

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

(наименование кафедры)

15.04.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Производство и ремонт сварных конструкций газонефтехимического  
оборудования

(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Исследования процессов и разработка технологии ручной дуговой  
сварки плавящимися штучными электродами BOHLER FOX BVD 90  
магистральных трубопроводов

Студент

О.В. Ибрагимова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

д.т.н., профессор, А.И. Ковтунов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2022

## Содержание

Содержание .....	2
Введение .....	5
1 Ручная дуговая сварка при выполнении сварных соединений магистральных трубопроводов .....	7
1.1 Преимущества ручной дуговой сварки.....	7
1.2 Сущность процесса ручной дуговой сварки плавящимся покрытым электродом.....	9
1.3 Преимущества и недостатки сварочных электродов с различными видами покрытия.....	10
1.4 Методы выполнения ручной дуговой сварки стыков магистральных трубопроводов .....	17
1.5 Выводы по главе и задачи диссертационного исследования .....	18
2 Методика исследования процесса ручной дуговой сварки и контроль сварных соединений магистральных трубопроводов .....	20
2.1 Характеристики материала трубы .....	20
2.2 Характеристики сварочных материалов выбранных для исследования	21
2.2.1 Характеристики электродов Nittetsu-16W .....	22
2.1.2 Характеристики электродов Nittetsu L-60LT .....	23
2.1.3 Характеристики электродов BOHLER FOX BVD 90 .....	25
2.3 Оборудование для выполнения контрольных сварных соединений .....	27
2.4 Показатели технологического процесса при выполнении контрольных сварных соединений.....	31
2.5 Методика контроля качества сварных соединений .....	33

2.5.1	Методика проведения визуального и измерительного контроля стыковых сварных соединений .....	33
2.5.2	Методика проведения ультразвукового контроля стыковых сварных соединений .....	36
2.5.3	Методика проведения радиографического контроля .....	40
2.5.4	Методика механических испытаний .....	44
3	Технология выполнения контрольных сварных соединений .....	60
3.1	Подготовка кромок труб .....	60
3.2	Сборка контрольного сварного соединения .....	62
3.3	Предварительный подогрев .....	64
3.4	Прихватка .....	65
3.5	Сварка .....	67
3.5.1	Сварка корневого слоя шва.....	67
3.5.2	Сварка заполняющих и облицовочных слоёв шва .....	67
3.5.2.1	Сварка заполняющих и облицовочного слоёв шва вариант 1 .....	68
3.5.2.2	Сварка заполняющих и облицовочного слоёв шва вариант 2.....	68
4	Анализ технологических вариантов выполнения ручной дуговой сварки ..	72
4.1	Результаты контроля качества сварных соединений .....	72
4.1.1	Визуально-измерительный контроль .....	72
4.1.2	Ультразвуковой контроль .....	72
4.1.3	Рентгенографический контроль.....	74
4.1.4	Испытание сварных соединений на статическое растяжение .....	75
4.1.5	Испытание сварных соединений на статический изгиб .....	78
4.1.6	Испытание сварных соединений на ударный изгиб.....	80
4.1.7	Металлографическое исследование микроструктуры.....	83

4.1.8 Химический анализ сварных швов.....	88
4.2 Показатели технологического процесса при выполнении контрольных сварных соединений.....	91
Заключение .....	93
Список используемой литературы и используемых источников .....	96
Приложение А Технологическая карта ручной дуговой сварки с применением электродов марки BOHLER FOX BVD 90.....	100

## Введение

На сегодняшний день одними из главных товаров на мировом рынке являются газ и нефть. Доходы от их продажи составляют значительную бюджета государства. При этом огромные расстояния между районами добычи углеводородов и местами их потребления требуют эффективных способов доставки. Таким образом, важнейшими для нефтегазовой отрасли, а также всей страны в целом являются вопросы эффективной добычи и транспортировки сырья к потребителю (или покупателю).

При больших объемах транспортируемого продукта (а именно этим отличаются современные нефте- и газодобывающая отрасль) затраты на транспортировку единицы объема этого продукта по трубопроводу значительно меньше затрат на транспортировку того же объема автомобильным, железнодорожным или морским транспортом. Таким образом, самым экономичным и бесперебойным способом доставки сырья на данный момент является трубопроводный транспорт. Бесперебойность работы трубопроводов, в свою очередь, зависит от его надежности и ремонтпригодности.

«Надёжность и качество сооружения трубопроводов в целом зависит от качества выполнения отдельных видов работ, выполняемых при строительстве: подготовительных, земляных, сварочно-монтажных, изоляционно-укладочных, контрольных. Но важнейшим процессом, значительным образом влияющим на эксплуатационные характеристики будущего трубопровода, являются всё же сварочные работы» [23], так как это основной процесс, позволяющий получать надежные неразъемные соединения труб и деталей трубопроводов.

Способы сварки трубопроводов разделяют на термические, термомеханические и механические.

В рамках осуществления сварки магистральных трубопроводов в большинстве случаев отдается предпочтение использованию дуговых

методов сварки, относящихся к термическому классу. Практика показывает, что большую часть всех стыков на магистралях свариваются за счет автоматической и механизированной сварки, которые имеют высокую производительность. Но эти методы сварки являются достаточно специализированными, что делает их применение при определённых условиях нерентабельными или вообще невозможными.

При этом надо учитывать, что вышеуказанные специальные сварочные работы должны выполняться от начала и до конца без перерывов. А при выполнении ремонтных работ на эксплуатируемых трубопроводах, связанных с остановкой перекачки продукта, еще и с ограничением по времени, выделенному на остановку трубопровода, когда любые задержки в работе трубопровода ведут к огромным финансовым потерям [40].

Поэтому относительно большой объём сварочных работ выполняют с помощью ручной дуговой сварки покрытыми электродами, несмотря на более низкую производительность по сравнению с вышеуказанными способами.

Возможность применения электродов с различными видами покрытий и комбинирование методов выполнения сварки даёт поле деятельности по поиску оптимального варианта выполнения ручной дуговой сварки.

Таким образом, повышение производительности ручной дуговой сварки стыков магистральных трубопроводов, при сохранении требуемого уровня качества является целью данной работы.

# **1 Ручная дуговая сварка при выполнении сварных соединений магистральных трубопроводов**

## **1.1 Преимущества ручной дуговой сварки**

Для выполнения сварочных работ на магистральных трубопроводах в настоящее время наибольшее распространение получили следующие способы сварки плавлением и их комбинации с различной степенью механизации процесса [6], [27]:

- ручная дуговая сварка покрытыми электродами (РД);
- механизированная сварка плавящимся электродом в среде активных газов и смесях (МП);
- механизированная сварка самозащитной порошковой проволокой (МПС);
- автоматическая сварка плавящимся электродом в среде активных газов и смесях (АПГ);
- автоматическая сварка порошковой проволокой в среде инертных газов и смесях (АПИ);
- автоматическая сварка под флюсом (АФ);
- комбинированные технологии сварки (РД+МПС, РД+АПИ, РД+АФ, МП+МПС, МП+АПИ, МП+МПС+АФ, МП+РД+АФ).

Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки, определяемые экономической эффективностью и техническими возможностями, находя баланс между которыми, возможно их применение.

Автоматические способы сварки целесообразно применять при больших объёмах производства сварочных работ и одном типоразмере трубопровода. Например, сварка протяженных участков магистральных трубопроводов и, как правило, большого диаметра и толщины стенки. Это обусловлено технологическими возможностями, которые позволяют выполнять большой объём сварных соединений в течении рабочей смены, за

счёт механизации процессов, применения при сварке узкой разделки кромок или сварочной проволоки с большой наплавляющей способностью. Но при этом комплект оборудования имеет большую стоимость и достаточно узкие диапазоны применения по типоразмерам труб и невозможность применения при сварке определённых типов соединительных деталей трубопроводов, либо требует наличия дополнительного оборудования при смене типоразмера трубы или вида детали [29], [33].

Использование механизированных способов сварки обусловлено более универсальными возможностями по выполнению сварки различных типоразмеров труб и видов деталей, относительно дешевой стоимостью комплекта оборудования, по сравнению с автоматическими способами сварки. При этом, производительность механизированных способов сварки ниже, чем у автоматических, за счёт сварки в стандартную разделку кромок, но выше, чем у ручной дуговой сварки, за счёт механизации процесса подачи сварочной проволоки, и большего коэффициента наплавки проволок на больших плотностях сварочного тока. Поэтому, механизированные способы применяют, как правило, при сварке участков магистральных трубопроводов средней длины (от 1 до 10 км) и толщиной стенки труб до 21 мм [29], [34].

За счёт оптимального сочетания характеристик очень часто используются и комбинированные технологии сварки. Но главным их недостатком является необходимость в применении различных типов оборудования и наличия соответствующего сварочного персонала, что делает данные технологии не всегда рентабельными.

В настоящее время самым универсальным способом сварки, позволяющим выполнять непротяженные участки магистральных трубопроводов и отдельные сварные соединения, а так же выполнять ремонт на сварных соединениях, не смотря на относительно низкую производительность и большую зависимость от квалификации сварочного персонала, является [41].

Это объясняется её неоспоримыми преимуществами:

- возможностью выполнения сварки широкого диапазона типоразмеров и видов деталей без изменения состава и характеристик применяемого сварочного оборудования и персонала;
- возможностью выполнения сварки в различных пространственных положениях и труднодоступных или ограниченных в пространстве местах (пример в траншеях);
- возможность получения качественных сварных соединений при относительно плохой подготовке и сборке (неравномерность притупления кромок и зазора по периметру стыка, на пример, при сварке захлёстов);
- относительная простота, дешевизна и мобильность применяемого оборудования;
- возможность применения в широком диапазоне климатических условий;
- возможность применения различных видов сварочных электродов в зависимости от требуемого качества сварных соединений [21], [37].

## **1.2 Сущность процесса ручной дуговой сварки плавящимся покрытым электродом**

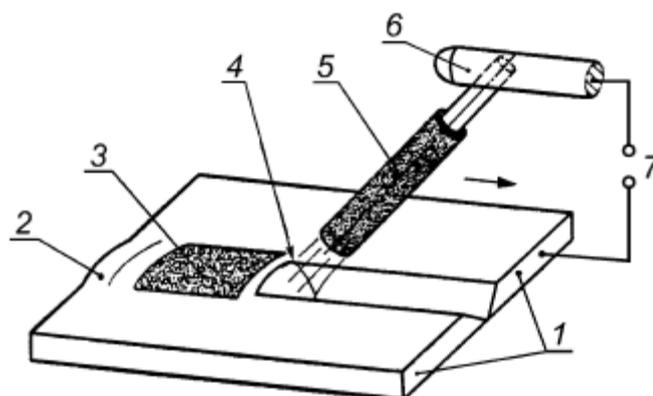
Согласно ГОСТ 2601-84 (с изменениями № 1, 2), «ручная дуговая сварка – это дуговая сварка, при которой возбуждение дуги, подача электрода и его перемещение проводятся вручную» [8].

Ручная дуговая сварка покрытыми электродами относится к термическому классу [15].

Схема процесса ручной дуговой сварки покрытыми электродами представлена на рисунке 1.

«В процессе сварки металлическим покрытым электродом — дуга горит между стержнем электрода и основным металлом, расплавляя их» [42].  
«Расплавленный металл стержня электрода каплями, проходя через дуговой

промежуток, попадает в расплавленную металлическую ванну на поверхности изделия. Вместе со стержнем плавится покрытие электрода, образуя газовую защитную атмосферу вокруг сварочной дуги и жидкую шлаковую ванну на поверхности расплавленного металла. Металлическая и шлаковые ванны вместе образуют сварочную ванну. По мере движения дуги вдоль изделия, сварочная ванна кристаллизуется, образуя сварочный шов. Жидкий шлак после остывания образует твердую шлаковую корку» [19].



1 - заготовки; 2 - сварной шов; 3 - шлак; 4 – сварочная дуга; 5 - покрытый электрод; 6 - электрододержатель; 7 - источник питания

Рисунок 1 – Схема ручной дуговой сварки плавящимся покрытым электродом

«При этом сварщик вручную осуществляет два основных технологических движения: подачу покрытого электрода в зону сварки по мере его расплавления и его перемещение вдоль выполняемого сварного шва» [39].

### **1.3 Преимущества и недостатки сварочных электродов с различными видами покрытия**

Электроды для ручной дуговой сварки представляют собой стержни с нанесенными на них покрытиями.

Покрытие электродов готовится из порошкообразной смеси различных компонентов и наносится на поверхность стального стержня в виде затвердевающей пасты [28].

