2) равные: $b = 0,705$; $a = 1,916$.

Для определения показателя степени n по зависимости (3.9) находятся значения показателя степени n_i для всех точек кривой рис. 3.4 кроме σ_{BM} , V_M и близким к ним (точка 4), а затем найденные значения характеристик степени n_i усредняются. $n_1 = 1,5032$, $n_2 = 1,4823$, $n_3 = 1,634777$, среднее значение $n = 1,54$

После определения показателя степени n и значение константы $\sigma_{ВМ}$ уточняется. Для этого по зависимости (3.10) рассчитываются значения константы $\sigma_{ВМi}$ для всех точек кривой рис. 3.4 кроме $\sigma_{ВМ}$, V_m и близким к ним (точка 4), а затем найденные значения констант $\sigma_{ВМi}$ усредняются.

$$\sigma_{ВМi} = \frac{\sigma_{Вi}}{(V_i^a e^{-V_i^b})^n}. \quad (3.10)$$

$\sigma_{ВМ1} = 265,3858$ МПа, $\sigma_{ВМ2} = 265,294275$ МПа, $\sigma_{ВМ3} = 264,54487$, среднее значение $\sigma_{ВМ} = 265,075$ МПа.

Подставив найденные характеристики степени и константу в уравнение (3.2) получим зависимость (3.11)

$$\sigma_{В} = 265,075(V^{1,916} e^{-V^{0,705}})^{1,54}. \quad (3.11)$$

В табл. 3.9 представлены фактические и рассчитанные по зависимости (3.11) значения стойкости и погрешности расчетов.

Фактические и рассчитанные по зависимости (3.11) значения стойкости и погрешности расчетов

Таблица 3.9

V , м/мин	$\sigma_{В}$ факт., МПа	$\sigma_{В}$ расч., МПа	Δ , %
3,5	258	257,7	0,116
4,0	264	264,57	0,216
4,5	263	262,78	0,084
5,0	254	254,51	0,2
			$\Delta_{ср} = 0,154$

В табл. 3.9, видно достаточно высокую адекватность зависимости (3.11) экспериментальным данным. Средняя погрешность расчетов составила 0,154%.

Сравнительный анализ двух полученных зависимостей показал, что более точной является зависимость (3.6), которую и следует использовать для расчета предела прочности при варьировании скоростью подачи проволоки.

3.3 Закономерности влияния пористости швов на качество сварных соединений алюминиевых сплавов

Автором работы [55] проведена классификация основных видов сварочных дефектов и показан характер их влияния на работоспособность сварных соединений. При отработке параметров режима СМТ сварки большинство из приведенных автором дефектов были устранены. Остались поры, устранить которые в полной мере не представляется возможным ввиду наличия в сварочной ванне газов водорода и азота. Как показано выше (рис. 3.5) характер зависимости количества пор от скорости подачи проволоки противоположен характеру влияния скорости подачи проволоки на предел прочности сварного шва, что позволяет предполагать наличие влияния количества пор на характеристики прочности сварного шва.

Автором работы [63] предложена методика получения статистических зависимостей в условиях воздействия на результаты экспериментов большого количества взаимонезависимых случайных факторов, когда исследованию подлежат переменные величины, значения которых имеют случайный характер. В результате получают статистические зависимости между двумя или более случайными переменными факторами. Для этого при обработке результатов испытаний предложено последовательно решить следующие задачи:

- посредством корреляционного анализа определить наличие и тесноту связей между случайными переменными;
- при наличии достаточно тесной связи посредством регрессионного анализа построить уравнения регрессии и выбрать наиболее подходящие из них.

Для определения наличия и тесноты связи наиболее часто используют коэффициент корреляции Пирсона, правомочность применения которого имеет место при нормальном распределении случайных величин.

В табл. 3.10 представлены характеристики прочности сварных швов, полученные экспериментальным путем и соответствующие им количество пор.

**Характеристики прочности сварных швов соответствующие им
количество пор**

Таблица 3.10

№	σ_B , МПа	$\Delta\ell$, %	σ_T , МПа	δ , шт
1	253	14,08	129	16
2	242	13,28	124	28
3	258	13,22	131	20
4	274	15,71	138	9
5	216	12,23	120	37
6	250	14,5	125	15

3.3.1 Проверка нормальности распределений характеристик прочности сварных швов и количества пор

При числе результатов измерений $n \leq 50$ нормальность их распределения проверяют с помощью составного критерия [64].

Критерий 1

Вычисляют отношение \tilde{d}

$$\tilde{d} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{nS^*},$$

где S^* — смещенное среднее квадратическое отклонение, вычисляемое по формуле

$$S^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}.$$

Результаты измерений в ряду считают распределенными нормально если

$$d_{1-q/2} < \tilde{d} \leq d_{q/2},$$

где $d_{1-q/2}$ и $d_{q/2}$ - квантили распределения (табл. Б.1 [64]), величина которых при минимальной выборке и доверительной вероятности 95% и 5% равна соответственно 0,7236 и 0,8884, что является самым узким диапазоном варьирования.

Критерий 2

Считают, что результаты измерений принадлежат нормальному распределению, если не более m разностей $(x_i - \bar{x})$ или $(y_i - \bar{y})$ превысили значение $z_{p/2} \cdot S$, (табл. Б2 [64]) где S — среднее квадратическое отклонение, вычисляемое по формуле (3) [64]; $z_{p/2}$ — верхний квантиль распределения нормированной функции Лапласа, отвечающий вероятности $P/2$.

Значения вероятности определяют из таблицы Б.2 [64] по выбранному уровню значимости. Зависимость $z_{p/2}$ от P приведена в таблице Б.3 [64] и составляет: $P=0,96-z_{p/2}=2,06$; $P=0,97-z_{p/2}=2,17$; $P=0,98-z_{p/2}=2,33$; $P=0,99-z_{p/2}=2,58$.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}.$$

Данные для проверки нормальности распределения характеристик прочности сварных швов и числа пор представлены в табл.3.11 – 3.13.

**Данные для проверки нормальности распределений δ и σ_B и расчета
коэффициента корреляции между δ и σ_B**

Таблица 3.11

№	σ_B , МПа	δ , шт	$(y_i - \bar{y})$	$(x_i - \bar{x})$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$\frac{(y_i - \bar{y})}{(x_i - \bar{x})}$
1	253	16	4,17	-4,83	56,25	23,3289	-20,1411
2	242	28	-6,83	7,17	12,25	51,4089	-48,9711
3	258	20	9,17	-0,83	156,25	0,6889	-7,6111
4	274	9	25,17	-11,83	812,25	139,9489	-297,7611
5	216	37	-32,83	16,17	870,25	261,4689	-530,8611
6	250	15	1,17	-5,83	20,25	33,9089	-6,8211
Σ	1493	125	79,34	46,66	1860,8334	482,6745	-912,1666
ср	248,83	20,83					

**Данные для проверки нормальности распределения Δl и расчета
коэффициента корреляции между δ и Δl**

Таблица 3.12

№	Δl , %	δ , шт	$(y_i - \bar{y})$	$(x_i - \bar{x})$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$\frac{(y_i - \bar{y})}{(x_i - \bar{x})}$
1	14,08	16	0,25	-4,83	0,0625	23,3289	-1,2075
2	13,28	28	-0,55	7,17	0,3025	51,4089	-3,9435
3	13,22	20	-0,61	-0,83	0,3721	0,6889	0,5063
4	15,71	9	1,88	-11,83	3,5344	139,9489	-22,2404
5	12,23	37	-1,6	16,17	2,56	261,4689	-25,872
6	14,5	15	0,67	-5,83	0,4489	33,9089	-3,9061
Σ	83,02	125	5,56		7,2804	482,6745	-56,6632
ср	13,83	20,83					

**Данные для проверки нормальности распределения σ_T и расчета
коэффициента корреляции между δ и σ_T**

Таблица 3.13

№	σ_T , МПа	δ ,шт	$(y_i - \bar{y})$	$(x_i - \bar{x})$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})$ $(x_i - \bar{x})$
1	129	16	1,17	-4,83	2,3689	23,3289	-21,96
2	124	28	-3,83	7,17	14,6689	51,4089	-36,84
3	131	20	3,17	-0,83	10,0489	0,6889	9,36
4	138	9	10,17	-11,83	103,4289	139,9489	-36,52
5	120	37	-7,83	16,17	61,3089	261,4689	-200,16
6	125	15	-2,83	-5,83	8,0089	33,9089	-6,8211
Σ	767	125	29		199,8334	482,6745	-292,9411
ср	127,83	20,83					

Результаты проверки нормальности распределений количества пор и характеристик прочности сварных швов представлены в табл. 3.14.

Результаты проверки нормальности распределений

Таблица 3.14

	δ	σ_B	Δl	σ_T
\tilde{d}	0,867	0,7509	0,8412	0,8375
$z_p/2_{\min} \cdot S$	20,24	39,74	4,608	13,023

Как видно в табл.3.14 оба критерия подтверждают нормальность всех проверенных распределений. Критерий 1: $0,7236 < \tilde{d} < 0,8884$ (табл. Б.1 [64]); Критерий 2: ни одного значения разностей $(x_i - \bar{x})$ или $(y_i - \bar{y})$ не превысили значение $z_p/2_{\min} \cdot S$ [64].

Поэтому для определения наличия и тесноты связи между количеством пор и характеристиками прочности сварных швов можно использовать коэффициент корреляции Пирсона.

3.3.2 Определение коэффициентов корреляции Пирсона между характеристиками прочности сварных швов и количеством пор

Коэффициент корреляции Пирсона определяется следующим образом:

$$r = \frac{\sum(y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum(y_i - \bar{y})^2 \sum(x_i - \bar{x})^2}}$$

Данные для определения соответствующих коэффициентов корреляции представлены в табл. 3.11 - 3.13.

В табл. 3.15 представлены соответствующие коэффициенты корреляции.

Коэффициенты корреляции

Таблица 3.15

сравн. зн.	$\sigma_B - \delta$	$\Delta l - \delta$	$\sigma_T - \delta$
r	0,962	0,956	0,943

Все представленные в табл. 3.15 коэффициенты корреляции значимые. Уровень их значимости близок к 0,01 [63], что позволяет посредством регрессионного анализа построить уравнения регрессии и выбрать наиболее подходящие из них.

3.3.3 Построение уравнений регрессии зависимостей характеристик прочности сварных швов от количества пор и выбор наиболее подходящих из них

По результатам исследований, представленных в табл. 3.10 построены графические зависимости (рис. 3.10 – 3.12) имеющие вид.

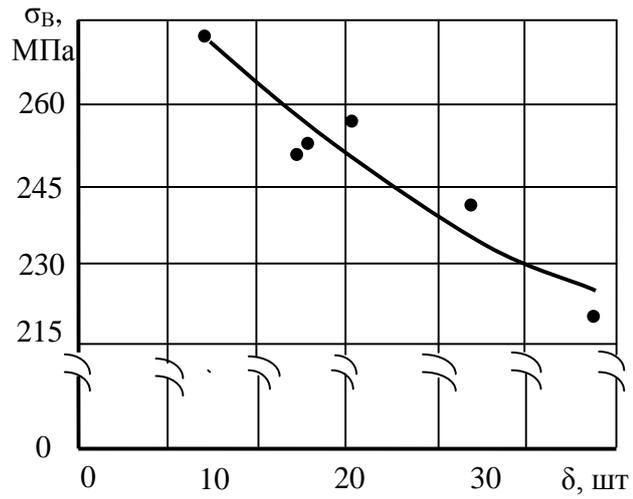


Рисунок 3.10 – Зависимость предела прочности от числа пор

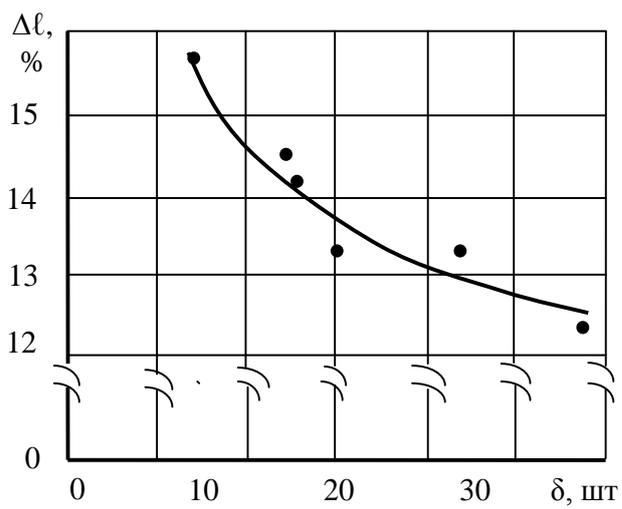


Рисунок 3.11 – Зависимость относительного удлинения от числа пор

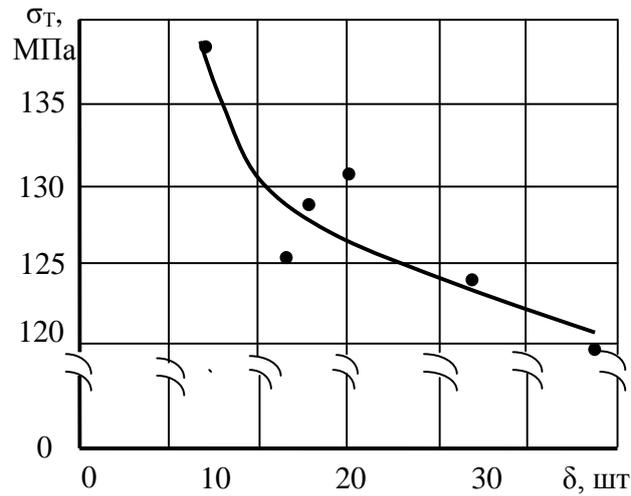


Рисунок 3.12 – Зависимость предела текучести от числа пор

Кривые графиков зависимостей параметров прочности сварных швов от количества пор являются статистическими зависимостями, полученными усреднением нескольких измерений в каждой точке, поэтому аппроксимация этих зависимостей проводилась методом наименьших квадратов.

Определялись коэффициенты регрессии трех статистических зависимостей: прямой, степенной и экспоненциальной. Затем рассчитывался коэффициент корреляции каждой из них, и методом сравнительного анализа определялась зависимость наиболее адекватная результатам исследований.

Линейная зависимость

В табл. 3.16 приведены данные для расчета коэффициентов регрессии линейной зависимости предела прочности от числа пор [63].

**Данные для расчета коэффициентов регрессии
линейной зависимости предела прочности от числа пор**

Таблица 3.16

№	σ_{Bi}	δ_i	σ_{Bi}^2	$\sigma_{Bi}\delta_i$	δ_i^2	$\sigma_{Bi} + \delta_i$	$(\sigma_{Bi} + \delta_i)^2$
1	253	16	64009	4048	256	269	72361
2	242	28	58564	6776	784	270	72900
3	258	20	66564	5160	400	278	77284
4	274	9	75076	2466	81	283	80089
5	216	37	46656	7992	1369	253	64009
6	250	15	62500	3750	225	265	70225
Σ	1493	125	373369	30192	3115		436868

Точность расчетов проверяется по формуле:

$$\Sigma(\sigma_{Bi} + \delta_i)^2 = \Sigma \sigma_{Bi}^2 + 2\Sigma \sigma_{Bi}\delta_i + \Sigma \delta_i^2 = 373369 + 2 \cdot 30192 + 3115 = 436868.$$

Коэффициенты уравнения регрессии линейной зависимости рассчитываются по формулам:

$$b = \frac{n\Sigma \sigma_{Bi}\delta_i - \Sigma \sigma_{Bi}\Sigma \delta_i}{n\Sigma \delta_i^2 - (\Sigma \delta_i)^2} = \frac{6 \cdot 30192 - 1493 \cdot 125}{6 \cdot 3115 - (125)^2} = -1,786,$$

$$\alpha = \frac{\Sigma \sigma_{Bi} - b\Sigma \delta_i}{n} = \frac{1493 + 1,786 \cdot 125}{6} = 286,042,$$

Линейная зависимость имеет вид:

$$\sigma_B = 286,042 - 1,786\delta.$$

Для проверки линейности полученной зависимости рассчитывается коэффициент корреляции по формуле:

$$r = b \cdot \sqrt{\frac{n\Sigma \delta_i^2 - (\Sigma \delta_i)^2}{n\Sigma \sigma_{Bi}^2 - (\Sigma \sigma_{Bi})^2}} = 1,786 \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot 3115 - (125)^2}{6 \cdot 373369 - (1493)^2}} = 0,937.$$

В табл. 3.17 приведены данные для расчета коэффициентов регрессии линейной зависимости относительного удлинения от числа пор.