Обмазка, покрывающая стержни из металла, выполняет целый ряд задач:

– Предохранение капель металла, проходящих через дуговой промежуток и металла сварочной ванны от взаимодействия с присутствующими в составе атмосферы азота, кислорода, а также водорода, который содержится в парах воды. При этом обмазка стержня создает двухступенчатую защиту из паров углекислого газа и углеродных окисей, обволакивающих рабочий участок (газовая защита), и пленку шлака на поверхностном слое расплавленного металла (шлаковая защита) [16], [26].

– Обеспечение качественной кристаллизации шва без образования пор, шлаковых включений и трещин. Для этого в состав обмазки добавляют ферросплавы, которые легче и быстрее, чем металл свариваемого изделия, вступают в реакцию с кислородом и примесями; удаляя из металла сварочной ванны растворенный в ней кислород и вредные примеси (серу, фосфор) [16].

– Обеспечение бесперебойного горения дуги в широком спектре значений сварочного тока и облегчение процесса её возбуждения. Это достигается введением в состав электродных покрытий элементов с низким потенциалом ионизации, вследствие чего, для ионизации газовой смеси требуется меньшее количество энергии [28], [27].

Таким образом назначение электродного покрытия – повышение устойчивости горения дуги, проведение металлургической обработки сварочной ванны и улучшение качества сварного шва [15].

В настоящее время электродные покрытия по составу и металлургическим свойствам подразделяются на виды [4], представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Виды покрытий сварочных электродов

Вид	Обозначение по ГОСТ9466-75	Международное обозначение ISO
Кислое	А	А
Основное	Б	В
Рутиловое	Р	R
Целлюлозное	Ц	С
Смешанные		
Кислорутиловые	АР	AR
Рутил-основное	РБ	RB
Рутил-целлюлозное	РЦ	RC
Прочие (смешанные)	П	S
Рутиловые с Fe порошком	РЖ	RR

Кислые покрытия (А) состоят в основном из шлакообразующих оксидов железа, марганца, кремния, с небольшим включением оксида алюминия. Газообразующими добавками служат органические вещества, например, крахмал или целлюлоза, а связующим — жидкое стекло. Образующийся при плавлении шлак имеет характерные кислотные свойства, что и дало название этой группе. Электроды с кислым покрытием не имеют в составе дорогостоящих компонентов [24].

Главное преимущество обмазки кислого типа – образование пор в области шва стремится к нулю, даже если места сварки элементов покрыты следами ржавчины или окалиной. Кислое покрытие обладает стойкостью к увлажнению и прочностью к механическому воздействию, при этом способствует равномерному горению дуги и легкому ее зажиганию. Электроды с покрытием данного вида позволяют выполнять сварку как постоянном, так и переменном токе [24].

Наиболее ощутимыми недостатками электродов с кислым покрытием являются:

- высокое разбрызгивание при сварке;
- токсичные испарения, вызывающие силикоз;
- риск появления горячих трещин при сваривании

Образующийся шов имеет невысокую пластичность и склонность к старению [45]. По механическим характеристикам он сопоставим с марками кипящей стали невысокой прочности. Этот вид электродов не подходит для сварки высоколегированных сталей и сталей с высоким содержанием углерода и серы, поэтому применяется для сварки конструкций с невысокой нагрузкой, когда требования к ней минимальны [28].

Целлюлозные покрытия (Ц) в процессе сварки образуют хорошую газовую защиту электродного металла и сварочной ванны от водорода и кислорода. При сварке выделяется небольшое количество шлака. В состав целлюлозного покрытия входят следующие компоненты:

- органические соединения, составляющие большую часть смеси — до 50%. К ним относится целлюлоза, мука и крахмал. Роль этих соединений — обеспечение газовой защиты.
- может применяться незначительное количество рутилового концентрата.
- мрамор, карбонаты, а также алюмосиликаты и другие вещества, предназначенные для реализации шлаковой защиты.
- также могут добавляться металлические порошки и ферросплавы — для легирования металла шва [24].

Наплавленный металл соответствует спокойной или полуспокойной стали. По механическим свойствам сварных соединений электроды с целлюлозным видом покрытия соответствуют типам Э42-50 по ГОСТ 9467. Сварка выполняется как правило на постоянном токе, но возможно выполнение и на переменном.

Основными преимуществами электродов с целлюлозным покрытием являются:

- сварка в различных пространственных положениях;
- обеспечивают высокую скорость сварки;
- высокое качество выполнения корневого слоя шва, в том числе на тонких деталях [20], [28].

При имеющихся достоинствах, электроды с целлюлозным покрытием всё же имеют ряд недостатков:

- металла шва имеет пониженную пластичность, так как при сгорании органических соединений выделяется большое количество водорода, которое переходит в металл шва и может привести к образованию трещин;
- при сварке наблюдается сильное разбрызгивание металла (до 15%);
- швы получаются с грубочешуйчатой поверхностью и, как правило, требуют дополнительной шлифовки;
- нельзя сваривать конструкции из закаливающихся сталей, которые содержат много углерода и легирующих элементов.
- климатические условия России существенно усложняет использование данных электродов из-за температурных перепадов и пониженных температур окружающей среды.

В зависимости от производителей и разновидных модификаций, состав рутилового покрытия (Р) может немного отличаться. Однако в большинстве случаев состав следующий:

- на 50 % и более состоят из оксида титана — рутила, который является шлакообразующим веществом;
- в качестве добавок используются полевой шпат (около 20%), магнезит (около 15%), ферромарганец (примерно 15%).

В качестве положительных сторон электродов с данным видом покрытия можно выделить следующие моменты:

- возможность выполнения сварки как на постоянном, так и на переменном токе с высокой стабильностью горения дуги и малым разбрызгиванием;
- низкие требования к подготовке поверхности перед сваркой (возможна сварка изделий покрытых небольшим слоем грунтовки или ржавчины);
- отсутствие выделения токсичных веществ;

- повышенные показатели ударной вязкости и усталостной прочности получаемых сварных соединений по сравнению с кислым и целлюлозным покрытиями;
- возможность повторного зажигания электрода за счёт образования ко его конце нагара, являющегося полупроводником, что позволяет легко повторно возбудить дугу.

Однако, на все кажущиеся преимущества, электроды с рутилом покрытием не лишены и недостатков:

- электроды с рутиловым покрытием относятся в основном к типам Э42 и Э46, поэтому подходят для сварки только низкоуглеродистых и низколегированных сталей;
- свойства резко ухудшаются при повышении напряжения тока, поэтому придётся следить за соответствием номинальному показателю;
- необходимость в обязательной подготовке перед сваркой (прокалке).

Рутиловые составы могут применяться в смеси с любыми другими видами покрытий. Получающаяся в результате этого продукция маркируется двумя буквами в соответствии с компонентами: AP, PB, PC. К рутилу также добавляют порошкообразное железо. Такое покрытие маркируется буквами PЖ. Такие покрытия имеют преимущества и недостатки, присущие видам покрытий в ходящим в комбинацию. Поэтому могут применяться для сварки более широкого диапазона сталей, но получаемые свойства металла шва, всё же хуже, чем у электродов с основным видом покрытия [20], [24], [28].

Основное покрытие обозначается буквой «Б». Производится такая смесь из карбонатов кальция и магния. К ним относятся такие элементы, как мрамор, магнезит, доломит, при этом в качестве разбавителя шлака к перечисленным минералам добавляют также фтористый шпат ( $\text{CaF}_2$ ). Этот вид покрытий называется основным, так как в результате плавления образуется шлак с ярко выраженными основными свойствами, а из-за наличия в составе фтористого шпата такие электроды могут называть электродами с фтористо-кальциевым покрытием. Электроды с основным

видом покрытия создают хорошую газшлаковую защиту за счёт содержащихся в них компонентов. При разложении мрамора выделяется углекислый газ, защищающий дугу и сварочную ванну от попадания воздуха. Для стабильности горения применяются добавки карбонатов и щелочных металлов. Лучше всего основные электроды подходят для сварки постоянным током. Для работы с аппаратами на переменном токе выпускается продукция с сильными стабилизирующими компонентами. Без них постоянной дуги добиться сложно [20], [24].

Электроды с основным покрытием являются на данный момент самыми качественными сварочными материалами [42] для ручной дуговой сварки за счёт следующих преимуществ:

- возможность выполнения сварки большого диапазона марок углеродистых и легированных сталей;
- возможность получать сварной шов сопоставимый по химическому составу со свариваемой сталью, а по механическим свойствам, превосходящий её;
- возможность выполнять сварные соединения во всех пространственных положениях и широком диапазоне толщин;

К недостаткам электродов данного вида, можно отнести:

- относительную дороговизну, за счёт наличия в составе дорогих элементов;
- гигроскопичность покрытия, что требует обязательного соблюдения правил хранения и подготовки перед сваркой (прокалка).

Поэтому «для сварки магистральных трубопроводов, как наиболее ответственных конструкций применяются в основном электроды с основным видом покрытия» [23].

Так образом, электроды с определённым видом покрытия подбирают исходя из марки стали изделия, степени её ответственности, возможностей по подготовке кромок и конечной стоимости.

## **1.4 Методы выполнения ручной дуговой сварки стыков магистральных трубопроводов**

Согласно действующих нормативных документов Российской Федерации по сварке магистральных трубопроводов регламентируются следующие технологические варианты ручной дуговой сварки покрытыми электродами:

- ручная дуговая сварка всех слоёв шва электродами с основным видом покрытия методом «на подъём» (метод 1);
- ручная дуговая сварка всех слоёв шва электродами с целлюлозным видом покрытия методом «на спуск» (метод 2);
- ручная дуговая сварка комбинированным способом: корневой слой и горячий проход электродами с целлюлозным видом покрытия методом «на спуск», заполняющие и облицовочный слой шва электродами с основным видом покрытия методом «на подъём» (метод 3);
- ручная дуговая сварка комбинированным способом: корневой слой и горячий проход электродами с целлюлозным видом покрытия методом «на спуск», заполняющие и облицовочный слой шва электродами с основным видом покрытия методом «на спуск» (метод 4);
- ручная дуговая сварка комбинированным способом: корневой слой электродами с основным видом покрытия методом «на подъём», заполняющие и облицовочный слой шва электродами с основным видом покрытия методом «на спуск» [23], [31], [35] (метод 5).

Выполнение сварки по методам 2, 3, 4, не смотря на кажущуюся более высокую производительность, по сравнению с остальными, является ограниченным в использовании, из-за применения электродов с целлюлозным видом покрытия, имеющих следующие недостатки:

- пониженные механические свойства сварных соединений из-за повышенного содержания водорода в металле шва [44];

- ограничение применения по температуре окружающего воздуха (запрещается применять при  $-40^{\circ}\text{C}$ );
- строгое соблюдение режимов просушки электродов, т.к. покрытие должно содержать 3-4% влаги.

## **1.5 Выводы по главе и задачи диссертационного исследования**

На основании проведённых литературных исследований можно сделать следующий вывод:

Сварка непротяженных участков (до 1 км), а так же достаточно большой объем специальных сварочных работ, таких как сварка захлёстов, сварка труб с соединительными деталями трубопроводов и запорно-регулирующей арматурой, ремонт сварных соединений выполняется с помощью ручной дуговой сварки, не смотря на низкую производительность и нестабильное качество сварных соединений, зависящее от профессионального мастерства сварщиков [15], [40].

Механизированные и автоматические способы сварки, имеющие более высокую производительность и позволяющие получать более стабильное качество сварных соединений, за счет уменьшения человеческого фактора, в данных условиях не применяются, либо применяются очень ограниченно по двум основным факторам:

- экономической не целесообразности, так как требуют применения, как правило, разных специализированных моделей достаточно дорогого оборудования, необходимых для сварки одного стыка, что не позволяет в полной мере использовать его высокую производительность из-за трудоемкости подготовительных работ и простоя оборудования;
- трудности или вообще невозможность получить качественное сварное соединение, так как при их выполнении механизированными или автоматическими способами сварки, в большей степени, чем при

ручной дуговой сварке, зависит от качества выполнения подготовки кромок и сборки стыка, которое не всегда возможно обеспечить (например при сварке захлёстов методом «вварки катушки»).

Поэтому ручная дуговая сварка является при определённых условиях не заменимым процессом, не смотря на её недостатки.

На основании вышеизложенного, можно сформулировать следующие задачи диссертационного исследования:

- разработать технологию ручной дуговой сварки методом «на спуск» применением электродов с основным видом покрытия.
- разработка методики исследования процессов ручной дуговой сварки стыков магистральных трубопроводов из сталей класса прочности К56.
- проведение сравнительного анализа процессов ручной дуговой сварки стыков магистральных трубопроводов из сталей класса прочности К56 с применением электродов марки Nittetsu L-60LT диаметром 3,2 мм и марки BOHLER FOX BVD 90 диаметром 3,2 мм.
- проведение сравнительного анализа сварных соединений стыков магистральных трубопроводов из сталей класса прочности К56, выполненных с помощью ручной дуговой сварки с применением электродов марки Nittetsu L-60LT диаметром 3,2 мм и марки BOHLER FOX BVD 90 диаметром 3,2 мм.

## **2 Методика исследования процесса ручной дуговой сварки и контроль сварных соединений магистральных трубопроводов**

### **2.1 Характеристики материала трубы**

В качестве основного материала используется электросварная прямошовная магистральная труба номинальным наружным диаметром 530 мм номинальной толщиной стенки 8,0 мм класса прочности К56, изготовленная по ТУ 1381-051-05757848-2011. Общий вид катушки из трубы представлен на рисунке 2:



Рисунок 2 – Труба электросварная 530x8,0-K56

Прокат класса прочности К56 выполняется с применением технологий микролегирования и предназначен для изготовления труб магистральных трубопроводов с высокой эксплуатационной надежностью и коррозионной стойкостью, способных выдерживать значительное давление и экстремальные температуры.

Согласно данным сертификата качества на трубу, при изготовлении использована конструкционная низколегированная сталь 09Г2ФБ.

Химический состав стали согласно ТУ 1381-051-05757848-2016 представлен в таблице 2 [18]:

Таблица 2 – Химический состав стали 09Г2ФБ

Содержание элементов, %													
C	P	S	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	N	Al	V	Ti	Nb	Fe
≤0,13	≤0,02	≤ 0,007	≤1,7	≤0,35	≤0,3	≤0,3	≤0,3	≤ 0,012	0,02 ÷ 0,05	≤0,09	0,01 ÷ 0,035	≤0,05	оста- ток

Эквивалент углерода  $S_{эв} \leq 0,43$ .

Механические свойства стали согласно ТУ 1381-051-05757848-2011 представлены в таблице 3 [19]:

Таблица 3 – Механические свойства стали

Наименование параметра	Значение
Предел текучести, МПа	≥390
Временное сопротивление, МПа	≥550
Относительное удлинение, %	≥20
Ударная вязкость KCV (-40°C), Дж/см <sup>2</sup>	≥39,2

## 2.2 Характеристики сварочных материалов выбранных для исследования

Для проведения исследований в данной работе были выбраны следующие сварочные электроды с основным видом покрытия:

- для сварки корневого слоя шва электроды марки Nittetsu-16W диаметром 2,6 мм;
- для сварки заполняющих и облицовочного слоёв шва методом «на подъём» электроды марки Nittetsu L-60LT диаметром 3,2 мм;
- для сварки заполняющих и облицовочного слоёв шва методом «на спуск» электроды марки BOHLER FOX BVD 90 диаметром 3,2 мм.

## 2.2.1 Характеристики электродов Nittetsu-16W

Сварочные электроды с основным видом покрытия марки Nittetsu-16W диаметром 2,6 мм производства «Nippon Steel Welding & Engineering Co. Ltd» (Япония) (рисунок 3) предназначены для сварки методом «на подъём»:

- всех слоёв шва трубопроводов и ответственных металлоконструкций из сталей классов прочности до K54 вкл. (до 530 МПа вкл.);
- корневого и подварочного слоёв трубопроводов и ответственных металлоконструкций из сталей классов прочности от K55 до K60 вкл. (от 540 МПа до 590 МПа вкл.).



Рисунок 3 – Электроды марки Nittetsu-16W Ø2,6 мм

Электроды Nittetsu-16W предназначены для сварки на переменном (AC) и постоянном токе (DC±), как прямой, так и обратной полярности во всех пространственных положениях, кроме «сверху-вниз». Рекомендуемые параметры режима сварки представлены в таблице 4:

Таблица 4 – Рекомендуемые параметры режима сварки

Слой шва	Сила сварочного тока, А
Корневой проход	40÷80
Заполняющие и облицовочные слои	50÷100

Химический состав наплавленного металла представлен в таблице 5:

Таблица 5 – Химический состав наплавленного металла, (%)

C	Si	Mn	S	P	Fe
0,07	0,61	0,9	0,010	0,013	остаток

Типичные механические свойства наплавленного металла шва представлены в таблице 6:

Таблица 6 – Механические свойства наплавленного металла

Наименование параметра	Значение
Предел текучести, МПа	≥390
Временное сопротивление, МПа	≥490
Относительное удлинение, %	≥22
Ударная вязкость KCV (-20°C), Дж/см <sup>2</sup>	≥49

Электроды полностью соответствует характеристикам, принятым в международной сварочной практике. При сварке даёт сварной шов с низким содержанием водорода. Характеризуется высокой стабильностью дуги и гарантированным формированием обратного валика при сварке корневого слоя шва.

### **2.1.2 Характеристики электродов Nittetsu L-60LT**

Сварочные электроды с основным видом покрытия марки Nittetsu L-60LT Ø3,2 мм производства «Nippon Steel Welding & Engineering Co. Ltd» (Япония) (рисунок 4) предназначены для сварки методом «на подъём» заполняющих и облицовочного слоёв трубопроводов и ответственных металлоконструкций из сталей классов прочности от K55 до K60 вкл. (от 540 МПа до 590 МПа вкл.).



Рисунок 4 – Электроды марки Nittetsu L-60LT Ø 3,2 мм

Электроды Nittetsu L-60LT предназначены для сварки на переменном (АС) и постоянном токе (DC±), как прямой, так и обратной полярности во всех пространственных положениях, кроме «сверху-вниз». Рекомендуемые параметры режима сварки представлены в таблице 7:

Таблица 7 – Рекомендуемые параметры режима сварки

Слой шва	Сила сварочного тока, А
Заполняющие и облицовочные слои	90÷140

Химический состав наплавленного металла представлен в таблице 8.

Таблица 8 – Химический состав наплавленного металла, (%)

С	Si	Mn	Mo	Ni	Ti	B	Fe
0,06	0,50	1,51	0,18	0,63	0,03	0,002	остаток

Типичные механические свойства наплавленного металла шва представлены в таблице 9:

Таблица 9 – Механические свойства наплавленного металла:

Наименование параметра	Значение
Предел текучести, МПа	$\geq 530$
Временное сопротивление, МПа	$\geq 620$
Относительное удлинение, %	$\geq 22$
Ударная вязкость KCV (-40 °С), Дж/см <sup>2</sup>	$\geq 58$

Электроды полностью соответствует характеристикам, принятым в международной сварочной практике. При сварке даёт сварной шов с максимально низким содержанием водорода и обладает высокими характеристиками CTOD (трещиностойкость) при низких температурах.

### 2.1.3 Характеристики электродов BOHLER FOX BVD 90

Электроды с с основным видом покрытия марки BOHLER FOX BVD 90 диаметром 3,2 мм производства компания Bohler Welding (Австрия) (рисунок 5) предназначены для сварки методом «на спуск» заполняющих и облицовочного слоёв трубопроводов и ответственных металлоконструкций из сталей классов прочности от K55 до K60 вкл. (от 540 МПа до 590 МПа вкл.).



Рисунок 5 – Электроды марки BOHLER FOX BVD 90 Ø3,2 мм

Электроды BOHLER FOX BVD 90 предназначены для сварки на постоянном токе обратной полярности (DC+) во всех пространственных

положениях, кроме «снизу-вверх». Рекомендуемые параметры режима сварки представлены в таблице 10:

Таблица 10 – Рекомендуемые параметры режима сварки

Слой шва	Сила сварочного тока, А
Заполняющие и облицовочные слои	110÷160

Химический состав наплавленного металла представлен в таблице 11:

Таблица 11 – Химический состав наплавленного металла, (%)

С	Si	Mn	Ni	Fe
0,05	0,3	1,2	2,2	остаток

Типичные механические свойства металла шва представлены в таблице 12:

Таблица 12 – Механические свойства наплавленного металла

Наименование параметра	Значение
Предел текучести, МПа	≥550
Временное сопротивление, МПа	≥620
Относительное удлинение, %	≥18
Ударная вязкость KCV (-50 °С), Дж/см <sup>2</sup>	≥47

Электроды полностью соответствует характеристикам, принятым в международной сварочной практике. Получаемые сварные швы характеризуются низким содержанием диффузионного водорода, что предотвращает образование холодных трещин и обеспечивает высокую ударную вязкость. Специальная конструкция электрода позволяет легко

зажигать дугу и избегать образования стартовых пор [46]. Легко отделяемый шлак снижает затраты на межслойную вышлифовку. Электрод незаменим при работе в полевых условиях. Производительность наплавки на 80-100 % выше, чем при обычной сварке «на подъем».

### **2.3 Оборудование для выполнения контрольных сварных соединений**

При проведении исследований технологических вариантов ручной дуговой сварки стыков магистральных трубопроводов будем использовать в качестве источника питания сварочный выпрямитель инверторного типа Invertec V350 PRO производства фирмы LINCOLN ELECTRIC (рисунок 6).



Рисунок 6 – Сварочный аппарат Invertec V350-PRO

При мощности в 12 кВт сварочный выпрямитель обеспечивает сварочный ток в пределах 5÷425А, что позволяет выполнять сварочные работы в широком диапазоне токов. В основу работы сварочного выпрямителя положен метод высокочастотного преобразования

электрической энергии, что значительно снижает габариты и вес всего источника питания [22], [23]. «Аппарат оснащен функциями регулировки индуктивности и "Форсирования дуги" (Arc Force)».

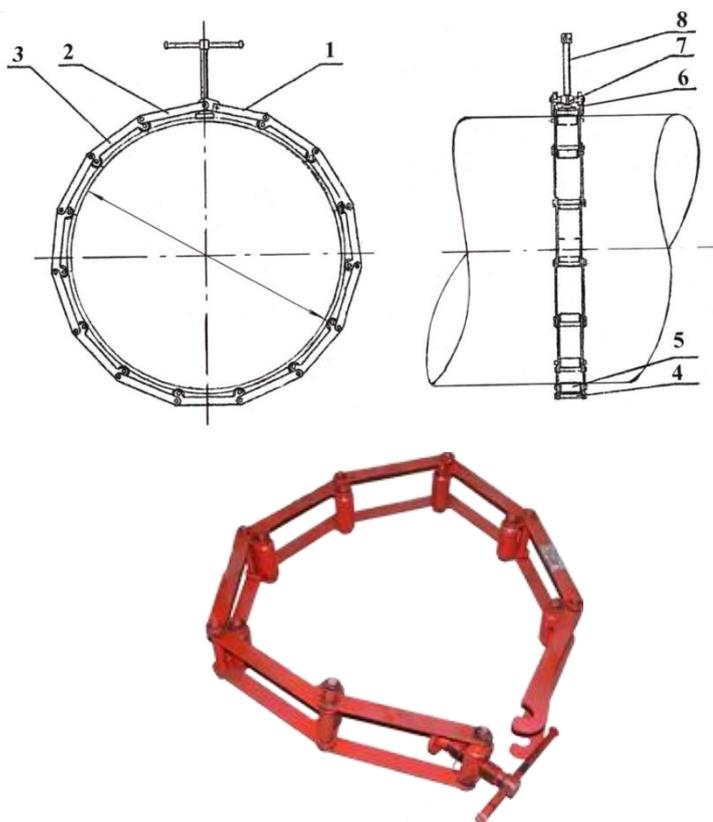
Для передачи тока от сварочного аппарата к электроду используется гибкий сварочный кабель, представляющий собой многожильный медный провод в защитной диэлектрической оболочке. На одном конце сварочного кабеля крепится специальный кабельный разъем для подсоединения к сварочному аппарату, на другом, в зависимости от назначения кабеля, электрододержатель или клемма заземления [25].

Электрододержатель необходим для безопасного удержания электрода и быстрой его смены в процессе сварки. Подвод сварочного тока непосредственно к изделию выполняется с помощью клемм заземления различных конструкций. Электрододержатели и клеммы заземления выбираются в зависимости от максимальных сварочных токов, на которых выполняется сварка [6], [17]. В нашем случае будем использовать электрододержатель ESAB Confort 200 (рисунок 7 а)), рассчитанный на ток 200А и клемму заземления ESAB EG-600 (рисунок 7 б)), рассчитанную на 600А.