Данные для расчета коэффициентов регрессии линейной зависимости относительного удлинения от числа пор

Таблица 3.17

№	$\Delta\ell_i$	δ_i	$\Delta\ell_i^2$	$\Delta\ell_i\delta_i$	δ_i^2	$\Delta\ell_i + \delta_i$	$(\Delta\ell_i + \delta_i)^2$
1	14,08	16	198,2464	225,28	256	30,08	904,8064
2	13,28	28	176,3584	371,84	784	41,28	1704,0384
3	13,22	20	174,7684	264,4	400	33,22	1103,5684
4	15,71	9	246,8041	141,39	81	24,71	610,5841
5	12,23	37	149,5729	452,51	1369	49,23	2423,5929
6	14,5	15	210,25	217,5	225	29,5	870,25
Σ	83,02	125	1156,0002	1672,92	3115		7616,8402

Точность расчетов проверяется по формуле:

$$\Sigma(\Delta\ell_i + \delta_i)^2 = \Sigma \Delta\ell_i^2 + 2\Sigma\Delta\ell_i\delta_i + \Sigma\delta_i^2 = 1156,0002 + 2 \cdot 1672,92 + 3115 = 7616,8402.$$

Коэффициенты уравнения регрессии линейной зависимости рассчитываются по формулам:

$$b = \frac{n\Sigma\Delta\ell_i\delta_i - \Sigma\Delta\ell_i\Sigma\delta_i}{n\Sigma\delta_i^2 - (\Sigma\delta_i)^2} = \frac{6 \cdot 1672,92 - 83,02 \cdot 125}{6 \cdot 3115 - (125)^2} = -0,111,$$

$$\alpha = \frac{\Sigma\Delta\ell_i - b\Sigma\delta_i}{n} = \frac{83,02 + 0,111 \cdot 125}{6} = 16,15$$

Линейная зависимость имеет вид:

$$\Delta\ell = 16,15 - 0,111\delta.$$

Для проверки линейности полученной зависимости рассчитывается коэффициент корреляции по формуле:

$$r = b \cdot \sqrt{\frac{n\Sigma\delta_i^2 - (\Sigma\delta_i)^2}{n\Sigma\Delta\ell_i^2 - (\Sigma\Delta\ell_i)^2}} = 0,111 \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot 3115 - (125)^2}{6 \cdot 1156,0002 - (83,02)^2}} = 0,929.$$

В табл.3.18 приведены данные для расчета коэффициентов регрессии линейной зависимости предела текучести от числа пор.

Данные для расчета коэффициентов регрессии линейной зависимости предела текучести от числа пор

Таблица 3.18

№	σ_{Ti}	δ_i	σ_{Ti}^2	$\sigma_{Ti}\delta_i$	δ_i^2	$\sigma_{Ti} + \delta_i$	$(\sigma_{Ti} + \delta_i)^2$
1	129	16	16641	2064	256	145	21025
2	124	28	15376	3472	784	152	23104
3	131	20	17161	2620	400	151	22801
4	138	9	19044	1242	81	147	21609
5	120	37	14400	4440	1369	157	19600
6	125	15	15625	1875	225	140	70225
Σ	767	125	98247	15713	3115		132788

Точность расчетов проверяется по формуле:

$$\Sigma(\sigma_{Ti} + \delta_i)^2 = \Sigma\sigma_{Ti}^2 + 2\Sigma\sigma_{Ti}\delta_i + \Sigma\delta_i^2 = 98247 + 2 \cdot 15713 + 3115 = 132788.$$

Коэффициенты уравнения регрессии линейной зависимости рассчитываются по формулам:

$$b = \frac{n\Sigma\sigma_{Ti}\delta_i - \Sigma\sigma_{Ti}\Sigma\delta_i}{n\Sigma\delta_i^2 - (\Sigma\delta_i)^2} = \frac{6 \cdot 30192 - 1493 \cdot 125}{6 \cdot 3115 - (125)^2} = -0,521,$$

$$a = \frac{\Sigma\sigma_{Ti} - b\Sigma\delta_i}{n} = \frac{1493 + 1,786 \cdot 125}{6} = 138,69$$

Линейная зависимость имеет вид:

$$\sigma_T = 138,69 - 0,521\delta.$$

Для проверки линейности полученной зависимости рассчитывается коэффициент корреляции по формуле:

$$r = b \cdot \sqrt{\frac{n\Sigma\delta_i^2 - (\Sigma\delta_i)^2}{n\Sigma\sigma_{Ti}^2 - (\Sigma\sigma_{Ti})^2}} = 0,521 \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot 3115 - (125)^2}{6 \cdot 373369 - (1493)^2}} = 0,835.$$

Степенная зависимость

В табл.3.19 приведены данные для расчета коэффициентов регрессии степенной зависимости предела прочности от числа пор [63].

Данные для расчета коэффициентов регрессии степенной зависимости предела прочности от числа пор

Таблица 3.19

№	$\ln\sigma_{Bi}$	$\ln\delta_i$	$(\ln\sigma_{Bi})^2$	$\ln\sigma_{Bi}\ln\delta_i$	$(\ln\delta_i)^2$	$\ln\sigma_{Bi} + \ln\delta_i$	$(\ln\sigma_{Bi} + \ln\delta_i)^2$
1	5,533	2,77	30,614089	15,32641	7,6729	8,303	68,939809
2	5,489	3,33	30,129121	18,27837	11,0889	8,819	77,774761
3	5,553	2,99 3	30,835809	16,62012 9	8,958049	8,546	73,034116
4	5,613	2,19 7	31,505769	12,33176 1	4,826806	7,81	60,9961
5	5,375	3,61	28,890625	19,40375	13,0321	8,985	80,730225
6	5,4215	2,71	29,39266225	14,69226 5	7,3441	8,131 5	66,12129225
Σ	32,984 4	17,6 1	181,3680752 5	96,65268 5	52,92285 8		427,5963032 5

Точность расчетов проверяется по формуле:

$$\Sigma(\ln\sigma_{Bi} + \ln\delta_i)^2 = \Sigma(\ln\sigma_{Bi})^2 + 2\Sigma\ln\sigma_{Bi}\ln\delta_i + \Sigma(\ln\delta_i)^2 = 181,36807525 + 2 \cdot 96,652685 + 52,922858 = 427,59630325.$$

Коэффициенты уравнения регрессии степенной зависимости рассчитываются по формулам:

$$b = \frac{n\Sigma\ln\sigma_{Bi}\ln\delta_i - \Sigma\ln\sigma_{Bi}\Sigma\ln\delta_i}{n\Sigma\ln\delta_i^2 - (\Sigma\ln\delta_i)^2} = \frac{6 \cdot 96,652685 - 32,9844 \cdot 17,61}{6 \cdot 52,922858 - (17,61)^2} = -0,1265,$$

$$\ln\alpha = \frac{\Sigma\ln\sigma_{Bi} - b\Sigma\ln\delta_i}{n} = \frac{32,9844 + 0,1265 \cdot 17,61}{6} = 5,8686775, a = 353,781.$$

Степенная зависимость имеет вид:

$$\sigma_B = 353,781\delta^{-0,1265}.$$

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле:

$$r = b \sqrt{\frac{n\Sigma\ln\delta_i^2 - (\Sigma\ln\delta_i)^2}{n\Sigma\ln\sigma_{Bi}^2 - (\Sigma\ln\sigma_{Bi})^2}} = 0,1265 \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot 52,922858 - (17,61)^2}{6 \cdot 181,36807525 - (32,9844)^2}} = 0,71.$$

В табл.3.20 приведены данные для расчета коэффициентов регрессии степенной зависимости относительного удлинения от числа пор.

Данные для расчета коэффициентов регрессии степенной зависимости относительного удлинения от числа пор

Таблица 3.20

№	$\ln \Delta \ell_i$	$\ln \delta_i$	$(\ln \Delta \ell_i)^2$	$\ln \Delta \ell_i \ln \delta_i$	$(\ln \delta_i)^2$	$\ln \Delta \ell_i + \ln \delta_i$	$(\ln \Delta \ell_i + \ln \delta_i)^2$
1	2,645	2,77	6,996025	7,32665	7,6729	5,415	29,322225
2	2,586	3,33	6,687396	8,61138	11,0889	5,916	34,999056
3	2,58	2,993	6,6564	7,72194	8,958049	5,573	31,058329
4	2,75	2,197	7,5625	6,04175	4,826806	4,947	24,472809
5	2,5	3,61	6,25	9,025	13,0321	6,11	37,3321
6	2,67	2,71	7,1289	7,2357	7,3441	5,38	28,9444
Σ	15,731	17,61	41,281221	45,96242	52,922858		186,128919

Точность расчетов проверяется по формуле:

$$\Sigma(\ln \Delta \ell_i + \ln \delta_i)^2 = \Sigma(\ln \Delta \ell_i)^2 + 2 \Sigma \ln \Delta \ell_i \ln \delta_i + \Sigma(\ln \delta_i)^2 = 41,281221 + 2 \cdot 45,96242 + 52,922858 = 186,128919.$$

Коэффициенты уравнения регрессии степенной зависимости рассчитываются по формулам:

$$b = \frac{n \Sigma \ln \Delta \ell_i \ln \delta_i - \Sigma \ln \Delta \ell_i \Sigma \ln \delta_i}{n \Sigma \ln \delta_i^2 - (\Sigma \ln \delta_i)^2} = \frac{6 \cdot 45,96242 - 15,731 \cdot 17,61}{6 \cdot 52,922858 - (17,61)^2} = -0,168,$$

$$\ln \alpha = \frac{\Sigma \ln \Delta \ell_i - b \Sigma \ln \delta_i}{n} = \frac{15,731 + 0,168 \cdot 17,61}{6} = 3,11491, a = 22,5315.$$

Степенная зависимость имеет вид:

$$\Delta \ell = 22,5315 \delta^{-0,168}.$$

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле:

$$r = b \sqrt{\frac{n \Sigma \ln \delta_i^2 - (\Sigma \ln \delta_i)^2}{n \Sigma \ln \Delta \ell_i^2 - (\Sigma \ln \Delta \ell_i)^2}} = 0,168 \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot 52,922858 - (17,61)^2}{6 \cdot 41,281221 - (15,731)^2}} = 0,969.$$

В табл.3.21 приведены данные для расчета коэффициентов регрессии степенной зависимости предела текучести от числа пор.

Данные для расчета коэффициентов регрессии степенной зависимости предела текучести от числа пор

Таблица 3.21

№	$\ln \sigma_{Ti}$	$\ln \delta_i$	$(\ln \sigma_{Ti})^2$	$\ln \sigma_{Ti} \ln \delta_i$	$(\ln \delta_i)^2$	$\ln \sigma_{Ti} + \ln \delta_i$	$(\ln \sigma_{Ti} + \ln \delta_i)^2$
1	4,86	2,77	23,6196	13,4622	7,6729	7,63	58,2169
2	4,82	3,33	23,2324	16,0506	11,0889	8,15	66,4225
3	4,875	2,993	23,765625	14,590875	8,958049	7,868	61,905424
4	4,93	2,197	24,3049	10,83121	4,826806	7,127	50,794129
5	4,79	3,61	22,9441	17,2919	13,0321	8,4	70,56
6	4,83	2,71	23,3289	13,0893	7,3441	7,54	56,8516
Σ	29,105	17,61	141,195525	85,316085	52,922858		364,750553

Точность расчетов проверяется по формуле:

$$\Sigma(\ln \sigma_{Ti} + \ln \delta_i)^2 = \Sigma(\ln \sigma_{Ti})^2 + 2\Sigma \ln \sigma_{Ti} \ln \delta_i + \Sigma(\ln \delta_i)^2 = 141,195525 + 2 \cdot 85,316085 + 52,922858 = 364,750553.$$

Коэффициенты уравнения регрессии степенной зависимости рассчитываются по формулам:

$$b = \frac{n \Sigma \ln \sigma_{Ti} \ln \delta_i - \Sigma \ln \sigma_{Ti} \Sigma \ln \delta_i}{n \Sigma \ln \delta_i^2 - (\Sigma \ln \delta_i)^2} = \frac{6 \cdot 96,652685 - 32,9844 \cdot 17,61}{6 \cdot 52,922858 - (17,61)^2} = -0,0865,$$

$$\ln \alpha = \frac{\Sigma \ln \sigma_{Ti} - b \Sigma \ln \delta_i}{n} = \frac{32,9844 + 0,1265 \cdot 17,61}{6} = 5,1047, \quad a = 164,8.$$

Степенная зависимость имеет вид:

$$\sigma_T = 164,8 \delta^{-0,0865}.$$

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле:

$$r = b \cdot \frac{\sqrt{n \Sigma \ln \delta_i^2 - (\Sigma \ln \delta_i)^2}}{\sqrt{n \Sigma \ln \sigma_{Ti}^2 - (\Sigma \ln \sigma_{Ti})^2}} = 0,0865 \cdot \frac{\sqrt{6 \cdot 52,922858 - (17,61)^2}}{\sqrt{6 \cdot 181,36807525 - (32,9844)^2}} = 0,88.$$

Экспоненциальная зависимость

В табл. 3.22 приведены данные для расчета коэффициентов регрессии экспоненциальной зависимости предела прочности от количества пор [63].

Данные для расчета коэффициентов регрессии экспоненциальной зависимости предела прочности от количества пор

Таблица 3.22

№	$\ln\sigma_{Bi}$	δ_i	$(\ln\sigma_{Bi})^2$	$\delta_i \ln\sigma_{Bi}$	δ_i^2	$\ln\sigma_{Bi} + \delta_i$	$(\ln\sigma_{Bi} + \delta_i)^2$
1	5,533	16	30,614089	88,528	256	21,533	463,670089
2	5,489	28	30,129121	153,692	784	33,489	1121,513121
3	5,553	20	30,835809	111,06	400	25,553	652,955809
4	5,613	9	31,505769	50,517	81	14,613	213,539769
5	5,375	37	28,890625	198,875	1369	42,375	1795,640625
6	5,4215	15	29,39266225	81,3225	225	20,4215	417,03766225
Σ	32,9844	125	181,36807525	683,9945	3115		4664,35707525

Точности расчетов проверяется по формуле:

$$\Sigma(\ln\sigma_{Bi} + \delta_i)^2 = \Sigma\ln\sigma_{Bi}^2 + 2\Sigma\delta_i \ln\sigma_{Bi} + \Sigma\delta_i^2 = 181,36807525 + 2 \cdot 683,9925 + 3115 = 4664,35707525.$$

Коэффициенты уравнения регрессии экспоненциальной зависимости рассчитываются по формулам:

$$b = \frac{n\Sigma\ln\sigma_{Bi}\delta_i - \Sigma\ln\sigma_{Bi}\Sigma\delta_i}{n\Sigma\delta_i^2 - (\Sigma\delta_i)^2} = \frac{6 \cdot 683,9945 - 32,9844 \cdot 125}{6 \cdot 3115 - (125)^2} = -0,0062,$$

$$\ln\alpha = \frac{\Sigma\ln\sigma_{Bi} - b\Sigma\delta_i}{n} = \frac{32,9844 + 0,0062 \cdot 125}{6} = 5,6266, \quad a = 277,71.$$

Экспоненциальная зависимость имеет вид:

$$\sigma_B = 277,71 \cdot e^{-0,0062\delta}.$$

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле:

$$r = b \cdot \sqrt{\frac{n\Sigma\delta_i^2 - (\Sigma\delta_i)^2}{n\Sigma\ln\sigma_{Bi}^2 - (\Sigma\ln\sigma_{Bi})^2}} = 0,0062 \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot 3115 - (125)^2}{6 \cdot 181,36807525 - (32,9844)^2}} = 0,7.$$

В табл. 3.23 приведены данные для расчета коэффициентов регрессии экспоненциальной зависимости относительного удлинения от количества пор.