Рисунок 7 – Электрододержатель ESAB Confort 200 и клемма заземления ESAB EG-600

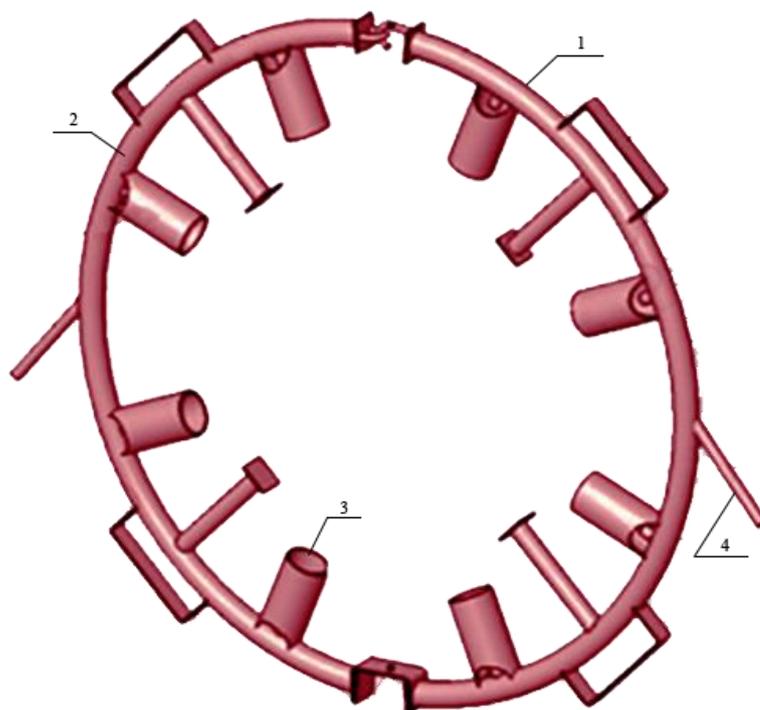
Для сборки стыковых соединений магистральных трубопроводов, в зависимости от вида деталей и количества выполняемых сварных соединений применяют наружные и внутренние центраторы [23], [31], [35]. При выполнении данной работы будем использовать наружный звенный центратор ЦЗН-530, представляющий собой шарнирный многогранник из пластинчатых звеньев с нажимными роликами в узлах. Механизм стяжки центратора – винтовой. Общий вид центратора представлен на рисунке 8. Данный тип центраторов применяется при сборке, как правило, сварных соединений, расположенных в труднодоступных местах (на уклонах, в траншеях) или сварных соединений, у которых отсутствует возможность использовать внутренний центратор (сварка соединений труба + отвод, сварка захлестных соединений и т.д.).



1,2,3-звено, 4-ось, 5-ролик, 6-пята, 7-траверса, 8- винт

Рисунок 8 – Центратор звенный наружный ЦЗН-530

Для предварительного прогрева сварного стыка перед сварочными работами будем использовать кольцевой газовый подогреватель стыков труб ПСТ-530. Подогреватель стыков состоит из двух полуколец труб соединяемых между собой замками (рисунок 9). Для удобства монтажа и эксплуатации в конструкции предусмотрены ручки, по две на каждую половину. Оптимальное расстояние от горелок ПСТ до трубопровода обеспечивается опорными пятнами. В ПСТ имеются два штуцера для подключения газового рукава. Поджиг газа осуществляется за счет внешнего источника воспламенения. Газопламенные подогреватели типа ПСТ-530 применяются для подогрева стыков труб, имеющих толщины стенок не более 17,0 мм.



1- секция 1, 2 - секция 2, 3 - горелка, 4 –мундштук

Рисунок 9 – Кольцевой подогреватель стыков труб

Для контроля температуры предварительного подогрева, а так же межслойной температуры используются контактные и бесконтактные термометры. При выполнении практической части будет использоваться пирометр Fluke 59 MAX (рисунок 10).



Рисунок 10 – Внешний вид бесконтактного термометра Fluke 59 MAX

## 2.4 Показатели технологического процесса при выполнении контрольных сварных соединений

В процессе выполнения контрольных сварных соединений необходимо выполнять фиксацию нижеперечисленных показателей технологического процесса с занесением их в таблицу 13:

Таблица 13 – Показатели технологических вариантов

Параметр	Единицы измерения	вариант 1 (Nittetsu)	вариант 2 (FOX BVD)
T <sub>1</sub> - время предварительного подогрева до +50°C ÷ +80°C при Токр возд +10°C	мин		
T <sub>2</sub> - время на сборку стыка с установкой (с установкой с каждой стороны 2-х прихваток)	мин		
N <sub>1</sub> - количество электродов на установку прихваток	шт		

Продолжение таблицы 13

Параметр	Единицы измерения	вариант 1 (Nittetsu)	вариант 2 (FOX BVD)
T <sub>3</sub> - время сварки корневого слоя	мин		
N <sub>2</sub> - количество электродов на сварку корневого слоя	шт		
T <sub>4</sub> - время на зачистку корневого слоя	мин		
T <sub>5</sub> - время на межслойный подогрев до +100°C ÷ +130°C	мин		
T <sub>6</sub> - время сварки заполняющего слоя	мин		
N <sub>3</sub> - количество электродов на сварку заполняющего слоя	шт		
T <sub>7</sub> - время на зачистку заполняющего слоя, T <sub>2</sub>	мин		
T <sub>8</sub> - время на межслойный подогрев до +100°C ÷ +130°C	мин		
T <sub>9</sub> - время сварки облицовочного слоя	мин		
N <sub>4</sub> - количество электродов на сварку облицовочного слоя	шт		
T <sub>10</sub> - время на зачистку облицовочного слоя	мин		

Замер времени, затрачиваемого на выполнение каждой операции при выполнении контрольного сварного соединения, выполнять с помощью секундомера.

Расчёт суммарного времени на выполнение сварочного стыка по каждому технологическому варианту выполнять по формуле (1):

$$\Sigma T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 + T_8 + T_9 + T_{10}, \quad (1)$$

где T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub>, T<sub>5</sub>, T<sub>6</sub>, T<sub>7</sub>, T<sub>8</sub>, T<sub>9</sub>, T<sub>10</sub> – время затраченное на выполнение операций указанных в таблице 13.

При подсчёте расхода электродов фиксируем в таблице 13 количество использованных при выполнении каждой операции электродов в штуках.

Суммарный расход электродов на выполнение заполняющего и облицовочного слоёв по каждому технологическому варианту рассчитывается по следующим формуле (2):

$$P = m \times (N_3 + N_4), \quad (2)$$

где  $m$  - теоретическая масса одного электрода, используемого при выполнении технологического варианта, кг;

$N_3, N_4$  - количество использованных электродов при выполнении заполняющего и облицовочного слоёв по технологическому варианту, шт.

Полученные суммарные показатели времени и расхода электродов при выполнении заполняющего и облицовочного слоёв шва по каждому технологическому варианту записываем в таблицу 14:

Таблица 14 – Суммарные показатели технологических вариантов

Параметр	Единицы измерения	вариант 1 (Nittetsu)	вариант 2 (FOX BVD)
Суммарное время, затраченное на выполнение сварного стыка	мин		
Суммарный расход электродов на сварку заполняющего и облицовочного слоёв	кг		

## 2.5 Методика контроля качества сварных соединений

### 2.5.1 Методика проведения визуального и измерительного контроля стыковых сварных соединений

Визуальный и измерительный контроль стыковых сварных соединений проводить согласно РД 03-606-03.

ВИК подвергать 100% сварных соединений.

«Визуальный и измерительный контроль качества сварных соединений выполняют с целью:

- проверки геометрических размеров сварных швов;
- выявления деформаций, поверхностных трещин, подрезов, прожогов, наплывов, кратеров, свищей, пор, раковин и других несплошностей и дефектов формы швов;

- определения соответствия сварных швов требованиям конструкторской, производственно-технической и нормативной документации» [1].

Требования к выполнению измерительного контроля сварных швов приведены в таблице 15.

Допустимая погрешность измерений при измерительном контроле должна соответствовать требованиям таблицы 16.

Освещенность контролируемых поверхностей в соответствии с ГОСТ Р 58399 должна быть не менее:

- 500 лк при естественном освещении или общем освещении лампами накаливания;
- 1000 лк при общем освещении разрядными лампами или светодиодными лампами;
- 2000 лк при комбинированном освещении лампами накаливания;
- 3000 лк при комбинированном освещении разрядными лампами [30].

Таблица 15 – Требования к выполнению измерительного контроля сварных швов [32]

Контролируемый параметр	Средства измерений <sup>1)</sup>	Примечание
Величина выпуклости/вогнутости сварного шва	Штангенциркуль с опорой, шаблон Ушерова-Маршака, приспособление с индикатором часового типа, шаблоны сварщика или аналогичный инструмент	Записи подлежат дефекты, параметры которых не соответствуют требованиям ПТД. В заключении также следует указывать наибольшее и наименьшее значение контролируемого параметра

Продолжение таблицы 15

Контролируемый параметр	Средства измерений <sup>1)</sup>	Примечание
Ширина сварного шва	Штангенциркуль или аналогичный инструмент	Записи подлежат дефекты, параметры которых не соответствуют требованиям ПТД. В заключении также следует указывать наибольшее и наименьшее значение контролируемого параметра
Глубина подреза	Индикатор часового типа	Измеряют каждый подрез глубиной более уровня фиксации (0,2 мм)
Величина смещения кромок	Штангенциркуль с опорной планкой, приспособление с индикатором часового типа	Измерение в местах, вызывающих сомнение по результатам визуального контроля. Записи подлежат недопустимые дефекты при их отсутствии – максимальное
Чешуйчатость шва	Штангенциркуль с опорной планкой, приспособление с индикатором часового типа	Измерение в местах, вызывающих сомнение по результатам визуального контроля. Записи подлежат только недопустимые дефекты
Глубина западаний между валиками	Штангенциркуль с опорной планкой, приспособление с индикатором часового типа, шаблоны сварщика или аналогичный инструмент	Измерение в местах, вызывающих сомнение по результатам визуального контроля. Записи подлежат только недопустимые дефекты
Размеры (диаметр, длина, ширина) одиночных несплошностей	Лупа измерительная, линейка, штангенциркуль	Измерению подлежит каждая несплошность. Записи подлежат только недопустимые дефекты
Плавность перехода	Шаблон оценки плавности перехода	Оценка в местах, вызывающих сомнение по результатам визуального контроля. Записи подлежат только недопустимые дефекты

Таблица 16 – Допустимая погрешность измерений при измерительном контроле

Диапазон измеряемой величины, мм	Погрешность измерений, мм
До 0,5 вкл.	0,1
Свыше 0,5 до 1,0 вкл.	0,2
» 1,0 » 1,5 »	0,3
» 1,5 » 2,5 »	0,4
» 2,5 » 4,0 »	0,5
» 4,0 » 6,0 »	0,6
» 6,0 » 10,0 »	0,8
» 10,0	1,0

Выпуклость (вогнутость) стыкового шва оценивается по максимальной высоте (глубине) расположения поверхности шва от уровня расположения наружной поверхности деталей. В том случае, когда уровни поверхностей деталей одного типоразмера (диаметр, толщина) отличаются друг от друга, измерения следует проводить относительно уровня поверхности детали, расположенной выше уровня поверхности другой детали (рисунок 11).

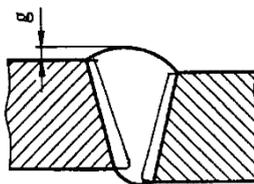


Рисунок 11 – Измерение высоты  $g$  стыкового шва при различном уровне наружных поверхностей деталей, вызванным смещением при сборке соединения под сварку

Сварные соединения, которые по результатам ВИК отвечают требованиям нормативной документации подвергаются последующему неразрушающему контролю физическими методами [1].

### **2.5.2 Методика проведения ультразвукового контроля стыковых сварных соединений**

Ультразвуковой контроль (УЗК) сварных соединений проводится для выявления внутренних и выходящих на поверхность протяженных

(непровары, несплавления, трещины, подрезы, цепочки скопления пор и включений) и не протяженных (одиночные газовые поры, шлаковые включения) дефектов.

УЗК сварных соединений выполнять согласно ГОСТ Р 55724-2013 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.

Ультразвуковой контроль при выполнении данной работы будем проводить с применением импульсного ультразвукового дефектоскопа A1214 EXPERT (рисунок 12), преобразователь П 121-5-70 S5096.



Рисунок 12 – Дефектоскоп ультразвуковой A1214 EXPERT

«Контроль сварных соединений необходимо осуществлять путем перемещения (сканирования) ПЭП (пьезоэлектрического преобразователя) по поверхности околошовной зоны сваренных элементов параллельно сварному шву с одновременным возвратно-поступательным движением в направлении перпендикулярному ему (рисунок 13). В процессе перемещения преобразователя ось ультразвукового луча поворачивают относительно линии поперечного перемещения от 10 до 15 градусов. Перемещение ПЭП

производят в зоне, ограниченной с одной стороны краем валика, с другой – расстоянием  $L_{max}$ , равным по формуле (3)»:

$$L_{vax} = 2S \operatorname{tg} \alpha - n + 3TB, \quad (3)$$

где  $n$  - стрела ПЭП.

При этом, как правило, нижнюю часть шва контролируют прямым лучом, а верхнюю - однократно отраженным лучом» [13].

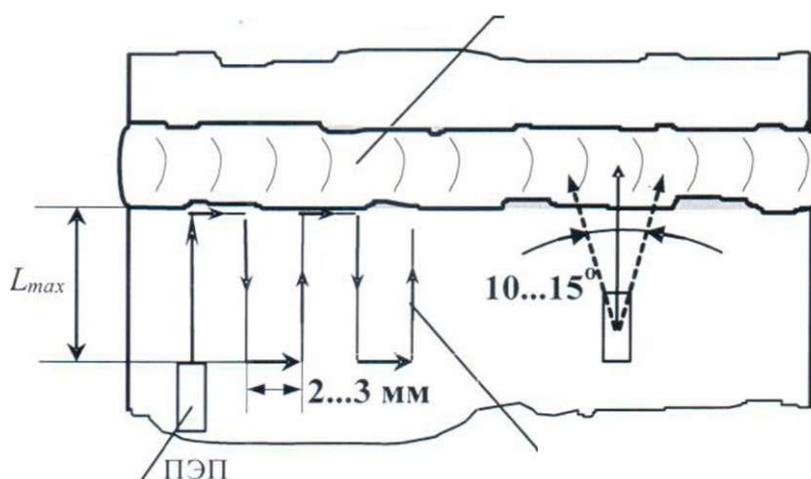


Рисунок 13 – Схема перемещения (сканирования) совмещенного ПЭП в околошовной зоне сварного соединения

«При контроле стыковых кольцевых сварных соединений сканирование осуществлять с обеих сторон валика шва. Величина продольного (вдоль шва) шага сканирования не должна превышать от 2 до 3 мм. Скорость сканирования не должна превышать 100 мм/с.

Признаком обнаружения дефекта служит появление при поисковом усилении эхо-сигнала на экране дефектоскопа в зоне развертки, соответствующей контролируемому участку шва» [13].

Контролируемыми параметрами являются:

- допустимость дефекта по амплитудному признаку ( $A_d$  – при Аизм.  $\leq A_{\text{Этал}}$ ;  $A_n$  – при Аизм.  $> A_{\text{Этал}}$ );

- координата начала дефекта, мм, относительно точки начала сканирования;
- наибольшая глубина залегания дефекта  $Y_{max}$ , мм
- условная протяженность  $D_l$ , мм

При проведении ультразвукового контроля сварных соединений настройка чувствительности дефектоскопа проводится по максимально допустимым значениям эквивалентной площади с введением поправок чувствительности [13].

Согласно действующим нормативным документам для магистральных трубопроводов браковочные показатели по УЗК соответствуют, указанным в таблицах 17, 18:

Таблица 17 – Эквивалентная площадь дефекта (зарубка)

Нормативный документ	Эквивалентная площадь дефекта (зарубка)
РД-25.160.10-КТН-016-15	2,0x1,0
СТО Газпром 2-2.4-083-2006	2,0x1,5
ВСН 012-88	2,0x1,5

Таблица 18 – Условная протяженность одиночного непротяженного дефекта

Нормативный документ	Условную протяженность одиночного непротяженного дефекта, не более. мм
РД-25.160.10-КТН-016-15	7
СТО Газпром 2-2.4-083-2006	12,5
ВСН 012-88	10

Условную протяженность дефекта измеряют по перемещению искателя вдоль шва от момента появления до момента исчезновения сигнала на экране дефектоскопа.

К непротяженным относят дефекты, условная протяженность которых, не превышает значений, согласно действующим нормативным, указанным в таблице 18. К этим дефектам относятся одиночные удлиненные неметаллические включения и поры, непровары (несплавления), трещины, коррозионные повреждения [3], [32], [36].

### **2.5.3 Методика проведения радиографического контроля**

Радиографический контроль (РК) проводится для выявления внутренних и выходящих на поверхность дефектов и оценки их допустимости в соответствии с нормативными документами [2], [9].

При радиографическом контроле выявляются следующие дефекты [35]:

- трещины,
- непровары,
- поры,
- шлаковые включения,
- вольфрамовые включения,
- окисные включения,
- вогнутость корня шва,
- выпуклость корня шва,
- подрезы,
- смещения кромок.

Радиографический контроль сварных соединений проводится согласно ГОСТ 7512-82 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод.

Радиографические снимки получаем путём просвечивания сварного соединения с закреплённой на нём рентгеновской плёнкой источником излучения. Эскиз контролируемого сварного соединения и схема панорамного просвечивания изнутри трубы представлены на рисунках 14, 15.

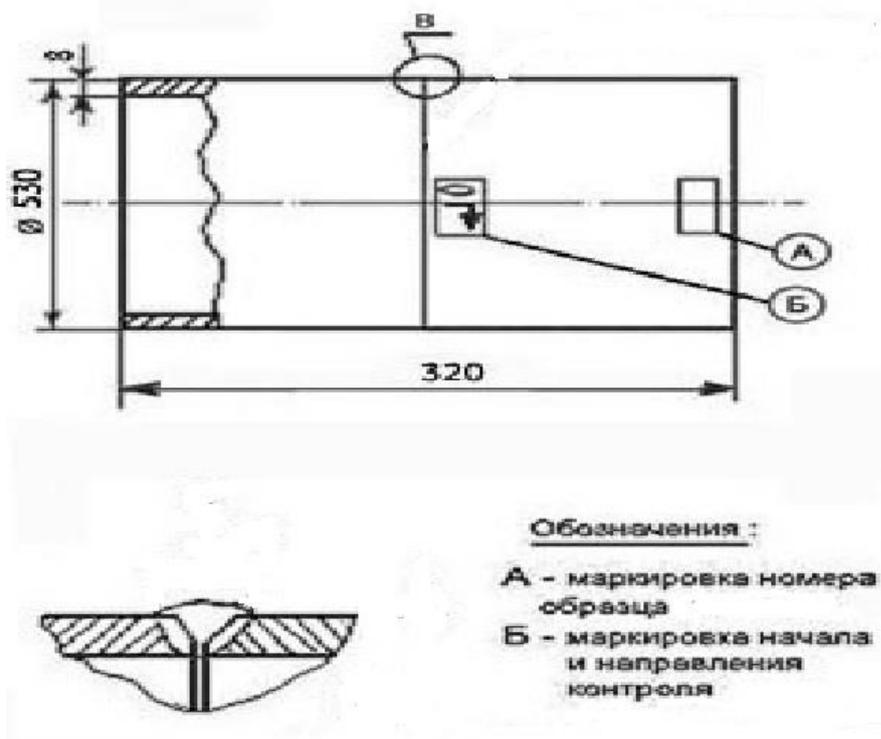
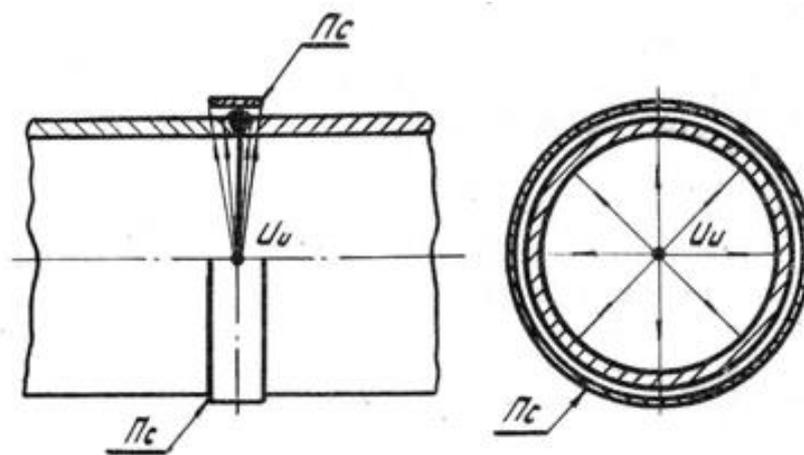


Рисунок 14 – Эскиз контролируемого сварного соединения



Ии – источники излучения, расположенные изнутри;  
 Пс – пленки (пластины), расположенные снаружи

Рисунок 15 – Схема панорамного просвечивания изнутри трубы:

В качестве источника ионизирующего излучения будем применять рентгеновский аппарат постоянного тока «RAYCRAFT GP-200».

В качестве детектора ионизирующего излучения рулонная радиографическая техническая плёнка со свинцовыми экранами РТ-7Т-Рб (рисунок 16).



Рисунок 16 – Рулонная радиографическая техническая плёнка со свинцовыми экранами РТ-7Т-Рб

Для привязки снимков к сварному соединению на сварное соединение должны быть установлены свинцовые маркировочные знаки.

«Для оценки высоты дефекта по его потемнению на радиографическом снимке методом визуального или инструментального сравнения с эталонными канавками или отверстиями используют канавочные эталоны чувствительности или имитаторы» [9], которые устанавливаются на сварное соединение при проведении РК.

После проведения просвечивания, рентгенографические плёнки подлежат фотообработке с помощью реактивов и последующей сушке.

Расшифровку, полученных рентгеновских снимков следует проводить в специально предназначенном для этой цели затемненном помещении, используя негатоскоп с плавно регулируемой яркостью.

«При просмотре снимков в процессе идентификации включений допускается применять лупы с рукояткой 7 - кратного увеличения, а при измерениях размеров включений – измерительную лупу 10-кратного увеличения ЛИ-3 с измерительной шкалой.

Глубина дефекта (размер дефекта в направлении просвечивания) оценивается путём сравнения оптической плотности изображения дефекта с оптической плотностью изображения соответствующей канавки эталона чувствительности» [9].

Размеры дефектов указываются в миллиметрах:

- для сферических пор, шлаковых и вольфрамовых включений - диаметр;
- для удлиненных пор, шлаковых и вольфрамовых включений - ширина и длина (через знак умножения);
- для цепочек, скоплений, окисных включений, непроваров и трещин – длина [9].

Критерии оценки допустимости дефектов по действующим НД [3], [32], [36], выявляемых по результатам РК, приведены в таблице 19:

Таблица 19 – Нормы дефектов по РК

Нормативный документ	Пункт НД содержащий нормы оценки
РД 25.160.00-КТН-016-15	п.11.1.13, табл. 11.8
СТО Газпром 2-2.2-083-2006	табл.2
ВСН 012-88	п.5.90, табл.14

## 2.5.4 Методика механических испытаний

### 2.5.4.1 Схема вырезки образцов

Вырезку образцов для проведения механических испытаний выполнять согласно схемы, приведенной на рисунке 17 и таблицы 20:

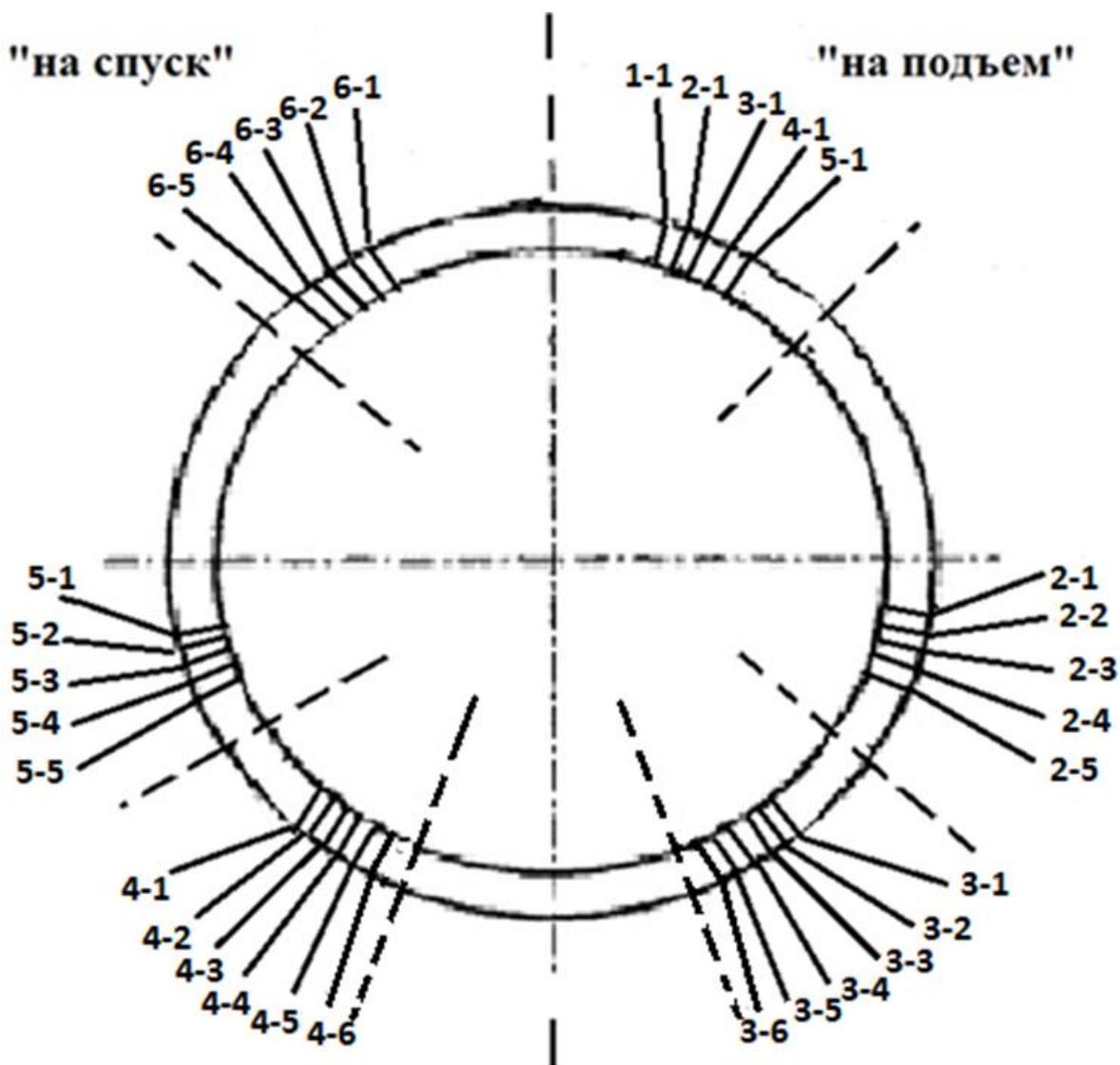


Рисунок 17 – Схема вырезки образцов

Таблица 20 – Маркировка образцов для проведения механических испытаний

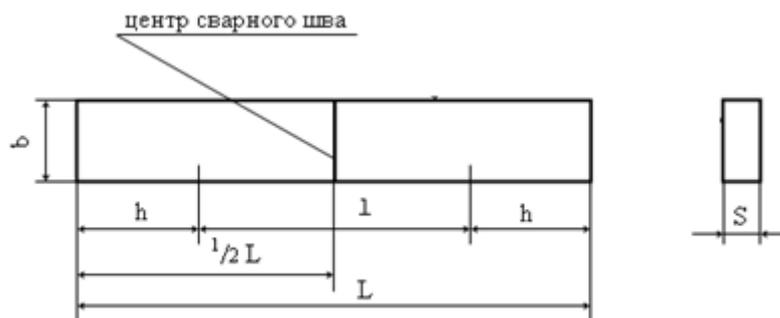
Вид испытания образцов	Вариант 1- «на подъем» с использованием электродов марки Nittetsu L-60LT	Вариант 2- «на спуск» с использованием электродов марки BOHLER FOX BVD 90
Образец для испытания на статическое растяжение	1-1 2-1 3-1	4-1 5-1 6-1
Образец для испытания на статический изгиб (корнем внутрь)	1-2 2-2 3-2	4-2 5-2 6-2
Образец для исследования химического анализа	1-3 2-3 3-3	4-3 5-3 6-3
Образец для испытания на ударный изгиб по центру сварного шва	1-4 2-4 3-4	4-4 5-4 6-4
Образец для испытания на ударный изгиб в ЗТВ (Л.С.+2 мм)	1-5 2-5 3-5	4-5 5-5 6-5
Образец для проведения металлографического исследования микроструктуры	3-6	4-6

### 2.5.2.2 Методика испытаний на статическое растяжение

Механические испытания на статическое растяжение проводить по ГОСТ 6996-66 Сварные соединения. Методы определения механических свойств.

При испытании сварного соединения на статическое растяжение определяют временное сопротивление наиболее слабого участка и место разрушения образца (по металлу шва, по металлу околошовной зоны, по основному металлу).

Испытания проводить на образцах, толщина которых равны толщине основного металла сварного соединения. Форма образцов для испытаний сварного соединения на статическое растяжение [8] представлена на рисунке 18, размеры образцов для испытаний на статическое растяжение указаны в таблице 21.



« $b$  – ширина рабочей части образца;  $h$  – длина захватной части образца;  $l$  – длина рабочей части образца;  $L$  – общая длина образца;  $S$  – ширина образца

Рисунок 18 – Форма образцов для испытаний сварного соединения на статическое растяжение

Таблица 21 – Размеры образцов для испытаний на статическое растяжение

Толщина стенки трубы, мм	Толщина образца, мм	Ширина рабочей части образца, $b$ , мм	Ширина захватной части образца, $b_1$ , мм	Длина рабочей части образца, $l$ , мм	Общая длина образца, $L$ , мм
8	Равна толщине стенки трубы	$20 \pm 0,5$	30	60	$l+2h$

Усиление шва на образцах должно быть снято механическим способом до уровня основного металла, при этом допускается удалять основной металл по всей поверхности образца на глубину до 15 % от толщины стенки трубы» [8]. Удаление основного металла с поверхности образца производят только с той стороны, с которой снимают усиление шва. Строгать усиление следует поперек шва [36].

«Скорость нагружения образцов в процессе испытаний должна составлять не более 15 мм/мин» [8].

Испытания на статическое растяжение проводить на разрывной машине РМ-50 (рисунок 19), предназначенной для статических испытаний образцов сварных соединений толщиной от 2 до 25 мм на статическое растяжение и статический изгиб.

Принцип работы разрывной машины РМ-50 заключается в деформации испытуемых образцов с помощью гидравлического привода и измерения нагрузки по давлению в рабочих цилиндрах путем уравнивания давления силой упругой деформации стержня (торсиона).



Рисунок 19 – Разрывная машина РМ-50

«Временное сопротивление (предел прочности) определяется по формуле (4):

$$\sigma = P_{\max}/S_0, \quad (4)$$

где  $P_{\max}$ -максимальная нагрузка, предшествующая разрушению, кН  
 $S_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца, мм<sup>2</sup>» [8].

Временное сопротивление разрыву, определяемое на плоских образцах со снятым усилением, должно быть не ниже нормативного значения временного сопротивления разрыву основного металла труб, установленного нормативной документацией на сварные соединения из определенного группы прочности материалов труб [8].

#### **2.5.4.3 Методика исследования на статический изгиб**

При испытаниях стыковых соединений труб на статический изгиб определяют способность сварных соединений принимать заданный по размеру и форме изгиб. Эта способность характеризуется углом изгиба  $\alpha$ , при котором в растянутой зоне образца появляется первая трещина, развивающаяся в процессе испытаний. Определяется также место образования трещины или разрушения (металл шва, металл околошовной зоны или основной металл) [8].

Форма и размеры образца для испытания на изгиб должны соответствовать рисунку 20 и таблице 22. «Толщина образца должна быть равной толщине основного металла.



$b$  – ширина образца;  $L$  – общая длина образца;  $S$  – толщина основного металла

Рисунок 20 – Форма образцов для испытаний на статический изгиб тип XXVII

Таблица 22 – Размеры образцов для испытаний на статический изгиб тип XXVII

Вид изгиба	Толщина основного металла, мм	Ширина образца, мм	Общая длина образца, мм	Расстояние между опорами, мм
Корнем шва наружу или внутрь	8	12	$2,5D+80$	$2,5D$
Примечание – $D$ – диаметр нагружающей оправки, мм				

Усиление шва по обеим сторонам образца снимается механическим способом до уровня основного металла» [8]. Разрешается строгать усиление шва в любом направлении с последующим удалением рисок.

Схема испытаний представлена на рисунке 21:

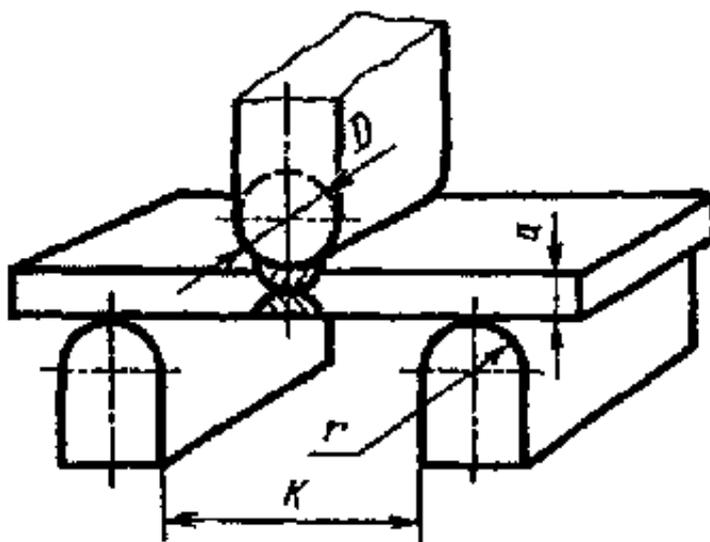


Рисунок 21 – Схема испытаний на статический изгиб

«Расстояние между опорами  $K$  должно быть равно 2,52 (для образцов типа XXVII).

Диаметр оправки  $D$  оправки должен быть равным двум толщинам основного металла. Радиус закругления опоры  $r = 25$  мм.

Испытания проводят со скоростью не более 15 мм/мин при плавном возрастании нагрузки с помощью разрывной машины РМ-50 с использованием опорных роликов» [8]. Общий вид разрывной машины с установленным образцом представлен на рисунке 22.

Для проведения испытаний из каждого технологического варианта изготовить по 3 образца согласно ранее представленной схеме. С целью анализа пластичности заполняющего и облицовочного слоёв шва, испытания на статический изгиб выполнять корнем внутрь.

«Испытания проводят до достижения нормируемого угла изгиба ( $120^\circ$ ) или угла изгиба, при котором образуется первая являющаяся браковочным признаком трещина. Угол изгиба при испытании до образования первой трещины измеряют в ненапряженном состоянии с погрешностью  $\pm 2^\circ$ .



Рисунок – 22 Общий вид разрывной машины с установленным образцом

Если длина трещин, возникающих в растянутой зоне образца в процессе испытания, не превышает 20 % его ширины, но не более 5 мм, то такие трещины не являются браковочным признаком» [8].

Среднее арифметическое значение угла изгиба образцов должно быть не менее  $120^\circ$ , а минимальное значение угла изгиба одного образца должно быть не ниже  $100^\circ$  [8].

#### **2.5.4.4 Методика исследования на ударный изгиб**

При испытании на ударный изгиб определяют энергию удара и ударную вязкость металла шва на образцах с острым надрезом (Шарпи) по ГОСТ 6996.

«Вырезку и изготовление образцов (рисунок 23) следует производить таким образом, чтобы одна из чистовых поверхностей каждого образца (после окончательной обработки) располагалась на расстоянии от 2 до 3 мм от внутренней поверхности трубы» [8].

Разметку для нанесения надреза производят по макрошлифам, расположенным на гранях образца или заготовки для образцов.