Данные для расчета коэффициентов регрессии экспоненциальной зависимости относительного удлинения от количества пор

Таблица 3.23

№	$\ln \Delta \ell_i$	δ_i	$(\ln \Delta \ell_i)^2$	$\ln \Delta \ell_i \delta_i$	δ_i^2	$\ln \Delta \ell_i + \delta_i$	$(\ln \Delta \ell_i + \delta_i)^2$
1	2,645	16	6,996025	42,32	256	18,645	347,636025
2	2,586	28	6,687396	72,408	784	30,586	935,503396
3	2,58	20	6,6564	51,6	400	22,58	509,8564
4	2,75	9	7,5625	24,75	81	11,75	138,0625
5	2,5	37	6,25	92,5	1369	39,5	1560,25
6	2,67	15	7,1289	40,05	225	17,67	312,2289
Σ	15,731	125	41,281221	323,628	3115		3803,537221

Точности расчетов проверяется по формуле:

$$\Sigma(\ln \Delta \ell_i + \delta_i)^2 = \Sigma \ln \Delta \ell_i^2 + 2 \ln \Delta \ell_i \Sigma \delta_i + \Sigma \delta_i^2 = 41,281221 + 2 \cdot 323,628 + 3115 = 4664,35707525.$$

Коэффициенты уравнения регрессии экспоненциальной зависимости рассчитываются по формулам:

$$b = \frac{n \Sigma \ln \Delta \ell_i \delta_i - \Sigma \ln \Delta \ell_i \Sigma \delta_i}{n \Sigma \delta_i^2 - (\Sigma \delta_i)^2} = \frac{6 \cdot 323,628 - 15,731 \cdot 125}{6 \cdot 3115 - (125)^2} = -0,008,$$

$$\ln a = \frac{\Sigma \ln \Delta \ell_i - b \Sigma \delta_i}{n} = \frac{15,731 + 0,008 \cdot 125}{6} = 2,7885, a = 16,2566.$$

Экспоненциальная зависимость имеет вид:

$$\Delta \ell = 16,2566 \cdot e^{-0,008 \delta}.$$

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле:

$$r = b \sqrt{\frac{n \Sigma \delta_i^2 - (\Sigma \delta_i)^2}{n \Sigma \ln \Delta \ell_i^2 - (\Sigma \ln \Delta \ell_i)^2}} = 0,008 \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot 3115 - (125)^2}{6 \cdot 41,281221 - (15,731)^2}} = 0,936.$$

В табл. 3.24 приведены данные для расчета коэффициентов регрессии экспоненциальной зависимости предела текучести от количества пор.

Данные для расчета коэффициентов регрессии экспоненциальной зависимости предела текучести от количества пор

Таблица 3.24

№	$\ln\sigma_{Ti}$	δ_i	$(\ln\sigma_{Ti})^2$	$\ln\sigma_{Ti}\delta_i$	δ_i^2	$\ln\sigma_{Ti} + \delta_i$	$(\ln\sigma_{Ti} + \delta_i)^2$
1	4,86	16	23,6196	77,76	256	20,86	435,1396
2	4,82	28	23,2324	134,96	784	32,82	1077,1524
3	4,875	20	23,765625	97,5	400	24,875	618,765625
4	4,93	9	24,3049	44,37	81	13,93	213,539769
5	4,79	37	22,9441	177,23	1369	41,79	1746,4041
6	4,83	15	23,3289	72,45	225	19,83	393,2289
Σ	29,105	125	141,195525	604,27	3115		4464,735525

Точности расчетов проверяется по формуле:

$$\Sigma(\ln\sigma_{Ti} + \delta_i)^2 = \Sigma\ln\sigma_{Ti}^2 + 2\Sigma\ln\sigma_{Ti}\delta_i + \Sigma\delta_i^2 = 141,195525 + 2 \cdot 604,27 + 3115 = 4464,735525.$$

Коэффициенты уравнения регрессии экспоненциальной зависимости рассчитываются по формулам:

$$b = \frac{n\Sigma\ln\sigma_{Ti}\delta_i - \Sigma\ln\sigma_{Ti}\Sigma\delta_i}{n\Sigma\delta_i^2 - (\Sigma\delta_i)^2} = \frac{6 \cdot 683,9945 - 32,9844 \cdot 125}{6 \cdot 3115 - (125)^2} = -0,0041,$$

$$\ln\alpha = \frac{\Sigma\ln\sigma_{Ti} - b\Sigma\delta_i}{n} = \frac{29,105 + 0,0041 \cdot 125}{6} = 4,936, a = 139,247.$$

Экспоненциальная зависимость имеет вид:

$$\sigma_T = 139,247 \cdot e^{-0,0041\delta}.$$

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле:

$$r = b \sqrt{\frac{n \Sigma \delta_i^2 - (\Sigma \delta_i)^2}{n \Sigma \ln\sigma_{Ti}^2 - (\Sigma \ln\sigma_{Ti})^2}} = 0,0041 \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot 3115 - (125)^2}{6 \cdot 141,195525 - (29,105)^2}} = 0,845.$$

В результате регрессионного анализа получены три зависимости предела прочности от количества пор, имеющие вид:

$$\sigma_B = 286,042 - 1,786\delta, \quad (3.11)$$

$$\sigma_B = 353,781\delta^{-0,1265}, \quad (3.12)$$

$$\sigma_B = 277,71 \cdot e^{-0,0062\delta}. \quad (3.13)$$

В табл. 3.25 представлены фактические значения предела прочности сварных швов и рассчитанные по зависимостям (3.11) – (3.13) и погрешность расчетов.

**Фактические значения предела прочности сварных швов и
рассчитанные по зависимостям (3.11) – (3.13) и погрешность расчетов**

Таблица 3.25

№ п/п	δ, шт	σВфакт., Мпа	σВрасч. (3.11), Мпа	Δ, %	σВрасч. (3.12), МПа	Δ, %	σВрасч. (3.13), МПа	Δ, %
1	16	253	257,466	1,76	249,12	1,5	251,4835	0,6
2	28	242	236,034	2,46	232,097	4,1	233,452	3,5
3	20	258	250,322	2,97	242,19	6,1	245,32	4,9
4	9	274	269,968	1,47	267,93	2,2	262,6382	4,1
5	37	216	219,96	1,83	224,056	3,7	220,78	2,2
6	15	250	259,252	3,7	251,165	0,47	253,048	1,22
				Δср = 2,365%		Δср = 3,01%		Δср = 2,75%

В табл. 3.25 видно, что минимальная погрешность расчетов у линейной зависимости (3.11).

В результате регрессионного анализа получены три зависимости относительного удлинения от количества пор, имеющие вид:

$$\Delta l = 16,15 - 0,111\delta, \quad (3.14)$$

$$\Delta l = 22,5315\delta^{-0,168}, \quad (3.15)$$

$$\Delta l = 16,2566 \cdot e^{-0,008\delta}. \quad (3.16)$$

В табл. 3.26 представлены фактические значения относительного удлинения сварных швов и рассчитанные по зависимостям (3.14) – (3.16) и погрешность расчетов.

Фактические значения относительного удлинения сварных швов и рассчитанные по зависимостям (3.14) – (3.16) и погрешность расчетов

Таблица 3.26

№ п/п	δ, шт	Δℓфакт., %	Δℓрасч. (3.14), %	Δ, %	Δℓрасч. (3.15), %	Δ, %	Δℓрасч. (3.16), %	Δ, %
1	16	14,08	14,374	2,1	14,1416	0,44	14,30342	1,58
2	28	13,28	13,042	1,8	12,873	3,1	12,994146	2,15
3	20	13,22	13,93	5,4	13,6213	3,04	13,85296	4,8
4	9	15,71	15,151	3,56	15,5768	0,85	15,12727	3,71
5	37	12,23	12,043	1,53	12,2838	0,44	14,41831	1,13
6	15	14,5	14,485	0,103	14,2957	1,41	253,047	0,56
1				Δср = 2,42%		Δср = 1,55%		Δср = 2,32%

В табл. 3.26 видно, что минимальная погрешность расчетов у степенной зависимости (3.15).

В результате регрессионного анализа получены три зависимости предела текучести от количества пор, имеющие вид:

$$\sigma_T = 138,69 - 0,521\delta, \quad (3.17)$$

$$\sigma_T = 164,8\delta^{-0,0865}, \quad (3.18)$$

$$\sigma_T = 139,247 \cdot e^{-0,0041\delta}. \quad (3.19)$$

В табл. 3.27 представлены фактические значения предела текучести сварных швов и рассчитанные по зависимостям (3.17) – (3.19) и погрешность расчетов.

**Фактические значения предела текучести сварных швов и
рассчитанные по зависимостям (3.17) – (3.19) и погрешность расчетов**

Таблица 3.27

№ п/п	δ, шт	σ _Т факт., МПа	σ _Т расч. (3.17), Мпа	Δ, %	σ _Т расч. (3.18), МПа	Δ, %	σ _Т расч. (3.19), МПа	Δ, %
1	16	129	130,344	1,04	129,658	0,51	130,405	1,09
2	28	124	124,102	0,08	123,53	0,38	124,145	0,12
3	20	131	128,27	2,08	127,18	2,9	128,284	2,07
4	9	138	134,001	2,9	136,27	1,25	134,202	2,75
5	37	120	119,413	0,49	120,59	0,49	119,647	0,29
6	15	125	130,875	4,7	130,38	4,3	253,048	4,75
				Δ _{ср} = 1,88%		Δ _{ср} = 1,64%		Δ _{ср} = 1,845%

В табл. 3.27 видно, что минимальная погрешность расчетов у степенной зависимости (3.18).

Вышеприведённый анализ показал, что наибольшую адекватность фактических и рассчитанных характеристик прочности сварных швов дают следующие зависимости:

$$\sigma_B = 286,042 - 1,786\delta, \quad (3.11)$$

$$\Delta l = 22,5315\delta^{-0,168}, \quad (3.15)$$

$$\sigma_T = 164,8\delta^{-0,0865}, \quad (3.18)$$

которые с высокой точностью можно использовать для расчета основных характеристик прочности сварных швов в зависимости от количества пор.

3.3.4 Влияние пор на снижение характеристик прочности сварных швов

Автор работы [55] утверждает, что наличие пор в сварном шве, ослабляющих поперечное сечение сварного соединения до 10% не влияют на несущую способность сварной конструкции.

В табл. 3.28 представлены величины снижения характеристик прочности сварных швов в зависимости от количества пор, их площади и отношения в процентах к площади сварного шва (средняя площадь сварного шва - 21,5 мм²).

Для определения величины снижения характеристик прочности предварительно по линейным зависимостям определялась соответствующая характеристика прочности сварного шва при нулевом значении количества пор, т.е. максимальная величина соответствующей характеристики прочности, (например $\sigma_{Вmax}$). Процент снижения соответствующей характеристики прочности в зависимости от количества пор определялся с учетом ее максимального значения, например:

$$CH\sigma_B = \frac{\sigma_{Вmax} - \sigma_{Вфакт}}{\sigma_{Вmax}} \cdot 100, \%$$

Величины снижения характеристик прочности сварных швов в зависимости от количества пор, их площади и отношения в процентах к площади сварного шва

Таблица 3.28

№	δ , шт	ΣS пор, мм ²	ΣS пор, %	сн σ_B , %	сн Δl , %	сн σ_T , %
1	16	0,8	3,7	11,55	12,8	6,98
2	28	1,4	6,5	15,39	17,8	10,6
3	20	1,0	4,65	9,8	18,1	5,5
4	9	0,45	2,1	4,21	2,7	0,5
5	37	1,85	8,6	24,48	24,3	13,5
6	15	0,75	3,5	12,6	10,2	9,9

Как видно из таблицы 3.28 площадь пор не превышает 8,6% площади сварного шва, однако снижение всех характеристик прочности сварных швов имеет место и в некоторых случаях, снижение предела прочности и относительного удлинения превышает 20%. Характер зависимостей уменьшения характеристик прочности сварных швов от количества пор показан на соответствующих графиках, рис. 3.13 – 3.15.

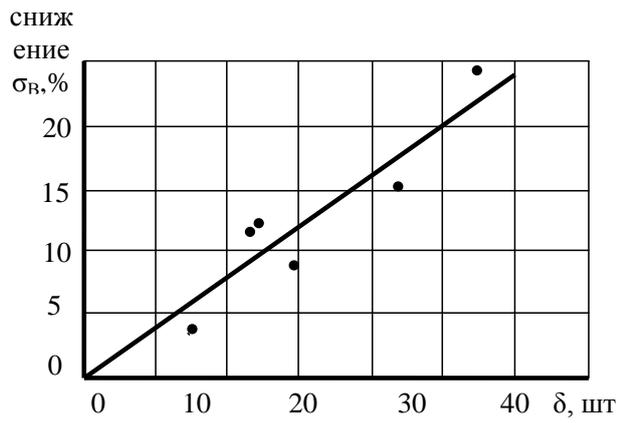


Рисунок 3.13 – Зависимость снижения предела прочности от количества пор

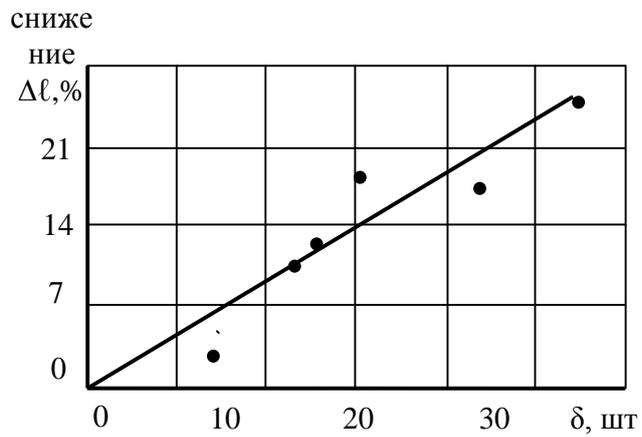


Рисунок 3.14 – Зависимость снижения относительного удлинения от количества пор

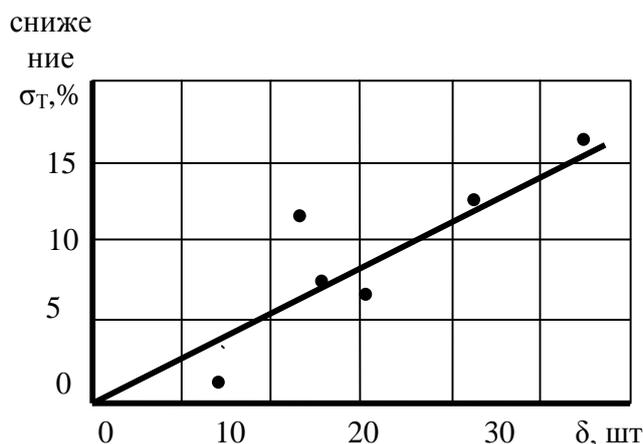


Рисунок 3.13 – Зависимость снижения предела текучести от количества пор

В табл. 3.29 представлены данные необходимые для расчета коэффициента корреляции Пирсона между снижением предела прочности и количеством пор

Данные для расчета коэффициента корреляции Пирсона между снижением предела прочности и количеством пор

Таблица 3.29

№	снσ _B , %	δ, шт	$(y_i - \bar{y})$	$(x_i - \bar{x})$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})$
1	11,55	16	-1,455	-4,83	2,117025	23,3289	7,02765
2	15,39	28	2,385	7,17	5,688225	51,4089	17,10045
3	9,8	20	-3,205	-0,83	10,272025	0,6889	2,66015
4	4,21	9	-8,795	-11,83	77,352025	139,9489	104,04485
5	24,48	37	11,475	16,17	131,675625	261,4689	185,55075
6	12,6	15	-0,4025	-5,83	0,16200625	33,9089	2,346575
Σ	78,03	125			227,26693125	482,6745	318,730425
ср	13,005	20,83					

В табл. 3.30 представлены данные необходимые для расчета коэффициента корреляции Пирсона между снижением относительного удлинения и количеством пор

**Данные для расчета коэффициента корреляции Пирсона между
снижением относительного удлинения и количеством пор**

Таблица 3.30

№	сн $\Delta\ell$, %	δ , шт	$(y_i - \bar{y})$	$(x_i - \bar{x})$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})$
1	12,8	16	-1,5	-4,83	2,25	23,3289	7,245
2	17,8	28	3,5	7,17	12,25	51,4089	25,095
3	18,1	20	3,8	-0,83	14,44	0,6889	-3,154
4	2,7	9	-11,6	-11,83	134,56	139,9489	137,228
5	24,3	37	10	16,17	213,16	100	161,7
6	10,2	15	-4,1	-5,83	36,8449	16,81	23,903
Σ	85,9	125			280,31	482,6745	352,017
ср	14,3	20,83					

В табл. 3.31 представлены данные необходимые для расчета коэффициента корреляции Пирсона между снижением предела текучести и количеством пор

**Данные для расчета коэффициента корреляции Пирсона между
снижением предела текучести и количеством пор**

Таблица 3.31

№	сн σ_T ,%	δ ,шт	$(y_i - \bar{y})$	$(x_i - \bar{x})$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})$
1	6,98	16	-0,85	-4,83	0,7225	23,3289	4,1055
2	10,6	28	2,77	7,17	7,6729	51,4089	19,8609
3	5,5	20	-2,33	-0,83	5,4289	0,6889	1,9339
4	0,5	9	-7,33	-11,83	53,7289	139,9489	86,7139
5	13,5	37	5,67	16,17	32,1489	261,4689	91,6839
6	9,9	15	2,07	-5,83	4,2849	33,9089	-12,0681
Σ	46,98	125			103,987	482,6745	192,23
ср	7,83	20,83					

В табл. 3.32 представлены соответствующие коэффициенты корреляции.

Коэффициенты корреляции

Таблица 3.32

сравн. зн.	$\text{сн}\sigma_B - \delta$	$\text{сн}\Delta\ell - \delta$	$\text{сн}\sigma_T - \delta$
r	0,962	0,957	0,86

Все представленные в табл. 3.32 коэффициенты корреляции значимые. Уровень их значимости близок к 0,01 [63], что позволяет посредством регрессионного анализа построить уравнения регрессии и выбрать наиболее подходящие из них.

3.3.4.1 Построение уравнений регрессии зависимостей характеристик снижения прочности сварных швов от количества пор и выбор наиболее подходящих из них

Линейная зависимость

В табл.3.33 приведены данные для расчета коэффициентов регрессии линейной зависимости снижения предела прочности от количества пор.

Данные для расчета коэффициентов регрессии линейной зависимости снижения предела прочности от количества пор

Таблица 3.33

№	снσВ, %	δi	снσВi ²	снσВiδi	δi ²	снσВi + δi	(снσВi+δi) ²
1	11,55	16	133,4025	184,8	256	27,55	759,0025
2	15,39	28	236,8521	430,92	784	43,39	1882,6921
3	9,8	20	96,04	196	400	29,8	888,04
4	4,21	9	17,7241	233,89	81	13,21	174,5041
5	24,48	37	599,2704	905,76	1369	61,48	3779,7904
6	12,6	15	158,76	189	225	27,6	761,76
Σ	78,03	125	1242,0491	1944,37	3115		8245,7891

Точность расчетов проверяется по формуле:

$$\Sigma(\text{сн}\sigma_{\text{В}i} + \text{сн}\delta_i)^2 = \Sigma \text{сн}\sigma_{\text{В}i}^2 + 2\Sigma \text{сн}\sigma_{\text{В}i}\delta_i + \Sigma \delta_i^2 = 1242,0491 + 2 \cdot 1944,37 + 3115 = 8245,7891.$$

Коэффициенты уравнения регрессии линейной зависимости рассчитываются по формулам:

$$b = \frac{n \Sigma \text{сн}\sigma_{\text{В}i}\delta_i - \Sigma \text{сн}\sigma_{\text{В}i} \Sigma \delta_i}{n \Sigma \delta_i^2 - (\Sigma \delta_i)^2} = \frac{6 \cdot 1944,37 - 78,03 \cdot 125}{6 \cdot 3115 - (125)^2} = 0,62,$$

$$\alpha = \frac{\Sigma \text{сн}\sigma_{\text{В}i} - b \Sigma \delta_i}{n} = \frac{78,03 - 0,62 \cdot 125}{6} = 0,088$$

Линейная зависимость имеет вид:

$$\text{сн}\sigma_{\text{В}} = 0,088 + 0,62\delta.$$

Для проверки линейности полученной зависимости рассчитывается коэффициент корреляции по формуле:

$$r = b \cdot \sqrt{\frac{n \Sigma \delta_i^2 - (\Sigma \delta_i)^2}{n \Sigma \text{сн}\sigma_{\text{В}i}^2 - (\Sigma \text{сн}\sigma_{\text{В}i})^2}} = 0,62 \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot 3115 - (125)^2}{6 \cdot 1242,0491 - (78,03)^2}} = 0,929.$$

В табл.3.34 приведены данные для расчета коэффициентов регрессии линейной зависимости снижения относительного удлинения от количества пор.

Данные для расчета коэффициентов регрессии линейной зависимости снижения относительного удлинения от количества пор

Таблица 3.34

№	снΔℓ _i , %	δ _i	снΔℓ _i ²	снΔℓ _i δ _i	δ _i ²	снΔℓ _i + δ _i	(снΔℓ _i + δ _i) ²
1	12,8	16	163,84	204,8	256	28,8	829,44
2	17,8	28	316,84	498,4	784	45,8	2097,64
3	18,1	20	327,61	362	400	38,1	1451,61
4	2,7	9	7,29	24,3	81	11,7	136,89
5	24,3	37	590,49	899,1	1369	61,3	3757,69
6	10,2	15	104,04	153	225	25,2	635,04
Σ	85,9	125	1510,11	2141,6	3115		8908,31

Точность расчетов проверяется по формуле:

$$\Sigma(\text{сн}\Delta\ell_i + \delta_i)^2 = \Sigma\text{сн}\Delta\ell_i^2 + 2\Sigma\text{сн}\Delta\ell_i\delta_i + \Sigma\delta_i^2 = 1510,11 + 2 \cdot 2141,6 + 3115 = 8908,31.$$

Коэффициенты уравнения регрессии линейной зависимости рассчитываются по формулам:

$$b = \frac{n\Sigma\text{сн}\Delta\ell_i\delta_i - \Sigma\text{сн}\Delta\ell_i\Sigma\delta_i}{n\Sigma\delta_i^2 - (\Sigma\delta_i)^2} = \frac{6 \cdot 2141,6 - 85,9 \cdot 125}{6 \cdot 3115 - (125)^2} = 0,69$$

$$\alpha = \frac{\Sigma\text{сн}\Delta\ell_i - b\Sigma\delta_i}{n} = \frac{85,9 - 0,69 \cdot 125}{6} = -0,058$$

Линейная зависимость имеет вид:

$$\text{сн}\Delta\ell_i = 0,69\delta - 0,058.$$

Для проверки линейности полученной зависимости рассчитывается коэффициент корреляции по формуле:

$$r = b \cdot \sqrt{\frac{n \Sigma \delta_i^2 - (\Sigma \delta_i)^2}{n \Sigma \text{сн}\Delta\ell_i^2 - (\Sigma \text{сн}\Delta\ell_i)^2}} = 0,69 \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot 3115 - (125)^2}{6 \cdot 1510,11 - (85,9)^2}} = 0,93.$$

В табл.3.35 приведены данные для расчета коэффициентов регрессии линейной зависимости снижения предела текучести от количества пор.

Данные для расчета коэффициентов регрессии линейной зависимости снижения предела текучести сварных швов от количества пор

Таблица 3.35

№	снσТi	δi	снσТi 2	снσТiδi	δi2	снσТi + δi	(снσТi +δi)2
1	6,98	16	48,7204	111,68	256	22,98	528,0804
2	10,6	28	112,36	296,8	784	38,6	1489,96
3	5,5	20	30,25	110	400	25,5	650,25
4	0,5	9	0,25	4,5	81	9,5	90,25
5	13,5	37	182,25	499,5	1369	50,5	2550,25
6	9,9	15	98,01	148,5	225	24,9	620,01
Σ	46,98	125	471,8404	1170,98	3115		5928,8004

Точность расчетов проверяется по формуле:

$$\sum(\text{сн.}\sigma_{Ti} + \delta_i)^2 = \sum \text{сн}\sigma_{Ti}^2 + 2\sum \text{сн}\sigma_{Ti}\delta_i + \sum \delta_i^2 = 471,8404 + 2 \cdot 1170,98 + 3115 = 5928,8004.$$

Коэффициенты уравнения регрессии линейной зависимости рассчитываются по формулам:

$$b = \frac{n\sum \text{сн}\sigma_{Ti}\delta_i - \sum \text{сн}\sigma_{Ti}\sum \delta_i}{n\sum \delta_i^2 - (\sum \delta_i)^2} = \frac{6 \cdot 1170,98 - 46,98 \cdot 125}{6 \cdot 3115 - (125)^2} = 0,376$$

$$\alpha = \frac{\sum \text{сн}\sigma_{Ti} - b\sum \delta_i}{n} = \frac{46,98 - 0,376 \cdot 125}{6} = -0,003$$

Линейная зависимость имеет вид:

$$\text{сн}\sigma_T = 0,376\delta - 0,003.$$

Для проверки линейности полученной зависимости рассчитывается коэффициент корреляции по формуле:

$$r = b \cdot \sqrt{\frac{n\sum \delta_i^2 - (\sum \delta_i)^2}{n\sum \text{сн}\sigma_{Ti}^2 - (\sum \text{сн}\sigma_{Ti})^2}} = 0,376 \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot 3115 - (125)^2}{6 \cdot 471,8404 - (46,98)^2}} = 0,83.$$

Степенная зависимость

В табл. 3.36 приведены данные для расчета коэффициентов регрессии степенной зависимости предела прочности от количества пор.

Данные для расчета коэффициентов регрессии степенной зависимости предела прочности от количества пор

Таблица 3.36

№	$\ln c n \sigma_{Bi}$	$\ln \delta_i$	$(\ln c n \sigma_{Bi})^2$	$\ln c n \sigma_{Bi} \ln \delta_i$	$(\ln \delta_i)^2$	$\ln c n \sigma_{Bi} + \ln \delta_i$	$(\ln c n \sigma_{Bi} + \ln \delta_i)^2$
1	2,45	2,77	6,0025	6,7865	7,6729	5,22	27,2484
2	2,73	3,33	7,4529	9,0909	11,0889	6,06	36,7236
3	2,28	2,993	5,1984	6,82404	8,958049	5,273	27,804529
4	1,44	2,197	2,0736	3,16368	4,826806	3,637	13,227769
5	3,2	3,61	10,24	11,552	13,0321	6,81	46,3761
6	2,53	2,71	6,4009	6,8563	7,3441	5,24	27,4576
Σ	14,63	17,61	37,3683	44,27342	52,922858		178,837998

Точность расчетов проверяется по формуле:

$$\Sigma(\ln c n \sigma_{Bi} + \ln \delta_i)^2 = \Sigma(\ln c n \sigma_{Bi})^2 + 2 \Sigma \ln c n \sigma_{Bi} \ln \delta_i + \Sigma(\ln \delta_i)^2 = 37,3683 + 2 \cdot 44,27342 + 52,922858 = 178,837998.$$

Коэффициенты уравнения регрессии степенной зависимости рассчитываются по формулам:

$$b = \frac{n \Sigma \ln c n \sigma_{Bi} \ln \delta_i - \Sigma \ln c n \sigma_{Bi} \Sigma \ln \delta_i}{n \Sigma \ln \delta_i^2 - (\Sigma \ln \delta_i)^2} = \frac{6 \cdot 44,27342 - 14,63 \cdot 17,61}{6 \cdot 52,922858 - (17,61)^2} = 1,078,$$

$$\ln \alpha = \frac{\Sigma \ln c n \sigma_{Bi} - b \Sigma \ln \delta_i}{n} = \frac{14,63 - 1,078 \cdot 17,61}{6} = -0,7256, \quad a = 0,484.$$

Степенная зависимость имеет вид:

$$c n \sigma_B = 0,484 \delta^{1,078}.$$

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле:

$$r = b \sqrt{\frac{n \Sigma \ln \delta_i^2 - (\Sigma \ln \delta_i)^2}{n \Sigma \ln c n \sigma_{Bi}^2 - (\Sigma \ln c n \sigma_{Bi})^2}} = 1,078 \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot 52,922858 - (17,61)^2}{6 \cdot 37,3683 - (14,63)^2}} = 0,921.$$

В табл. 3.37 приведены данные для расчета коэффициентов регрессии степенной зависимости относительного удлинения от количества пор.

Данные для расчета коэффициентов регрессии степенной зависимости относительного удлинения от количества пор

Таблица 3.36

№	$\ln \text{сн}\Delta \ell_i$	$\ln \delta_i$	$(\ln \text{сн}\Delta \ell_i)^2$	$\ln \text{сн}\Delta \ell_i \ln \delta_i$	$(\ln \delta_i)^2$	$\ln \text{сн}\Delta \ell_i + \ln \delta_i$	$(\ln \text{сн}\Delta \ell_i + \ln \delta_i)^2$
1	2,55	2,77	6,5025	7,0635	7,6729	5,32	28,3024
2	2,88	3,33	8,2944	9,5904	11,0889	6,21	38,5641
3	2,9	2,993	8,41	8,6797	8,958049	5,893	34,727449
4	1,0	2,197	1	2,197	4,826806	3,197	10,220809
5	3,2	3,61	10,24	11,552	13,0321	6,81	46,3761
6	2,3	2,71	2,59	6,233	7,3441	5,01	25,1001
Σ	14,83	17,61	39,7369	45,3156	52,922858		183,290958

Точности расчетов проверяется по формуле:

$$\Sigma(\ln \text{сн}\Delta \ell_i + \delta_i)^2 = \Sigma \ln \text{сн}\Delta \ell_i^2 + 2 \Sigma \ln \text{сн}\Delta \ell_i \delta_i + \Sigma \delta_i^2 = 39,7369 + 2 \cdot 45,3156 + 52,922858 = 183,290858.$$

Коэффициенты уравнения регрессии степенной зависимости рассчитываются по формулам:

$$b = \frac{n \Sigma \ln \text{сн}\Delta \ell_i \delta_i - \Sigma \ln \text{сн}\Delta \ell_i \Sigma \delta_i}{n \Sigma \delta_i^2 - (\Sigma \delta_i)^2} = \frac{6 \cdot 45,3156 - 14,83 \cdot 17,61}{6 \cdot 52,922858 - (17,61)^2} = 1,446,$$

$$\ln \alpha = \frac{\Sigma \ln \text{сн}\Delta \ell_i - b \Sigma \delta_i}{n} = \frac{14,83 - 1,446 \cdot 17,61}{6} = -1,772, \quad a = 0,17.$$

Степенная зависимость имеет вид:

$$\text{сн}\Delta \ell = 0,17 \cdot \delta^{1,446}.$$

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле:

$$r = b \sqrt{\frac{n \Sigma \delta_i^2 - (\Sigma \delta_i)^2}{n \Sigma \ln \text{сн}\Delta \ell_i^2 - (\Sigma \ln \text{сн}\Delta \ell_i)^2}} = 1,446 \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot 52,922858 - (17,61)^2}{6 \cdot 39,7369 - (14,83)^2}} = 0,92.$$

В табл. 3.38 приведены данные для расчета коэффициентов регрессии степенной зависимости предела текучести от количества пор.