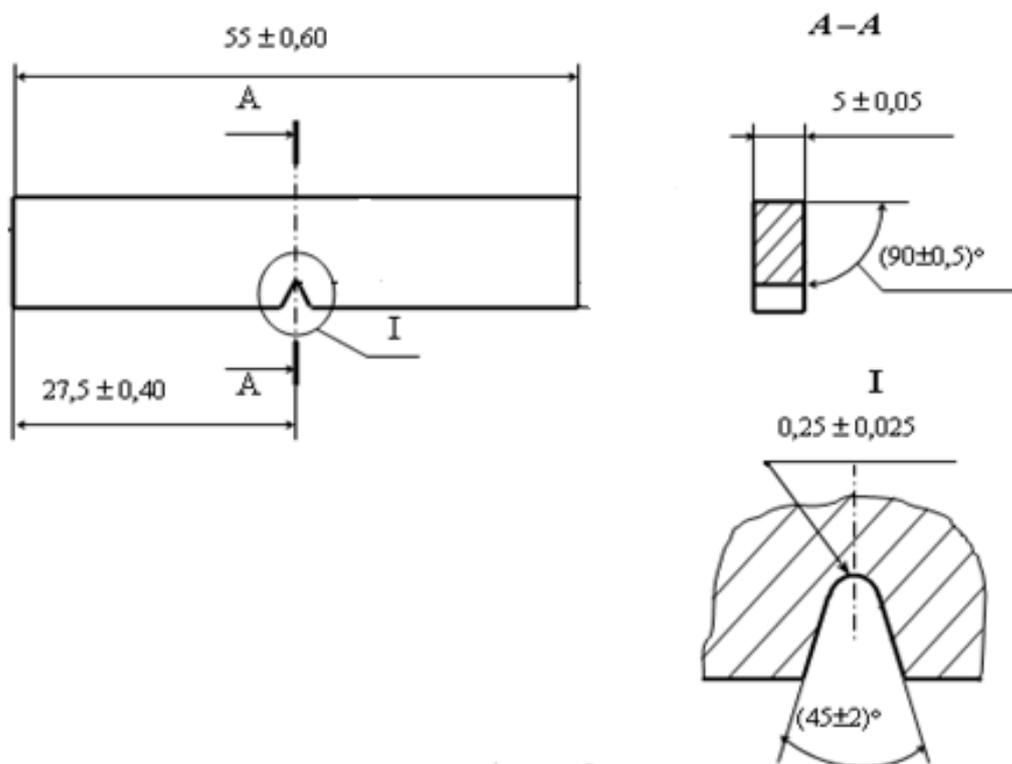


Рисунок 23 – Форма и размеры образцов для испытаний на ударный изгиб

Выполнение V-образного концентратора на подготовленных образцах выполнять с помощью ручного протяжного станка НШ-1 (рисунок 24).

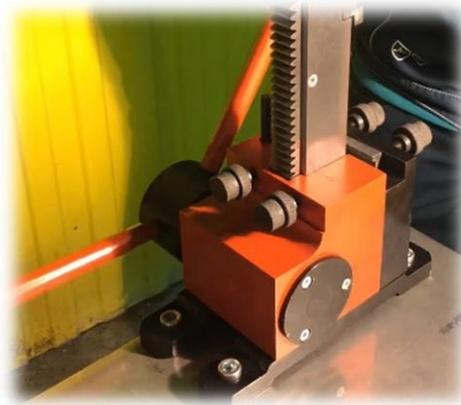


Рисунок 24 – Ручной протяжный станок НШ-1

Температура окружающей среды и, соответственно, самого металла, оказывает существенное влияние на его сопротивление хрупкому разрушению [43]. В процессе проведения исследований будем проводить испытания на ударный изгиб при температуре  $-40^{\circ}\text{C}$  [8].

Для охлаждения испытываемых образцов до температуры  $-40^{\circ}\text{C}$  использовать климатическую камеру СМ-60/100-80 ТХ (рисунок 25), позволяющую производить охлаждение или нагрев образцов при температурах от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+100^{\circ}\text{C}$ .



Рисунок 25 – Климатическая камера СМ-60/100-80 ТХ

Испытания образцов сварных соединений проводить на маятниковом копре МК-30, который «оценивает работу разрушения образца с концентратором (надрезом) при ударном изгибе в результате воздействия маятника» (рисунок 26) [8].

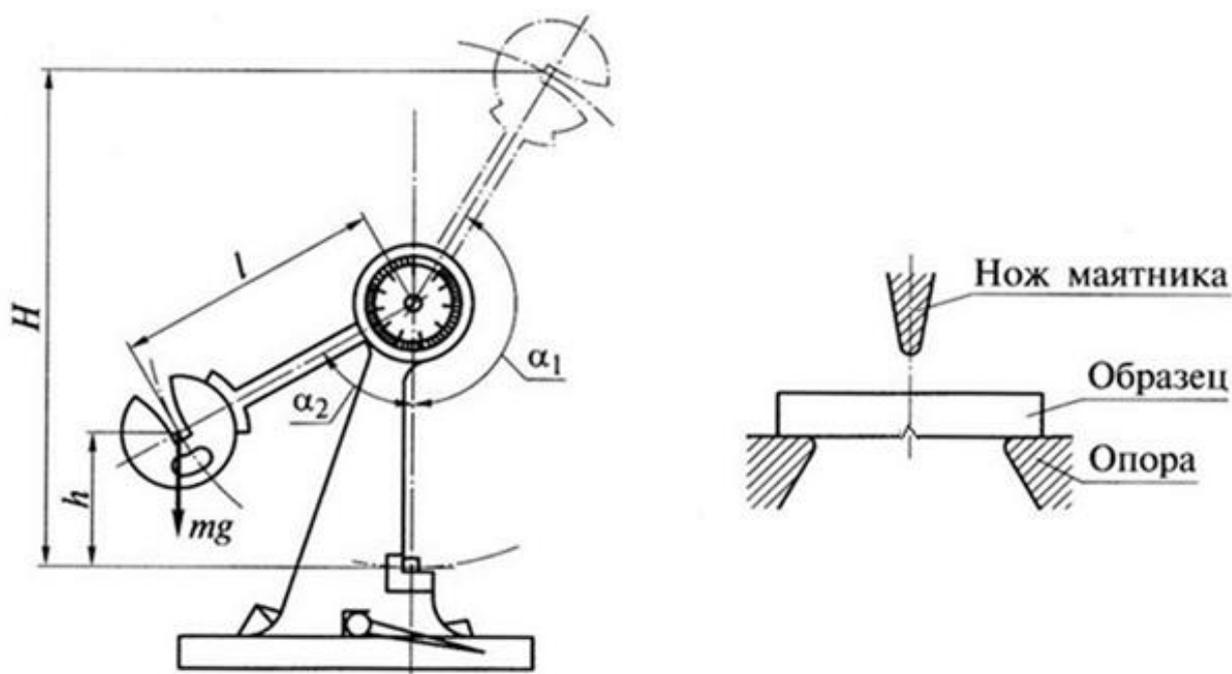


Рисунок 26 – Схема испытаний на ударную вязкость

Испытания основано на принципе измерения энергии, затраченной на разрушение образца (рисунок 24). «Образец устанавливают на опорах копра и наносят удар по стороне образца, противоположной надрезу» [8]. Работа, затраченная на разрушение образца, определяется по формуле (5):

$$K = P \cdot g \cdot (H - h) = P \cdot g \cdot l \cdot (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1), \quad (5)$$

где  $P$  - масса маятника;

$g$  - ускорение силы тяжести;

$H, h$  - высота подъема маятника до удара и после разрушения образца;

$l$  - длина маятника;

$\alpha_2, \alpha_1$  - углы подъема маятника до удара и после разрушения образца» [8].

Ударная вязкость, способность металла оказывать сопротивление быстро возрастающим (ударным) внешним силам [43], определяется по формуле (6):

$$KCV=K/S, \quad (6)$$

где  $K$  – работа удара, затраченная на пластическую деформацию и разрушение образца;

$S$  – площадь поперечного сечения образца в месте надреза до испытания.

Ударную вязкость определять как среднее арифметическое по результатам испытаний трёх образцов с каждой зоны расположения надреза (концентратора):

- по оси шва,
- по линии сплавления + 2 мм.

Требования по ударной вязкости сварных соединений магистральных трубопроводов согласно НД приведены в таблице 23:

Таблица 23 – Ударная вязкость сварных соединений магистральных трубопроводов согласно нормативных документов

Нормативный документ	KCV по центру шва, Дж/см <sup>2</sup>		KCV по ЗТВ (линия сплавления +2 мм), Дж/см <sup>2</sup>	
	среднее	минимальное	среднее	минимальное
РД-25.160.00-КТН-037-14	34	25	62	57
СТО Газпром 2-2.2-136-2007	50	37,5	50	37,5

#### 2.5.4.5 Металлографическое исследование микроструктуры

Целью проведения металлографического исследования микроструктуры является изучение структуры различных зон сварного соединения: металла шва, зоны термического влияния и основного металла, не находившегося под термическим воздействием сварки. Для проведения исследований необходимо изготовить по одному шлифу из каждого контрольного сварного соединения, выполненных по разным технологическим вариантам.

«Подготовку микрошлифов выполнять по следующей методике:

- с помощью плазменной резки, вырезаем участок сварного шва с припуском на механическую обработку, согласно схемы вырезки;
- выполнить механическую обработку одной из поверхности на фрезерном станке со снятием слоя толщиной не менее 2 мм;
- обработать шлифовальным кругом на станке с обязательным охлаждением эмульсией, а затем шлифовальной шкуркой и алмазными пастами в несколько проходов, с последовательным переходом от крупнозернистого к мелкозернистому абразивному материалу; при этом обязательно должно меняться направление шлифования на 90°, применяться охлаждение во избежание прижога поверхности шлифа;
- при смене номера абразивного материала микрошлиф должен быть тщательно промыт, чтобы исключить возможность загрязнения мелкозернистого материала частицами предыдущего, более крупного абразива;
- для обработки микрошлифа должны использоваться шлифовальные круги зернистостью 180-220 по ГОСТ 3647-71, шлифовальная шкурка зернистостью 5;4;3 M20, M14 и алмазные пасты зернистостью АСм 14/10 НОМ; АСм 7/5 НОМ; АСм 3/2 НОМ по ГОСТ 16877-71;
- шлифование абразивным материалом каждого номера должно быть завершено, если удалены все гребешки и риски от обработки предыдущим, более крупнозернистым материалом;

- после завершения шлифования контролируемая поверхность микрошлифа обязательно полируется; полирование должно производиться на плотном, хорошего качества сукне, которое туго натягивается на горизонтальный диск станка и пропитывается полирующей суспензией» [14];
- полировка контролируемой поверхности микрошлифа считается завершённой при получении зеркальной поверхности без рисок и забоин, обнаруживаемых под лупой при увеличении в 25 крат;
- для удаления полирующей суспензии и ворса от сукна, обработанную поверхность микрошлифа промывают водой, а затем тщательно протирают чистым ватным тампоном, пропитанным спиртом, и просушивают;
- «травление микрошлифа проводить химическим способом в соответствующем реактиве методом протирки поверхности ватным тампоном, пропитанным в реактиве, до четкого выявления микроструктуры металла шва, зоны термического влияния и основного металла» [14].

Исследование микрошлифов производится с помощью металлографического микроскопа МИМ-7 (рисунок 27) при увеличении (100 - 500) крат.

Микроскоп металлографический вертикальный МИМ-7 служит для наблюдения и фотографирования микроструктуры металлов в обыкновенном, светлом и тёмном поле. Набор объективов и окуляров металлографического микроскопа МИМ-7 обеспечивает увеличение от 60 до 1440 при визуальном наблюдении и от 70 до 1350 при фотографировании. В качестве источника света использована кинопроекторная лампа К-30 17 в, 170 Вт.3.6.



Рисунок 27 – Микроскоп МИМ-7

#### **2.5.4.6 Методика исследования химического анализа сварных швов**

Сварные соединения из углеродистых сталей обычно подвергают химическому анализу на углерод, марганец и кремний. Кроме того, устанавливают содержание таких вредных примесей, как сера и фосфор. В отдельных случаях, особенно при разработке новой технологии сварки, проводят химический анализ металла шва на содержание газов — азота, кислорода и водорода. Для сварных соединений из легированных и высоколегированных сталей выполняют дополнительный анализ на содержание легирующих элементов.

Для проведения исследований необходимо подготовить по 3 образца из каждого технологического варианта. Вырезку образцов осуществлять с помощью плазменной резки с припуском на механическую обработку согласно ранее представленной схеме (рисунок 20). После выполнения резки, зашлифовать поверхности реза с помощью шлифмашинки с абразивным кругом на глубину не менее 1 мм, при этом не допускать перегрева металла с образованием цветов побежалости [10].

С целью сравнения металла шва, выполняемого разными электродами выполнять химический анализ с поверхности облицовочного слоя каждого варианта.

Испытания проводить на искровом спектрометре «Искролайн 100» (рисунок 28). Настольный искровой спектрометр «Искролайн 100» — это современный экспресс анализатор состава металлов и сплавов. В основу работы прибора положен метод эмиссионного спектрального анализа, использующий зависимость интенсивности спектральных линий от содержания элемента в пробе.