Данные для расчета коэффициентов регрессии степенной зависимости предела текучести от количества пор

Таблица 3.38

№	$\ln \sigma_{Ti}$	$\ln \delta_i$	$(\ln \sigma_{Ti})^2$	$\ln \sigma_{Ti} \ln \delta_i$	$(\ln \delta_i)^2$	$\ln \sigma_{Ti} + \ln \delta_i$	$(\ln \sigma_{Ti} + \ln \delta_i)^2$
1	1,9	2,77	3,61	5,263	7,6729	4,67	21,8089
2	2,4	3,33	5,76	7,992	11,0889	5,73	32,8329
3	1,7	2,993	2,89	5,0881	8,958049	4,693	22,024249
4	-0,7	2,2	0,49	-1,54	4,84	1,5	2,25
5	2,6	3,61	6,76	9,386	13,0321	6,21	38,5641
6	2,3	2,71	5,29	6,233	7,3441	5,01	25,1001
Σ	10,2	17,613	24,8	32,4221	52,936049		142,580249

$$\Sigma(\ln \sigma_{Ti} + \delta_i)^2 = \Sigma \ln \sigma_{Ti}^2 + 2 \Sigma \ln \sigma_{Ti} \delta_i + \Sigma \delta_i^2 = 24,8 + 2 \cdot 32,4221 + 52,936049 = 142,580249.$$

Коэффициенты уравнения регрессии степенной зависимости рассчитываются по формулам:

$$b = \frac{n \Sigma \ln \sigma_{Ti} \delta_i - \Sigma \ln \sigma_{Ti} \Sigma \delta_i}{n \Sigma \delta_i^2 - (\Sigma \delta_i)^2} = \frac{6 \cdot 32,4221 - 10,2 \cdot 17,613}{6 \cdot 52,936049 - (17,613)^2} = 2,01,$$

$$\ln \alpha = \frac{\Sigma \ln \sigma_{Ti} - b \Sigma \delta_i}{n} = \frac{10,2 - 2,01 \cdot 17,613}{6} = -4,00, \quad a = 0,015.$$

Степенная зависимость имеет вид:

$$\sigma_{T} = 0,015 \cdot \delta^{2,01}.$$

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле:

$$r = b \sqrt{\frac{n \Sigma \delta_i^2 - (\Sigma \delta_i)^2}{n \Sigma \ln \sigma_{Ti}^2 - (\Sigma \ln \sigma_{Ti})^2}} = 2,01 \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot 52,936049 - (17,613)^2}{6 \cdot 24,8 - (10,2)^2}} = 0,82.$$

Экспоненциальная зависимость

В табл. 3.39 приведены данные для расчета коэффициентов регрессии экспоненциальной зависимости предела прочности от количества пор.

Данные для расчета коэффициентов регрессии экспоненциальной зависимости предела прочности от количества пор

Таблица 3.39

№	$\ln \sigma_{Bi}$	δ_i	$(\ln \sigma_{Bi})^2$	$\ln \sigma_{Bi} \delta_i$	δ_i^2	$\ln \sigma_{Bi} + \delta_i$	$(\ln \sigma_{Bi} + \delta_i)^2$
1	2,45	16	6,0025	39,2	256	18,45	340,4025
2	2,73	28	7,4529	76,44	784	30,73	944,3329
3	2,28	20	5,1984	45,6	400	22,28	496,3984
4	1,44	9	2,0736	12,96	81	10,44	108,9936
5	3,2	37	10,24	118,4	1369	40,2	1616,04
6	2,53	15	6,4009	37,95	225	17,53	307,3009
Σ	14,63	125	37,3683	330,55	3115		3813,4683

Точности расчетов проверяется по формуле:

$$\Sigma(\ln \sigma_{Bi} + \delta_i)^2 = \Sigma \ln^2 \sigma_{Bi} + 2 \Sigma \delta_i \ln \sigma_{Bi} + \Sigma \delta_i^2 = 37,3683 + 2 \cdot 330,55 + 3115 = 3813,4683.$$

Коэффициенты уравнения регрессии экспоненциальной зависимости рассчитываются по формулам:

$$b = \frac{n \Sigma \ln \sigma_{Bi} \delta_i - \Sigma \ln \sigma_{Bi} \Sigma \delta_i}{n \Sigma \delta_i^2 - (\Sigma \delta_i)^2} = \frac{6 \cdot 330,55 - 14,63 \cdot 125}{6 \cdot 3115 - (125)^2} = 0,05,$$

$$\ln \alpha = \frac{\Sigma \ln \sigma_{Bi} - b \Sigma \delta_i}{n} = \frac{14,63 - 0,05 \cdot 125}{6} = 1,396 \quad a = 4,0417.$$

Экспоненциальная зависимость имеет вид:

$$\sigma_{B} = 4,0417 \cdot e^{0,05\delta}.$$

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле:

$$r = b \cdot \sqrt{\frac{n \Sigma \delta_i^2 - (\Sigma \delta_i)^2}{n \Sigma \ln^2 \sigma_{Bi} - (\Sigma \ln \sigma_{Bi})^2}} = 0,05 \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot 3115 - (125)^2}{6 \cdot 37,3683 - (14,63)^2}} = 0,87.$$

В табл. 3.40 приведены данные для расчета коэффициентов регрессии экспоненциальной зависимости относительного удлинения от количества пор.

Данные для расчета коэффициентов регрессии экспоненциальной зависимости относительного удлинения от количества пор

Таблица 3.40

№	$\ln c_n \Delta \ell_i$	δ_i	$(\ln c_n \Delta \ell_i)^2$	$\ln c_n \Delta \ell_i \delta_i$	δ_i^2	$\ln c_n \Delta \ell_i + \delta_i$	$(\ln c_n \Delta \ell_i + \delta_i)^2$
1	2,55	16	6,5025	40,8	256	18,55	344,1025
2	2,88	28	8,2944	80,64	784	30,88	953,5744
3	2,9	20	8,41	58	400	22,9	524,41
4	1,0	9	1	9	81	10	100
5	3,2	37	10,24	118,4	1369	40,2	1616,04
6	2,3	15	2,59	34,5	225	17,3	299,29
Σ	14,83	125	39,7369	341,34	3115		3837,4169

Точности расчетов проверяется по формуле:

$$\Sigma(\ln c_n \Delta \ell_i + \delta_i)^2 = \Sigma \ln c_n \Delta \ell_i^2 + 2 \Sigma \ln c_n \Delta \ell_i \delta_i + \Sigma \delta_i^2 = 39,7369 + 2 \cdot 341,34 + 3115 = 3837,4169$$

Коэффициенты уравнения регрессии экспоненциальной зависимости рассчитываются по формулам:

$$b = \frac{n \Sigma \ln c_n \Delta \ell_i \delta_i - \Sigma \ln c_n \Delta \ell_i \Sigma \delta_i}{n \Sigma \delta_i^2 - (\Sigma \delta_i)^2} = \frac{6 \cdot 341,34 - 14,83 \cdot 125}{6 \cdot 3115 - (125)^2} = 0,063,$$

$$\ln \alpha = \frac{\Sigma \ln c_n \Delta \ell_i - b \Sigma \delta_i}{n} = \frac{14,83 - 0,063 \cdot 125}{6} = 1,1592, a = 3,187.$$

Экспоненциальная зависимость имеет вид:

$$c_n \Delta \ell = 3,187 \cdot e^{0,063 \delta}.$$

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле:

$$r = b \sqrt{\frac{n \Sigma \delta_i^2 - (\Sigma \delta_i)^2}{n \Sigma \ln c_n \sigma_{Ti}^2 - (\Sigma \ln c_n \sigma_{Ti})^2}} = 0,063 \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot 3115 - (125)^2}{6 \cdot 39,7369 - (14,83)^2}} = 0,81.$$

В табл. 3.41 приведены данные для расчета коэффициентов регрессии экспоненциальной зависимости предела текучести от количества пор.

Данные для расчета коэффициентов регрессии экспоненциальной зависимости предела текучести от количества пор

Таблица 3.41

№	$\ln \sigma_{Ti}$	δ_i	$(\ln \sigma_{Ti})^2$	$\ln \sigma_{Ti} \delta_i$	δ_i^2	$\ln \sigma_{Ti} + \delta_i$	$(\ln \sigma_{Ti} + \delta_i)^2$
1	1,9	16	3,61	30,4	256	17,9	320,41
2	2,4	28	5,76	67,2	784	30,4	924,16
3	1,7	20	2,89	34	400	21,7	470,89
4	-0,7	9	0,49	-6,3	81	8,3	68,89
5	2,6	37	6,76	96,2	1369	39,6	1568,16
6	2,3	15	5,29	34,5	225	17,3	299,29
Σ	10,2	125	24,8	256	3115		3651,8

Точности расчетов проверяется по формуле:

$$\Sigma(\ln \sigma_{Ti} + \delta_i)^2 = \Sigma \ln \sigma_{Ti}^2 + 2 \Sigma \ln \sigma_{Ti} \delta_i + \Sigma \delta_i^2 = 24,8 + 2 \cdot 256 + 3115 = 3651,8$$

Коэффициенты уравнения регрессии экспоненциальной зависимости рассчитываются по формулам:

$$b = \frac{n \Sigma \ln \sigma_{Ti} \delta_i - \Sigma \ln \sigma_{Ti} \Sigma \delta_i}{n \Sigma \delta_i^2 - (\Sigma \delta_i)^2} = \frac{6 \cdot 256 - 10,2 \cdot 125}{6 \cdot 3115 - (125)^2} = 0,085,$$

$$\ln \alpha = \frac{\Sigma \ln \sigma_{Ti} - b \Sigma \delta_i}{n} = \frac{10,2 - 0,085 \cdot 125}{6} = -0,071, a = 0,93.$$

Экспоненциальная зависимость имеет вид:

$$\sigma_{T} = 0,93 \cdot e^{0,085 \delta}.$$

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле:

$$r = b \sqrt{\frac{n \Sigma \delta_i^2 - (\Sigma \delta_i)^2}{n \Sigma \ln \sigma_{Ti}^2 - (\Sigma \ln \sigma_{Ti})^2}} = 0,085 \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot 3115 - (125)^2}{6 \cdot 24,8 - (10,2)^2}} = 0,7.$$

В результате регрессионного анализа получены три зависимости снижения предела прочности от количества пор, имеющие вид:

$$\sigma_{B} = 0,088 + 0,62 \delta, \quad (3.19)$$

$$\sigma_{B} = 0,484 \delta^{1,078}, \quad (3.20)$$

$$\sigma_{B} = 4,0417 \cdot e^{0,05 \delta}. \quad (3.21)$$

В табл. 3.42 представлены фактические значения снижения предела прочности сварных швов и рассчитанные по зависимостям (3.19) – (3.21) и погрешность расчетов.

Фактические значения снижения предела прочности сварных швов и рассчитанные по зависимостям (3.19) – (3.21) и погрешность расчетов

Таблица 3.42

№	δ , шт	$\sigma_{Вфакт}$, МПа	$\sigma_{Врасч}$ (3.19), МПа	Δ , %	$\sigma_{Врасч}$ (3.20), МПа	Δ , %	$\sigma_{Врасч}$ (3.21), МПа	Δ , %
1	16	11,55	10,008	13,35	9,614	16,76	8,99	22,12
2	28	15,39	17,448	13,37	17,57	14,2	13,17	14,42
3	20	9,8	12,488	27,42	12,23	24,77	10,98	12,10
4	9	4,21	5,668	34,63	5,17	22,81	6,3386	50,56
5	37	24,48	23,028	5,93	23,73	3,05	25,70	1,22
6	15	12,6	9,388	25,49	8,97	28,83	8,556	32,09
				$\Delta_{ср} = 20,03\%$		$\Delta_{ср} = 18,4\%$		$\Delta_{ср} = 22,085\%$

В табл. 3.42 видно общую высокую погрешность расчетов представленных зависимостей.

В результате регрессионного анализа получены три зависимости снижения относительного удлинения от количества пор, имеющие вид:

$$\sigma_{\Delta \ell_i} = 0,69\delta - 0,058, \quad (3.22)$$

$$\sigma_{\Delta \ell} = 0,17 \cdot \delta^{1,446}, \quad (3.23)$$

$$\sigma_{\Delta \ell} = 3,187 \cdot e^{0,063\delta}. \quad (3.24)$$

В табл. 3.43 представлены фактические значения снижения относительного удлинения сварных швов и рассчитанные по зависимостям (3.22) – (3.24) и погрешность расчетов.

Фактические значения снижения относительного удлинения сварных швов и рассчитанные по зависимостям (3.22) -3.24) и погрешность расчетов

Таблица 3.43 -

№	δ , шт	сн Δl факт %	сн Δl расч (3.22), %	Δ , %	сн Δl расч (3.23), %	Δ , %	сн Δl расч (2.24), %	Δ , %
1	16	12,8	10,982	14,20	9,367	26,82	8,7327	31,77
2	28	17,8	19,262	8,21	21,04	18,2	18,6	4,5
3	20	18,1	13,742	24,08	12,93	28,54	11,235	37,93
4	9	2,7	6,27	132,15	4,08	50,98	5,62	108,1
5	37	24,3	25,472	4,8	31,48	29,56	32,79	34,93
6	15	10,2	10,992	0,9	8,53	16,34	8,2	19,61
1				$\Delta_{ср} = 30,72\%$		$\Delta_{ср} = 28,4\%$		$\Delta_{ср} = 39,47\%$

В табл. 3.43 видно общую высокую погрешность расчетов представленных зависимостей.

В результате регрессионного анализа получены три зависимости снижения предела текучести от количества пор, имеющие вид:

$$\text{сн}\sigma_T = 0,376\delta - 0,003, \quad (3.25)$$

$$\text{сн}\sigma_T = 0,015 \cdot \delta^{2,01}, \quad (3.26)$$

$$\text{сн}\sigma_T = 0,93 \cdot e^{0,085\delta}. \quad (3.27)$$

В табл. 3.44 представлены фактические значения снижения предела текучести сварных швов и рассчитанные по зависимостям (3.25) – (3.27) и погрешность расчетов.

Фактические значения снижения предела текучести сварных швов и рассчитанные по зависимостям (3.25) – (3.27) и погрешность расчетов

Таблица 3.44

№	δ , шт	$\sigma_{Тфак}$ МПа	$\sigma_{Трасч}$ (3.25), МПа	Δ , %	$\sigma_{Трасч}$ (3.26), МПа	Δ , %	$\sigma_{Трасч}$ (3.27), МПа	Δ , %
1	16	6,98	6,013	13,85	3,95	43,44	3,62	48,09
2	28	10,6	10,525	0,7	12,158	10,82	10,049	5,2
3	20	5,5	7,517	36,67	6,18	12,4	5,09	7,44
4	9	0,5	3,781	576,2	1,24	148,4	1,998	299,7
5	37	13,5	13,157	2,5	21,29	57,7	21,59	59,95
6	15	9,9	5,637	43,06	3,47	64,97	3,33	66,4
				$\Delta_{ср} = 112,16\%$		$\Delta_{ср} = 56,29\%$		$\Delta_{ср} = 81,13\%$

В табл. 3.44 видно общую высокую погрешность расчетов представленных зависимостей.

В табл. 3.45 коэффициенты корреляции Пирсона между характеристиками прочности сварных швов и количеством пор, снижения характеристик прочности сварных швов и количеством пор, коэффициенты корреляции соответствующих зависимостей, и погрешности расчетов характеристик прочности и снижения характеристик прочности.

Коэффициенты корреляции Пирсона между характеристиками прочности сварных швов и количеством пор, характеристиками снижения прочности сварных швов и количеством пор, коэффициенты корреляции зависимостей, и погрешности расчетов соответствующих характеристик.

Таблица 3.45

№	$y=f(\delta)$	г Пир-сона	г лин. зав.	Δср. лин. зав., %	г степ. зав.	Δср. степ. зав., %	г эксп. зав.	Δср. эксп. зав., %
1	$\sigma_B=f(\delta)$	0,962	0,937	2,365	0,71	3,01	0,7	2,75
2	$\Delta l=f(\delta)$	0,956	0,929	2,42	0,969	1,55	0,936	2,32
3	$\sigma_T=f(\delta)$	0,943	0,835	1,88	0,88	1,64	0,845	1,845
4	$сн\sigma_B=f(\delta)$	0,962	0,929	20,03	0,921	18,4	0,87	22,085
5	$сн\Delta l=f(\delta)$	0,957	0,93	30,84	0,92	28,4	0,81	39,47
6	$сн\sigma_T=f(\delta)$	0,86	0,83	112,16	0,82	56,29	0,7	81,13

В табл. 3.45 видно, что в основном все коэффициенты корреляции значимы и примерно равны. При этом средние погрешности расчетов характеристик прочности от количества пор значительно (на порядок) отличаются от средних погрешностей расчетов снижения характеристик прочности от количества пор. Причиной значимости коэффициентов корреляции в купе с большой погрешностью расчетов может быть несоответствие выбранной математической зависимости с экспериментальными данными.

3.3.4.2 Полином второй степени

Авторы работы [65] приводят систему уравнений, позволяющую определить коэффициенты регрессии полинома второй степени, имеющего вид:

$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c,$$

коэффициенты регрессии полинома второй степени определяются следующим образом:

$$a = \frac{\Delta_1}{\Delta}, b = \frac{\Delta_2}{\Delta}, c = \frac{\Delta_3}{\Delta},$$

где: Δ - определитель системы, Δ_1 , Δ_2 и Δ_3 – первый, второй и третий частные определители системы, определяемые методом наименьших квадратов [65].

Определитель системы Δ не зависит от функции y и находится следующими образом [8]:

$$\begin{aligned} \Delta = & \sum_{i=1}^n x_i^4 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot (n) + 2 \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i^3 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n x_i \right) \\ & - \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right)^3 - \sum_{i=1}^n x_i^4 \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i^3 \right)^2 \cdot (n). \end{aligned}$$

$$\Delta = 108146760.$$

Первый частный определитель определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta_1 = & \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot y_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot (n) + \sum_{i=1}^n x_i y_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i^3 \cdot \sum_{i=1}^n x_i \\ & - \sum_{i=1}^n y_i \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i - \sum_{i=1}^n x_i^3 \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i \cdot (n) \end{aligned}$$

Второй:

$$\begin{aligned} \Delta_2 = & \sum_{i=1}^n x_i^4 \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i \cdot (n) + \sum_{i=1}^n x_i^3 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i \\ & - \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \sum_{i=1}^n x_i^4 \cdot \sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i - n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^3 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot y_i \end{aligned}$$

Третий:

$$\Delta_3 = \sum_{i=1}^n x_i^4 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n x_i^3 \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot y_i + \sum_{i=1}^n x_i^3 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2$$

$$\cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i$$

$$- \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot y_i - \sum_{i=1}^n x_i^4 \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \left(\sum_{i=1}^n x_i^3 \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^n y_i$$

В табл. 3.46 представлены данные для расчета полинома второй степени зависимости снижения предела прочности от количества пор.

Данные для расчета полинома второй степени зависимости снижения предела прочности от количества пор

Таблица 3.46

№	$y_i \sigma$	x_i	x_i^2	x_i^3	x_i^4	$x_i y_i$	$x_i^2 y_i$
1	11,55	16	256	4096	65536	184,8	2956,8
2	15,39	28	784	21952	614656	430,92	12065,76
3	9,8	20	400	8000	160000	196	3920
4	4,21	9	81	729	6561	233,89	341,01
5	24,48	37	1369	50653	1874161	905,76	33513,12
6	12,6	15	225	3375	50625	189	2835
Σ	78,03	125	3115	88805	2771539	1944,37	55631,69

В табл. 3.47 представлены данные для расчета полинома второй степени зависимости снижения относительного удлинения от количества пор.

**Данные для расчета полинома второй степени зависимости снижения
относительного удлинения от количества пор**

Таблица 3.47

№	$y_i \Delta \ell$	$x_i \Delta$	x_i^2	x_i^3	x_i^4	$x_i y_i$	$x_i^2 y_i$
1	12,8	16	256	4096	65536	204,8	3276,8
2	17,8	28	784	21952	614656	498,4	13955,2
3	18,1	20	400	8000	160000	362	7240
4	2,7	9	81	729	6561	24,3	218,7
5	24,3	37	1369	50653	1874161	899,1	33266,7
6	10,2	15	225	3375	50625	153	2295
Σ	85,9	125	3115	88805	2771539	2141,6	60252,4

В табл. 3.48 представлены данные для расчета полинома второй степени зависимости снижения предела текучести от количества пор.

**Данные для расчета полинома второй степени зависимости снижения
предела текучести от количества пор**

Таблица 3.48

№	$y_i \sigma_T$	x_i	x_i^2	x_i^3	x_i^4	$x_i y_i$	$x_i^2 y_i$
1	6,98	16	256	4096	65536	111,68	1786,88
2	10,6	28	784	21952	614656	296,8	8310,4
3	5,5	20	400	8000	160000	110	2200
4	0,5	9	81	729	6561	4,5	40,5
5	13,5	37	1369	50653	1874161	499,5	18481,5
6	9,9	15	225	3375	50625	148,5	2227,5
Σ	46,98	125	3115	88805	2771539	1170,98	33046,78

В результате регрессионного анализа получены три зависимости снижения характеристик прочности сварного шва от количества пор, имеющие вид:

$$\sigma_{\sigma_B} = 0,0057\delta^2 + 0,355\delta + 2,62, \quad (3.28)$$

$$\sigma_{\Delta \ell} = -0,023\delta^2 + 1,777\delta - 10,63, \quad (3.29)$$

$$\sigma_{\sigma_T} = -0,00966\delta^2 + 0,828\delta - 4,414. \quad (3.30)$$

В табл. 3.49 показаны фактические и рассчитанные по зависимостям (3.28) – (3.30) значения снижения характеристик предела прочности сварных швов от количества пор и погрешность расчетов.

Фактические значения снижения характеристик предела прочности сварных швов от количества пор и рассчитанные по зависимостям (3.28) – (3.30) и погрешность расчетов

Таблица 3.49 -

№ п/п	δ , шт	$\sigma_{Вфакт.}$, МПа	$\sigma_{Врасч.}$ (3.28), МПа	Δ , %	$\sigma_{\Delta факт.}$, %	$\sigma_{\Delta расч.}$ (3.29), %	Δ , %	$\sigma_{Тфакт.}$, МПа	$\sigma_{Трасч.}$ (3.30), МПа	Δ , %
1	16	11,55	9,7592	15,5	12,8	11,914	6,9	6,98	6,36	8,87
2	28	15,39	17,0288	10,64	17,8	21,094	18,5	10,6	11,2	5,6
3	20	9,8	12,0	22,44	18,1	15,71	13,2	5,5	8,28	50,58
4	9	4,21	6,28	49,09	2,7	3,5	29,63	0,5	2,25	351,1
5	37	24,48	23,56	3,7	24,3	23,63	2,75	13,5	12,997	3,7
6	15	12,6	9,23	26,76	10,2	10,85	6,4	9,9	5,83	41,08
				$\Delta_{ср} =$ 21,35			$\Delta_{ср} =$ 12,9			$\Delta_{ср} =$ 76,82

В табл. 3.49 видно, что полином второй степени имеет относительно небольшую среднюю погрешность расчетов относительного удлинения (3.29).

Расчетные значения предела текучести более чем на 350 % отличаются от фактических при значении $\sigma_{Тфакт.} = 0,5$ МПа. Аналогично большая погрешность расчетов при этом значении снижении предела текучести показана в табл. 3.44.

Полупроцентным снижением показателя прочности можно пренебречь практически без ущерба общей математической модели.

3.3.4.3 Определение коэффициента корреляции Пирсона между снижением предела текучести и количеством пор без полупроцентного снижения.

В табл. 3.50 представлены данные необходимые для расчета коэффициента корреляции Пирсона между снижением предела текучести и количеством пор без полупроцентного снижения.

- Данные для расчета коэффициента корреляции Пирсона между снижением предела текучести и количеством пор без полупроцентного снижения

Таблица 3.50

№	$\sigma_{Т}$, %	δ , шт	$(y_i - \bar{y})$	$(x_i - \bar{x})$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})$
1	6,98	16	-2,316	-7,2	5,363856	51,84	16,6752
2	10,6	28	1,304	4,8	1,700416	23,04	6,2592
3	5,5	20	-3,796	-3,2	14,409616	10,24	12,1472
4	13,5	37	4,204	13,8	17,673616	190,44	58,0152
5	9,9	15	0,604	-8,2	0,364816	67,24	-4,9528
Σ	46,48	116			39,51232	342,8	88,144
ср	9,296	23,2					

Коэффициент корреляции Пирсона определяется по формуле

$$r = \frac{\sum(y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum(y_i - \bar{y})^2 \cdot \sum(x_i - \bar{x})^2}} = \frac{88,144}{\sqrt{39,51232 \cdot 342,8}} = 0,76$$

Коэффициент корреляции значимый. Уровень его значимости близок к 0,01 [63], что позволяет посредством регрессионного анализа построить уравнения регрессии и выбрать наиболее подходящие из них.

3.3.4.4 Построение уравнений регрессии зависимостей снижения предела текучести от количества пор без полупроцентного снижения и выбор наиболее подходящего из них

Линейная зависимость

В табл. 3.51 приведены данные для расчета коэффициентов регрессии линейной зависимости предела текучести от количества пор без полупроцентного снижения прочности.

Данные для расчета коэффициентов регрессии линейной зависимости предела текучести от количества пор без полупроцентного снижения прочности

Таблица 3.51

№	снσТi	δi	снσТi 2	снσТiδi	δi2	снσТi + δi	(снσТi + δi)2
1	6,98	16	48,7204	111,68	256	22,98	528,0804
2	10,6	28	112,36	296,8	784	38,6	1489,96
3	5,5	20	30,25	110	400	25,5	650,25
4	13,5	37	182,25	499,5	1369	50,5	2550,25
5	9,9	15	98,01	148,5	225	24,9	620,01
Σ	46,48	116	471,5904	1166,48	3034		5838,5504

Точность расчетов проверяется по формуле:

$$\sum(\text{сн.}\sigma_{Ti} + \delta_i)^2 = \sum \text{сн}\sigma_{Ti}^2 + 2\sum \text{сн}\sigma_{Ti}\delta_i + \sum \delta_i^2 = 471,5904 + 2 \cdot 1166,48 + 3034 = 5838,5504.$$

Коэффициенты уравнения регрессии линейной зависимости рассчитываются по формулам:

$$b = \frac{n\sum \text{сн}\sigma_{Ti}\delta_i - \sum \text{сн}\sigma_{Ti}\sum \delta_i}{n\sum \delta_i^2 - (\sum \delta_i)^2} = \frac{5 \cdot 1166,48 - 46,48 \cdot 116}{5 \cdot 3034 - (116)^2} = 0,257$$

$$\alpha = \frac{\sum \text{сн}\sigma_{Ti} - b\sum \delta_i}{n} = \frac{46,48 - 0,257 \cdot 116}{5} = 3,3$$

Линейная зависимость имеет вид:

$$\text{сн}\sigma_T = 3,33 + 0,257\delta.$$

Для проверки линейности полученной зависимости рассчитывается коэффициент корреляции по формуле:

$$r = b \cdot \sqrt{\frac{n\sum \delta_i^2 - (\sum \delta_i)^2}{n\sum \text{сн}\sigma_{Ti}^2 - (\sum \text{сн}\sigma_{Ti})^2}} = 0,257 \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 3034 - (116)^2}{5 \cdot 471,5904 - (46,48)^2}} = 0,76.$$

Степенная зависимость

В табл. 3.52 приведены данные для расчета коэффициентов регрессии степенной зависимости предела текучести от количества пор без полупроцентного снижения прочности.

Данные для расчета коэффициентов регрессии степенной зависимости предела текучести от количества пор без полупроцентного снижения прочности

Таблица 3.52

№	$\ln \text{сн}\sigma_T$ i	$\ln \delta_i$	$(\ln \text{сн}\sigma_T$ i) ²	$\ln \text{сн}\sigma_T \ln \delta_i$	$(\ln \delta_i)^2$	$\ln \text{сн}\sigma_T$ + $\ln \delta_i$	$(\ln \text{сн}\sigma_T$ + $\ln \delta_i$) ²
1	1,9	2,77	3,61	5,263	7,6729	4,67	21,8089
2	2,4	3,33	5,76	7,992	11,0889	5,73	32,8329
3	1,7	2,993	2,89	5,0881	8,958049	4,693	22,024249
4	2,6	3,61	6,76	9,386	13,0321	6,21	38,5641
5	2,3	2,71	5,29	6,233	7,3441	5,01	25,1001
Σ	10,9	15,413	24,31	33,9621	48,096049		140,330249

Точности расчетов проверяется по формуле:

$$\sum(\ln\sigma_{Ti} + \delta_i)^2 = \sum \ln\sigma_{Ti}^2 + 2\sum \ln\sigma_{Ti}\delta_i + \sum \delta_i^2 = 24,31 + 2 \cdot 33,9621 + 48,096049 = 140,330249.$$

Коэффициенты уравнения регрессии степенной зависимости рассчитываются по формулам:

$$b = \frac{n\sum \ln\sigma_{Ti}\delta_i - \sum \ln\sigma_{Ti}\sum \delta_i}{n\sum \delta_i^2 - (\sum \delta_i)^2} = \frac{5 \cdot 33,9621 - 10,9 \cdot 15,413}{5 \cdot 48,096049 - (15,413)^2} = 0,625,$$

$$\ln a = \frac{\sum \ln\sigma_{Ti} - b\sum \delta_i}{n} = \frac{10,9 - 0,625 \cdot 15,413}{5} = 0,253, a = 1,288.$$

Степенная зависимость имеет вид:

$$\sigma_{\sigma T} = 1,288 \cdot \delta^{0,625}.$$

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле:

$$r = b \sqrt{\frac{n \sum \delta_i^2 - (\sum \delta_i)^2}{n \sum \ln\sigma_{Ti}^2 - (\sum \ln\sigma_{Ti})^2}} = 0,625 \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 48,096049 - (15,413)^2}{5 \cdot 24,31 - (10,9)^2}} = 0,65.$$

Экспоненциальная зависимость

В табл. 3.52 приведены данные для расчета коэффициентов регрессии экспоненциальной зависимости предела текучести от количества пор без полупроцентного снижения прочности.

Данные для расчета коэффициентов регрессии экспоненциальной зависимости предела текучести от количества пор без полупроцентного снижения прочности

Таблица 3.52

№	$\ln\sigma_{Ti}$	δ_i	$(\ln\sigma_{Ti})^2$	$\ln\sigma_{Ti}\delta_i$	δ_i^2	$\ln\sigma_{Ti} + \delta_i$	$(\ln\sigma_{Ti} + \delta_i)^2$
1	1,9	16	3,61	30,4	256	17,9	320,41
2	2,4	28	5,76	67,2	784	30,4	924,16
3	1,7	20	2,89	34	400	21,7	470,89
4	2,6	37	6,76	96,2	1369	39,6	1568,16
5	2,3	15	5,29	34,5	225	17,3	299,29
Σ	10,9	116	24,31	262,3	3034		3582,91

Точности расчетов проверяется по формуле:

$$\sum(\ln \sigma_{Ti} + \delta_i)^2 = \sum \ln \sigma_{Ti}^2 + 2 \sum \ln \sigma_{Ti} \delta_i + \sum \delta_i^2 = 24,31 + 2 \cdot 262,3 + 3034 = 3582,91$$

Коэффициенты уравнения регрессии экспоненциальной зависимости рассчитываются по формулам:

$$b = \frac{n \sum \ln \sigma_{Ti} \delta_i - \sum \ln \sigma_{Ti} \sum \delta_i}{n \sum \delta_i^2 - (\sum \delta_i)^2} = \frac{5 \cdot 262,3 - 10,9 \cdot 116}{5 \cdot 3034 - (116)^2} = 0,0275,$$

$$\ln a = \frac{\sum \ln \sigma_{Ti} - b \sum \delta_i}{n} = \frac{10,9 - 0,0275 \cdot 116}{5} = 1,542, a = 0,93.$$

Экспоненциальная зависимость имеет вид:

$$\sigma_{\sigma T} = 4,674 \cdot e^{0,0275 \delta}.$$

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле:

$$r = b \sqrt{\frac{n \sum \delta_i^2 - (\sum \delta_i)^2}{n \sum \ln \sigma_{Ti}^2 - (\sum \ln \sigma_{Ti})^2}} = 0,0275 \sqrt{\frac{5 \cdot 3034 - (116)^2}{5 \cdot 24,31 - (10,9)^2}} = 0,69.$$

В результате регрессионного анализа получены три зависимости снижения предела текучести сварных швов от количества пор, имеющие вид:

$$\sigma_{\sigma T} = 3,33 + 0,257 \delta, \quad (3.31)$$

$$\sigma_{\sigma T} = 1,288 \cdot \delta^{0,625}, \quad (3.32)$$

$$\sigma_{\sigma T} = 4,674 \cdot e^{0,0275 \delta}. \quad (3.33)$$

В табл. 3.53 представлены фактические значения снижения предела текучести сварных швов и рассчитанные по зависимостям (3.31) – (3.33) и погрешность расчетов.

Фактические значения снижения предела текучести сварных швов и рассчитанные по зависимостям (3.31) – (3.33) и погрешность расчетов

Таблица 3.53

№	δ , шт	$\sigma_{Тфакт}$ МПа	$\sigma_{Трасч}$ (3.31), МПа	Δ , %	$\sigma_{Трасч}$ (3.32), МПа	Δ , %	$\sigma_{Трасч}$ (3.33), МПа	Δ , %
1	16	6,98	7,442	6,61	7,286	4,38	7,2 6	4,0
2	28	10,6	10,526	0,7	10,337	2,5	10,095	4,7
3	20	5,5	8,47	54,0	8,38	52,3	8,1	47,3
4	37	13,5	12,839	4,9	12,3	8,8	12,93	4,2
5	15	9,9	7,185	27,42	7,0	29,31	7,06	28,7
				$\Delta_{ср} =$ 18,73 %		$\Delta_{ср} =$ 19,46 %		$\Delta_{ср} =$ 17,8 %

В табл. 3.53 видно общую высокую погрешность расчетов представленных зависимостей. Средняя погрешность расчетов снижения предела текучести значительно уменьшилась.

3.3.4.5 Построение уравнения регрессии полинома второй степени зависимости снижения предела текучести от количества пор без полупроцентного снижения.

В табл. 3.54 Представлены данные для расчета полинома второй степени зависимости снижения предела текучести от количества пор без полупроцентного снижения прочности

**Данные для расчета полинома второй степени зависимости снижения
предела текучести от количества пор без полупроцентного снижения
прочности**

Таблица 3.54

№	$y_i \sigma_T$	x_i	x_i^2	x_i^3	x_i^4	$x_i y_i$	$x_i^2 y_i$
1	6,98	16	256	4096	65536	111,68	1786,88
2	10,6	28	784	21952	614656	296,8	8310,4
3	5,5	20	400	8000	160000	110	2200
4	13,5	37	1369	50653	1874161	499,5	18481,5
5	9,9	15	225	3375	50625	148,5	2227,5
Σ	46,48	116	3034	88076	2771539	1166,48	33006,28

Полином второй степени зависимости снижения предела текучести от количества пор имеет вид:

$$c_{\sigma T} = 0,022\delta^2 - 0,9\delta + 16,55 \quad (3.34)$$

В табл. 3.55 представлены фактические значения снижения предела текучести сварных швов и рассчитанные по зависимостям (3.34) и погрешность расчетов.

**Фактические значения снижения предела текучести сварных швов и
рассчитанные по зависимостям (3.34) и погрешность расчетов**

Таблица 3.55

№	δ , шт	$c_{\sigma T \text{ факт}}$, МПа	$c_{\sigma T \text{ расч}}$, МПа	Δ , %
1	16	6,98	7,782	11,48
2	28	10,6	8,598	18,88
3	20	5,5	7,35	33,64
4	37	13,5	13,368	0,98
5	15	9,9	8,0	19,2
				$c_{p\Delta} = 16,84$

В табл. 3.55 видна большая погрешность расчетов

3.3.4.5 Построение уравнений регрессии полиномов третьей степени зависимостей снижения характеристик прочности сварных швов от количества пор

Авторы работы [65] приводят систему уравнений, решение которой позволяет получить полиномы третьей степени, имеющие вид:

$$сн\sigma_B = 0,0028\delta^3 - 0,1813\delta^2 + 4,1280\delta - 19,7463 \quad (3.35)$$

$$сн\Delta\ell = 0,0022\delta^3 - 0,1716\delta^2 + 4,7691\delta - 28,3760 \quad (3.36)$$

$$сн\sigma_T = 0,002\delta^3 - 0,14\delta^2 + 3,457\delta - 20,00 \quad (3.37)$$

$$сн\sigma_T = -0,0063\delta^3 + 0,5110\delta^2 - 12,9162\delta + 109,2687 \quad (3.38)$$

В табл. 56 и табл. 57 приведены фактические значения снижения характеристик прочности сварных швов и рассчитанные по зависимостям (3.35) - (3.36) и погрешность расчетов.

Фактические и рассчитанные по зависимостям (3.35) - (3.36) значения снижения характеристик прочности сварных швов и погрешность расчетов

Таблица 56

№	δ , шт	сн σ_B факт., %	сн σ_B расч. (19), %	Δ , %	сн $\Delta\ell$ факт., %	сн $\Delta\ell$ расч. (20), %	Δ , %
1	16	11,55	11,358	1,66	12,8	13,011	1,65
2	28	15,39	15,164	1,47	17,8	18,919	6,3
3	20	9,8	12,694	29,52	18,1	15,966	11,8
4	9	4,21	4,762	13,10	2,7	2,250	16,7
5	37	24,48	26,618	8,74	24,3	24,597	1,2
6	15	12,6	10,831	14,04	10,2	11,975	17,4
				$\Delta_{ср} = 11,4$			$\Delta_{ср} = 9,2$

В табл. 56 показана достаточная для статистических зависимостей погрешность расчетов, показывающая, что данные зависимости (19) и (20) можно использовать для расчета снижения основных характеристик прочности сварных швов в зависимости от количества пор.

**Фактические и рассчитанные по зависимостям (3.35) - (3.36) значения
снижения предела текучести и погрешность расчетов**

Таблица 5.7

№	δ , шт	сн σ Т факт., %	сн σ Т расч.(21),%	Δ , %	сн σ Т расч.(22),%	Δ , %
1	16	6,98	7,664	9,8	7,621	9,2
2	28	10,6	10,94	3,2	9,941	6,2
3	20	5,5	9,14	66,2	4,949	10,0
4	9	0,5	1,231	146,2		
5	37	13,5	17,56	30,04	11,822	12,4
6	15	9,9	7,105	28,23	9,238	6,7
				$\Delta_{ср}=47,3$		$\Delta_{ср}=8,9$

В табл. 57 рассчитанные по зависимости (3.35) значения предела текучести при 9 порах на 146 % отличаются от фактического значения (сн σ Тфакт. = 0,5 МПа), в результате чего средняя погрешность недопустимо большая. Этим количеством пор можно пренебречь без ущерба математической модели (3.36). При этом как видно в табл. 57 при использовании зависимости (3.36) средняя погрешность расчетов вполне приемлема.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определены режимы и условия СМТ-сварки, позволяющие получить высокое качество сварного шва.

2. Определено, что в большей мере на качество сварного шва влияет рекомендуемый диапазон скоростей: 3,5;4;4,5;5 м/мин подачи проволоки. Получена зависимость, отражающая характер влияния скорости подачи проволоки на предел прочности сварного шва.

3. Доказано, что количество пор существенно влияет на снижение прочности сварных швов: предел прочности, относительное удлинение и предел текучести.

4. Получены зависимости, отражающие характер влияния количества пор на характеристики прочности сварных швов и на величину их снижения.

5. Разработана модели, позволяющие рассчитать предел прочности сварного шва в зависимости от скорости подачи проволоки и величину характеристик прочности сварных швов в зависимости количества пор.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Рекомендации по практическому использованию полученных результатов диссертации:

- определены режимы и условия СМТ сварки позволяющие получить высокое качество сварного шва:
 - инертный газ чистый аргон и смесь газ Ar/He 30;
 - диаметр сварочной проволоки 1,2 мм;
 - скорость сварки 0,4 м/мин;
 - скорость подачи сварочной проволоки 3,5;4;4,5;5 м/мин;
- полученные результаты диссертационной работы рекомендуется использовать при сварке 5083 (Al-Mg), 6082 (Al-Mg-Si) материалов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Aluminium-Taschenbuch, Band 1: Grundlagen und Werkstoffe. 15., Auflage, 1. Überarbeitete Ausgabe. Aluminium –Verlag, Düsseldorf 1998.
2. Catrin Kammer, Aluminium-Taschenbuch 3, Weiterverarbeitung und Anwendung, Beuth Verlag GmbH, Berlin 2014
3. Корниенко, А.Н. У истоков "электрогефеста" [Текст] М.: Машиностроение, 1987.-168 с.
4. Храпцов Н.В. Металлы и сварка (лекционный курс): Учебное пособие. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2001.-138 с.
5. Алюминий и его сплавы: Учебное пособие/Сост. А.Р.Луц, А.А. Суслина.-Самара: Самарский государственный технический университет, 2013-81 стр.
6. Белов, А.Ф. Строение и свойства авиационных материалов [Текст]/ А.Ф. Белов, Г.П. Бенедиктова, А.С. Висков и др.; учеб. для вузов; М.: Металлургия, 1989.-368 с.
7. DIN 17007. Фрониус-установки для сварки алюминия. Общие требования и правила.
8. Marion Rosenthal, Диссертация на тему «Untersuchungen zum werkstoffspezifischen Ermüdungs-verhalten von Aluminium-Schweißkonstruktionen unter Berücksichtigung der lokalen Schweißnahtgeometrie», Dezember 2009-218 стр
9. Жемчужникова Д.А., Диссертация на тему «Влияние деформации на структуру и механические свойства Al-Mg-Sc-Zr сплава» Белгород 2016-114 стр.
10. Laurent Wahl, Диссертация на тему «Ermüdungseigenschaften des Wabenkerns von Sandwichpaneelen aus Aluminium», Люксембург 2013-197 стр.

11. Muiyiwa Olabode Диссертация на тему: «Weldability of high strength aluminium alloys» Lappeenranta 2015 59 стр.
12. M. El-Shennawy, Kh. Abdel-Aziz, A. A. Omar « Metallurgical and Mechanical Properties of Heat Treatable Aluminum Alloy AA6082 Welds International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 11 (2017) pp. 2832-2839 © Research India Publications. <http://www.ripublication.com>
13. Stefan Thurner, диссертация на тему «Erzeugung und Anwendung modulierter Prozessgasströme beim Schutzgasschweißen» Chemnitz 2008-252 стр.
14. Dr-Ing.H.Sossenheimer,Deutscher Verband für Schweißtechnik, Die Verfahren der Schweißtechnik, Düsseldorf 1974
15. Журнал «Оборудование и инструмент», выпуск №2,2009 год, стр42-43
16. U.Krüger,U.Laudien,F.Lemke,P.W.Nogossek, DVS-Gefügekatalog Schweißtechnik Nichteisenmetalle, DVS-Verlag GmbH,Düsseldorf 1987-231 стр.
17. Stefan Thurner, диссертация на тему: «Erzeugung und Anwendung modulierter Prozessgasströme beim Schutzgasschweißen»,Chemnitz 2008,253 стр.
18. Юхин Н.А., Выбор сварочного электрода. Издательство «СОУЭЛО»,2003
19. Александров В.Д.,Погосбемян Ю.М., Попов В.Я., Современные способы дуговой сварки в автомобильном дорожно-строительном машиностроении: Учебное пособие/ МАДИ.М.,1992. 44с.
20. Бродский А.Я. Аргонно-дуговая сварка вольфрамовым электродом. М: Машгиз,1956, с.398.
21. Петров А.В. Влияние примесей в аргоне на качество аргонно-дуговой сварки-Автоген дело 1952,№9, с.5-8.
22. Петров А.В. , Ламаринье К.Н. ГОСТ 10157-62.Аргон-газообразный чистый.-Сварочное производство,1953, №7. с.43
23. Анисимов Ю.А., Медовара Б. И., Патон Б.Е., Антонов И.А. и др.Сварка в СССР. Том 1. Развитие сварочной техники и науки о сварке. Технологические процессы, сварочные материалы и оборудование. Москва. Издательство «Наука» 1981.

24. Norm DIN ISO 857-1 November 2002. Schweißen und verwandte Prozesse: Begriffe. Teil: Metallschweißprozesse
25. Рабкин Д.М., Игнатъев В.Г., Довбищенко И.В., Дуговая сварка алюминия и его сплавов-М.: Машиностроение, -1982.
26. Günter Schulze, Die Metallurgie des Schweißens, Springer -Verlag, Berlin, Heidelberg 2010
27. Васильев В.И. Введение в основы сварки : учебное пособие / В.И. Васильев, Д.П. Ильященко, Н.В. Павлов; Юргинский технологический институт.-Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2011-317 с.
28. Томас К.И., Д.П. Ильященко, Технология сварочного производства: учебное пособие , Юргинский Технологический институт.-Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2011-247 с.
29. Г.Г. Чернышев, Оборудование и основы технологии сварки металлов и плавлением и давлением: Учебное пособие. Издательство: Лань ,2013-464с.
30. G. Mrówka-Nowotnik*, J. Sieniawski, M. Wierzbińska, статья на тему «Intermetallic phase particles in 6082 aluminium alloy», журнал Archives of Materials Science and Engineering, Poland 2007, 69-76 стр.
31. Möller, Felix – Wechselwirkung zwischen Lichtbogen und Laserstrahl beim Fügen von Aluminium, BIAS Verlag, Bremen, 2016
32. Schwartz, M. M.: Brazing, 2. Aufl., ASM International, Materials Park (2003).
33. Aalco Metal Limited, Aluminium Alloys. Available online: www.aalco.co.uk/datasheets/Aalco-Metals-Ltd_Aluminium-Alloy-6082-T6T651-Plate_148.pdf.ashx (accessed on 9 November 2016).
34. Sefika Kasman, Fatih Kahraman, Anil Emirlioğlu, Haydar Kahraman статья на тему: A Case Study for the Welding of Dissimilar EN AW6082 and EN AW 5083 Aluminum Alloys by Friction Stir Welding, Metals 2017, 7, 6; doi:10.3390/met7010006
35. Ryan Douglas Matulich, магистр. дисс. «Post-fire Mechanical Properties of Aluminum Alloys and Aluminum Welds», Blacksburg 2011, 92 стр.

36. Aalco Metal Limited, Aluminium Alloys. Available online: www.aalco.co.uk/datasheets/Aalco-Metals-Ltd_Aluminium-Alloy-6082-T6T651-Plate_148.pdf.ashx (accessed on 9 November 2016).

37. T. Srikanth, S. Surendran, G. Balaganesan, G. L. Manjunath, Response of CMT Welded Aluminum AA5086-H111 to AA6061-T6 Plate with AA4043 Filler for Ballistic. *Procedia Engineering* 194 (2017) 522 – 528

38. Faustin Kalenda Mutombo, магистерская диссертация «CORROSION FATIGUE BEHAVIOUR OF 5083-H111 AND 6061-T651 ALUMINIUM ALLOY WELDS», Pretoria 2011

39. Учебное пособие. Технология сварочного производства. Томас К.И., Ильященко Д.П. Томск 2011, 247 стр.

40. Современные виды сварки: учебное пособие для нач.проф.образования/ В.В.Овчинников,-2-е изд., стер.-М.: Издательский центр «Академия»,2012.-208 с.

41. Статья, процесс дуговой сварки с уменьшенной отдачей энергии для чувствительных к теплу материалов, Журнал EWM HIGHTEC WELDING GmbH 2007-23стр.

42. Kabushiki Kaisha Seiko Scho:output control of SC welding power sourece,PatNr.: US4546234,Kobe Steel, Japan 1984

43. The Lincoln Electric company: STT-Surface Tension Transfer,Pat.Nr.:EP0324960 B1,USA,1989,und EP 1232825A3,USA,2002

44. Goecke, S.-F. und L. Dorn: Untersuchungen zum Einfluss der Prozessregelung und Schutzgaszusammensetzung auf Spritzer Bildung und Nahtgeometrie beim MAG-Kurzlichtbogenschweissen von Stahl-Dünnblech unter 0,5 mm Dicke, Final Report DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft)Do 202/26-3,2000

45. Goecke S.-F.,Dorn und M.Hübner: MAG-ChopArc-Schweissen für Feinblech> 0,2 mm.Konferenz –Einzelbericht im Tagungsband Grosse Schweisstechnische Tagung –GST 2000, Nürnberg, 27.-29. Sep.2000, DVS-Berichte Band 209,(2000),S.163-168

46. S-F Goecke, E. Metzke, A-Spille Kohoff, M. Langula: ChopArc-MSG-Lichtbogenschweissen für den Ultraleichtbau, bmb+f+gefördertes Verbundprojekt, Abschlussbericht, Fraunhofer IRB Verlag, 2005, ISBN-3-8167-67-66-4

47. G. Huisman: Direct control of the material transfer, the Controlled Short Circuiting (CSC)-MIG process, ICAWT 2000: Gas Metal Arc Welding for the 21st Century, Dec. 6-8, 2000, Orlando, Florida

48. Дуговая сварка с импульсной подачей электродной проволоки — процесс СМТ, предложенный фирмой «Фрониус» / В.Л. Бондаренко // Автоматическая сварка. — 2004. — № 12 (620). — С. 55-58. — рос.

49. Magnus Sætersdal, диссертация на тему «The Effect of Alloying Elements on the Ductility of Al-Mg-Si Alloys», Norwegian 2014

50. Сварочные аппараты теперь усовершенствованы: технология SpeedRoot. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://dontechnika.ru/posts/svarochnyje-apparaty-tjepjer-usovjershenstvovany-tjekhnologija-speedroot>

51. Щекин В.А. Технологические основы сварки плавлением: учебное пособие / В.А. Щекин. - Изд. 2-е, перераб. - Ростов н/Д: Феникс, 2009. - 345 с.

52. Тенденции развития управления процессами переноса металла в защитных газах (Обзор) / А. М. Жерносеков // Автоматическая сварка. — 2012. — № 1 (705). — С. 33-38. — Библиогр.: 32 назв. — рос.

53. Гуреева М.А., Металловедение сварки алюминиевых сплавов: учебное пособие для среднего профессионального образования – Москва. Издательство Юрайт, 2019-243

54. Овчинников В.В. Контроль качества сварных соединений: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования. М.-издательский центр «Академия», 2016. 208 с.

55. Троицкий В.А. Краткое пособие по контролю качества сварных соединений. Киев, И: Феникс -2006, 320 с.

56. Шуртаков А.К. Диссертация «ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНЫХ И КРЕПЁЖНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КУЗОВОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ВАГОНОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ». Москва-2017 г.

57. А.В. Владимиров. «Новый технологический уровень оборудования для электродуговой сварки». «Сварка и родственные технологии для изготовления оборудования специального и ответственного назначения»

58. Никифоров Г.Д. Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов, М., «Машиностроение», 1972, 264стр.

59. Теория сварочных процессов: Учебник для вузов/ А.В.Коновалов, А.С.Куркин, Э.Л.Макаров, В.М. Неровный, Ф.Б. Якушин; Под.ред. В.М.Неровного.-М.:Изд-во МГТУ им.Н.Э. Баумана,2007.-752 с.:илл

60. ГОСТ 4784-97 Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки

61. ГОСТ 7871-2019 Проволока сварочная из алюминия и алюминиевых сплавов.

62. Рагрин Н. А. Математическая модель стойкостной зависимости при сверлении // Технология машиностроения. – М.: 2014. - № 1. - С.49-54.

63. Рагрин Н.А. Математическая обработка экспериментальных данных/ КГТУ им. И. Раззакова; – Бишкек: ИЦ «Текник», 2013. – 82 с.

64. ГОСТ Р 8.736-2011 Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений.

65. Файфель Б. Л., Селютин А. Д. Аппроксимация полиномов n степени методом наименьших квадратов // Молодой учёный - Казань: 2018. - 16 (202). - С. 91-95.

ПРИЛОЖЕНИЯ

„DFS-Dach,-Fassaden-und Sanierungsarbeiten“

Hallesche Straße 37,

06366 Koethen,

Deutschland

Tel.: 03496 / 212 895

Fax.: 03496 / 212 921

Nr.: 0123 05

16.05.2022

An den Dissertationsbeirat 05.02.08

Fach: Maschinenbau. Land: Kirgisistan

Gutachten/Bescheinigung zur Dissertation

von Frau Zhyldyz Belekova

über die praktische Anwendung der Forschungsergebnisse der Dissertation „Untersuchungen zum CMT-Prozess (Cold Metal Transfer) für feinkörnigen Aluminiumlegierungen

Es wird bescheinigt, dass unser Unternehmen „DFS-Dach,-Fassaden-und Sanierungsarbeiten“ die theoretischen Bestimmungen und praktischen Empfehlungen der Doktorarbeit von Frau Zhyldyz Belekova ausführlich betrachtet hat.

Seit langem setzt unser Unternehmen die MIG/MAG (Metall-Inertgas- und Metall-Aktivgas)-Schweißgeräte in Sachsen-Anhalt für seine Aktivitäten ein. Im Zusammenhang mit der Digitalisierung, insbesondere der Schweißgeräte und -technologie, haben wir auch begonnen, moderne Anlagen zu verwenden, darunter die Fronius CMT-Schweißgeräte.

Obwohl der CMT-Prozess in letzter Zeit in der Industrie immer mehr eingesetzt wird, fehlen noch die Daten zu den Schweißparametern dieser Technologie, um qualitativ hochwertige Schweißnähte zu erhalten. Aus diesem Grund und auch angesichts der Tatsache, dass wir Aluminiumlegierungen verwenden, hat unser Unternehmen gerne die Ergebnisse der Dissertation von Zhyldyz Belekova getestet und begonnen, sie in die Praxis umzusetzen.

Gleichzeitig haben wir darauf geachtet, dass die von Doktorandin vorgeschlagenen Möglichkeiten zum Schweißen der Aluminiumlegierungen 6082 und 5083 auf unserer CMT-Schweißanlage gute Ergebnisse liefern.

16.05.22 

DFS -
Dach,-Fassaden- und Sanierungsarbeiten
Hallesche Straße 37 · 06366 Koethen
Tel.: 03496/212 895 · Fax: 03496 / 212 921

"DFS-Dach.-Fassaden-und Sanierungsarbeiten"

Улица Халлеше 37,

06366 Keten,

Германия

Телефон: 03496 / 212 895

Факс: 03496 / 212 921

№: 0123 05

16.05.2022

В диссертационный совет 05.02.08

Предмет: Машиностроение. Страна: Кыргызстан

**Заключение/сертификат на диссертацию
Жылдыз Белековой**

о практическом применении результатов исследования диссертации «Исследования по процессу CMT (Cold Metal Transfer) для мелкозернистых алюминиевых сплавов»

Удостоверяет, что наша компания "DFS-Dach, -Fassaden-und Sanierungsarbeiten" подробно рассмотрела теоретические определения и практические рекомендации докторской диссертации Жылдыз Белековой.

Наша компания уже давно использует сварочное оборудование MIG/MAG (металлический инертный газ и металлический активный газ) для своей деятельности в Саксонии-Анхальт. В связи с цифровизацией, особенно сварочного оборудования и технологий, мы также начали использовать современное оборудование, в том числе сварочное оборудование Fronius CMT.

Так как процесс CMT используется в промышленности недавно, имеются мало данных о параметрах сварки данной технологии для получения качественных сварных швов.

По этой причине, а также с учетом того, что мы используем алюминиевые сплавы, наша компания с радостью опробовала результаты диссертации Жылдыз Белековой и начала применять их на практике.

При этом мы убедились, что предложенные докторантом варианты сварки алюминиевых сплавов 6082 и 5083 на нашей сварочной системе CMT дали хорошие результаты.

Настоящий документ был переведен с Немецкого языка на Русский язык переводчиком Садьбековой Ширин Мырзабековной

The present document was translated from Germany into Russian language by the interpreter Sadybekova Shirin Myrزابekovna



КЫРГЫЗ РЕСПУБЛИКАСЫНЫН
БИЛИМ БЕРҮҮ ЖАНА ИЛИМ МИНИСТРЛИГИ

И. РАЗЗАКОВ атындагы КЫРГЫЗ
МАМЛЕКЕТТИК ТЕХНИКАЛЫК
УНИВЕРСИТЕТИ

720044, Кыргызстан, Бишкек ш.
Ч.Айтматов к., 66
Тел. +996 312 545125, факс +996 312 545162

Первомайский РОК р/с 4402011103004532 Центральное Казначейство при МФКР НБКР
БИК 440001 ИНН 02702200610350 Код ОКПО 23999934
УГНС Первомайского района 004

2399993 4

0253101 2



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. И. РАЗЗАКОВА

720044, Кыргызстан, г. Бишкек,
пр. Ч.Айтматова, 66
E-mail: rector@kstu.kg Website: <http://kstu.kg>

№ 1702/09-1

«10» 05 2022 г.

№



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по НРиВС

д.т.н., профессор Б.Т. Торобеков

«10» мая 2022 г.

**Акт внедрения результатов научно-исследовательских,
научно-технических работ, результатов научной и научно-
технической деятельности**

1. Автор внедрения: **Белекова Жылдыз Шаршеналыевна**
2. Наименование научно-исследовательских, научно-технических работ и результатов научной и научно-технической деятельности: **«Исследование и разработка режима сварки СМТ (Cold Metal Transfer) мелкозернистых лёгких сплавов»**
3. Краткая аннотация: Согласно анализу литературных данных, сварка алюминиевых сплавов (5083, 6082) новейшим методом сварки с малой теплотой (СМТ- Cold Metal Transfer) проводилась и ранее. Однако, до настоящего времени не было достаточных работ по СМТ алюминиевых сплавов 6082 и 5083 с толщиной листа 2 мм, которые широко применяются для изготовления труб. Отсутствуют комплексные работы по сварке тонких листов алюминиевых сплавов методом СМТ, в которых было подробно рассмотрено влияние микроструктуры на свойства сварочного шва и основного материала. Также, не достаточно данных о влиянии параметров

СМТ-сварки на механические свойства получаемых соединений. Исследования поведения сварного соединения СМТ-процессом, также изменение микроструктуры, механических свойства, и особенности разрушения сварного шва является важной научной и практической задачей. На основании результатов обширно проведенных экспериментов разработаны эмпирические модели позволяющие рассчитать предел прочности сварного шва в зависимости от скорости подачи проволоки и количества пор; определена эмпирическая модель, позволяющая рассчитать величину снижения характеристик прочности сварных швов в зависимости количества пор.

Экономическая эффективность использования результатов работы является повышение качества и надежности сварных швов алюминиевых сплавов 5083 (Al-Mg) и 6082(Al-Mg-Si), полученных методом сварки СМТ, выраженное в увеличении срока службы сваренных изделий.

4. *Эффект от внедрения:* материалы диссертации содействуют углубленному изучению студентами современных видов сварочных технологий, особенности сварки мелкозернистых (алюминиевых) сплавов марки 5083 (Al-Mg), 6082 (Al-Mg-Si).
5. *Место и время внедрения:* Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, кафедра «Технология машиностроения», осенний, весенний семестры.
6. *Форма внедрения:* Итоги диссертационной работы включены в методическое указание «Сварка алюминиевых сплавов с малой теплотой (СМТ)» для направлений 650300 «Машиностроение» 650100 «Материаловедение и технология новых материалов» для студентов очной и заочной форм обучения.

Зав. кафедрой «Технология машиностроения»
к.т.н., профессор



У. К. Омуралиев

КЫРГЫЗ РЕСПУБЛИКАСЫНЫН
БИЛИМ БЕРҮҮ ЖАНА ИЛИМ
МИНИСТРЛИГИ

М.М. АДЫШЕВ АТЫНДАГЫ
ОШ ТЕХНОЛОГИЯЛЫК
УНИВЕРСИТЕТИ



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

ОШСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.М. АДЫШЕВА

714018, Ош ш., Н. Исанов кеч., 81.

Тел.: (3222) 4-31-32.

Факс: (3222) 4-33-97.

2022-ж. «28» 06

№ 69-69/282

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE
OF KYRGYZ REPUBLIC
THE OSH TECHNOLOGICAL UNIVERSITY
NAMED AFTER M.M. ADYSHEV

E-mail: musa.adyshev@mail.ru

723503, г. Ош, ул. Н. Исанова, 81.

<http://www.oshtu.kg>

УТВЕРЖДАЮ

Ф.и.о. ректора Ошского технологического
университета проф. Сагындышев М. Дж.

«28» 06 2022



**Акт внедрения результатов научно-исследовательских,
научно-технических работ, результатов научной и научно-
технической деятельности**

1. Автор внедрения: Белекова Жылдыз Шаршеналыевна
2. Наименование научно-исследовательских, научно-технических работ и результатов научной и научно-технической деятельности: «Исследование и разработка режима сварки СМТ (Cold Metal Transfer) мелкозернистых лёгких сплавов»
3. Краткая аннотация: СМТ-процесс позволяет точно управлять процессом сварки, дает лучший результат при сварке тончайших листов толщиной от 0,3 мм, поэтому данный вид сварки внедрен в учебный процесс. Определены режимы и условия СМТ сварки позволяющие получить высокое качество сварного шва:
 - инертный газ чистый аргон и смесь газ Ar/He 30;
 - диаметр сварочной проволоки 1,2 мм;
 - скорость сварки 0,4 м/мин;
 - скорость подачи сварочной проволоки 3,5;4;4,5;5 м/мин.
4. Эффект от внедрения: материалы диссертации содействуют углубленному изучению студентами современных видов сварочных технологий, особенности сварки мелкозернистых (алюминиевых) сплавов марки 5083 (Al-Mg), 6082 (Al-Mg-Si).
5. Место и время внедрения: Ошский Технологический университет им. М.М. академика Адышева, кафедра «Физика и энергетическое

машиностроение», осенний, весенний семестры.

б. Форма внедрения: В учебный процесс, для бакалавров машиностроительных направлений.

Представитель организации, в которую внедрена разработка
Зав. кафедрой «Физика и энергетическое машиностроение»

к.т.н., проф. ОшТУ


28.06.2022

Сатыбалдыев А. Б.