Рисунок 28 – Искровой спектрометр «Искролайн 100»

Основное назначение прибора — это точный и быстрый анализ токопроводящих проб с различными основами (Fe, Al, Cu, Zn, Pb, Sn, Ni, Ti, Co, Mg и др). Данный спектральный анализатор предназначен для количественного анализа состава как цветных металлов, так и чёрных металлов (чугунов, низколегированных, среднелегированных, многих высоколегированных сталей и др.) по большинству известных легирующих элементов и примесей, включая серу, фосфор и углерод.

### 3 Технология выполнения контрольных сварных соединений

#### 3.1 Подготовка кромок труб

Для выполнения контрольного сварного соединения были используются катушки из трубы  $\text{Ø}530 \times 8$  мм длиной 200 мм, отрезанные с помощью механизированной плазменной резки.

После выполнения резки необходимо выполнить разделку кромок согласно рисунка 29, при этом металл резанного торца должен быть удален на глубину не менее 1 мм [11]. Обработку кромок труб выполнять на токарном станке 1М63.

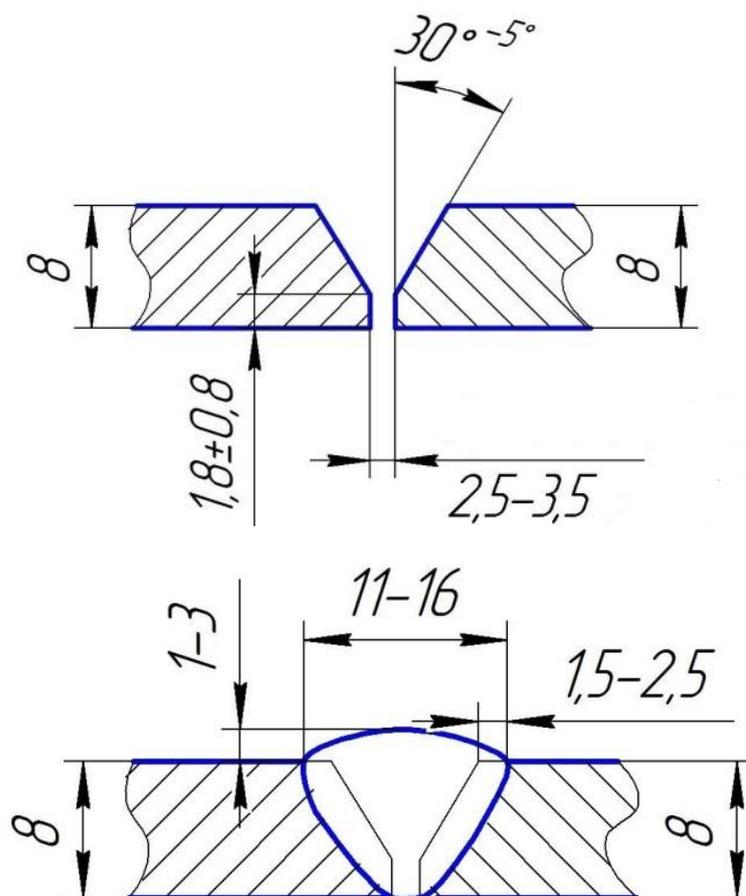


Рисунок 29 – Конструктивные элементы свариваемых кромок и размеры сварного шва

После выполнения кромок производится зачистка свариваемых кромок и прилегающих к ним наружных и внутренних поверхностей трубы на ширине не менее 15 мм с помощью шлифмашинки с дисковой проволочной щеткой (рисунок 30,31)



Рисунок 30 – Очистка кромок и концов труб

Усиление заводского продольного шва на трубе необходимо удалить с помощью шлифмашинки с абразивным кругом до величины  $0 \div 0,5$  мм на длине  $10 \div 15$  мм от торца катушки [11].



Рисунок 31 – Подготовленные кромки под сварку

### **3.2 Сборка контрольного сварного соединения**

Сборку контрольного сварного соединения выполнять с помощью наружного центратора соблюдая следующие параметры (рисунок 32,33):

- расстояние между заводскими продольными швами труб должно быть не менее 75 мм;
- зазор 2,0÷3,0 мм;
- наружное смещение кромок не более 1,6 мм (20% от номинальной толщины стенки трубы).



Рисунок 32 – Собранный стык с применением наружного центратора



Рисунок 33 – Измерение собранного стыка шаблоном сварщика УШС-3

### 3.3 Предварительный подогрев

После выполнения сборки необходимо выполнить предварительный подогрев свариваемых кромок с помощью кольцевого газового подогревателя до температуры  $T = +50^{\circ}\text{C} \div +80^{\circ}\text{C}$  (рисунок 34)

Контроль температуры выполнять с помощью бесконтактного термометра на расстоянии 60-75 мм от торца каждой катушки в 4-х точках, равномерно расположенных по периметру стыка.

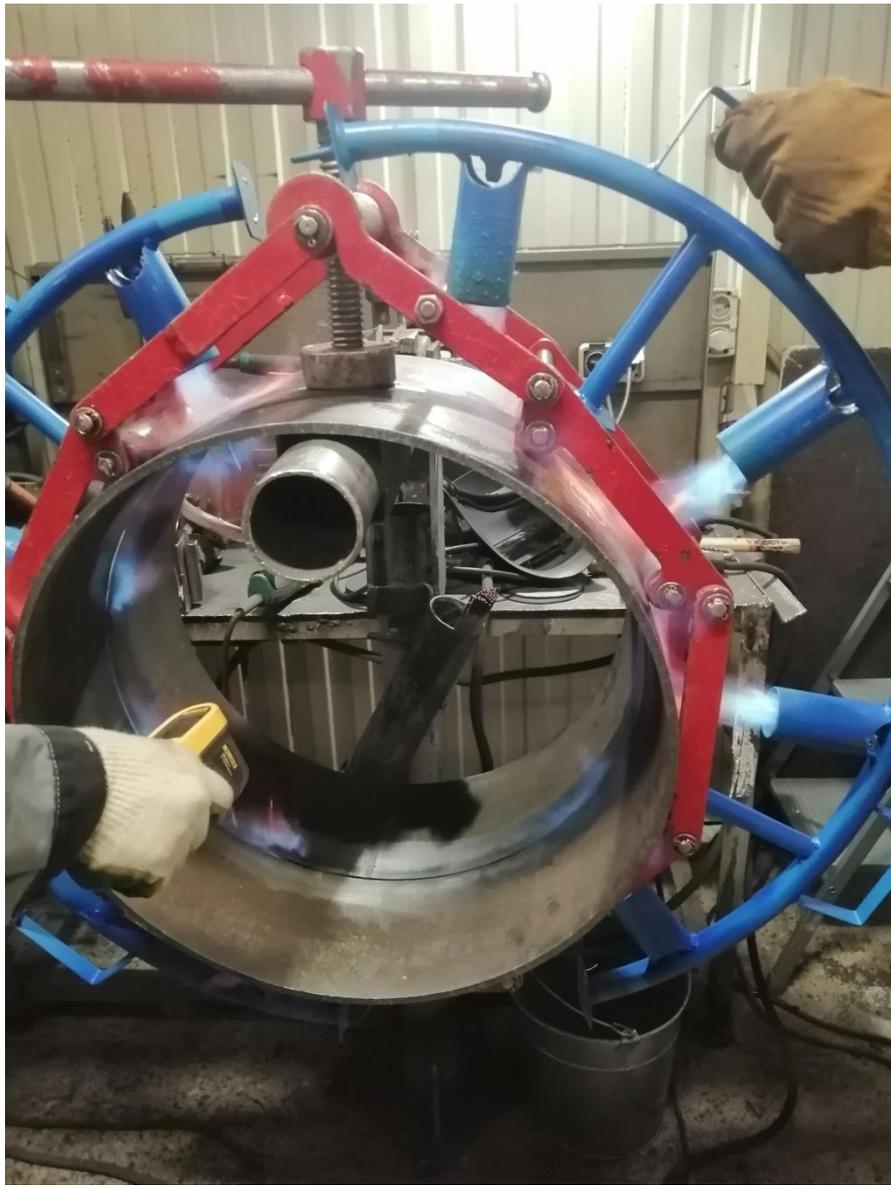


Рисунок 34 – Предварительный подогрев перед сваркой

### 3.4 Прихватка

Выполнить 4-е прихватки длиной  $60\div 100$  мм равномерно расположенных по периметру стыка. Прихватки выполнять одновременно двумя сварщиками.

Прихватки выполнять с помощью ручной дуговой сварки электродами марки Nittetsu 16W диаметром 2,6 мм методом «на подъем» на постоянном токе обратной полярности  $I_{св.} = 55\div 85$  А.

После сварки прихваток, зачистить их от шлака и брызг с помощью шлифмашинки с абразивным кругом (рисунок 35). Осмотреть прихватки на отсутствие дефектов (пор, трещин). Прихватки с дефектами должны быть удалены механическим способом (с помощью шлифмашинки) и выполнены вновь.

Начало и конец каждой прихватки зашлифовать с плавным переходом с цель сопряжения с последующими участками корневого слоя шва.



Рисунок 35 – Удаление прихваток с помощью шлифмашинки

## **3.5 Сварка**

### **3.5.1 Сварка корневого слоя шва**

Сварку корневого слоя шва выполнять с помощью ручной дуговой сварки электродами марки Nittetsu 16W диаметром 2,6 мм методом «на подъём» на постоянном токе обратной полярности  $I_{св.} = 55 \div 85$  А. В процессе сварки начало и конец каждого технологического участка (электрода) смещать на расстояние  $20 \div 30$  мм.

«Возбуждение дуги при сварке следует выполнять только на поверхности разделки свариваемых кромок или на ранее выполненном слое сварного шва. Запрещается зажигать дугу на поверхности металла труб» [31].

Сварку выполнять одновременно двумя сварщиками.

«Наружный центратор допускается удалять после выполнения не менее 60% периметра корневого слоя шва» [31].

После удаления центратора начало и конец каждого выполненного участка сварного шва зашлифовать с плавным переходом с целью сопряжения с последующими участками корневого слоя шва.

Выполнить оставшиеся участки корневого слоя шва.

После окончания сварки зачистить корневой слой снаружи трубы от шлака и брызг, зашлифовать замки [31, 35].

### **3.5.2 Сварка заполняющих и облицовочных слоёв шва**

Сварку выполнять одновременно двумя сварщиками на разных полупериметрах стыка по двум технологическим вариантам (рисунок 36):

- вариант 1 - сварка электродами с основным видом покрытия методом «на подъём»;
- вариант 2 - сварка электродами с основным видом покрытия методом «на спуск».

### **3.5.2.1 Сварка заполняющих и облицовочного слоёв шва вариант 1**

Перед началом сварки каждого слоя необходимо выполнять замер температуры свариваемых кромок на расстоянии 60-75 мм от торцов не менее чем в 4-х точках, равномерно расположенных по периметру стыка. Межслойная температура должна быть в интервале от +50°C до +250°C.

При снижении межслойной температуры ниже требуемого значения необходимо выполнять сопутствующий подогрев однопламенной газовой горелкой до температуры +100°C ÷ +130°C.

Сварку выполнять с помощью ручной дуговой сварки электродами марки Nittetsu L-60LT диаметром 3,2 мм методом «на подъём» на постоянном токе обратной полярности  $I_{св.} = 90 \div 130$  А. В процессе сварки начало и конец каждого технологического участка (электрода) смещать на расстояние 20 ÷ 30 мм.

Сварку выполнять короткой дугой (длина дуги 0,5 ÷ 1 диаметра электрода) с поперечными колебаниями.

«Возбуждение дуги при сварке следует выполнять только на поверхности разделки свариваемых кромок или на ранее выполненном слое сварного шва. Запрещается зажигать дугу на поверхности металла труб» [31].

После выполнения сварки каждого слоя выполнять зачистку шва от шлака и брызг, зашлифовывать замки с помощью шлифмашинки с дисковой щеткой и абразивным кругом.

В положении 12 ÷ 16 часов заполняющий слой заканчивать ниже кромок разделки на 0,5-1,0 мм, в положении 16 ÷ 18 часов заполняющий слой заканчивать ниже кромок разделки на 1,0-1,5 мм [31, 35].

Параметры облицовочного слоя должны соответствовать рисунку 29.

### **3.5.2.2 Сварка заполняющих и облицовочного слоёв шва вариант 2**

Перед началом сварки каждого слоя необходимо выполнять замер температуры свариваемых кромок на расстоянии 60-75 мм от торцов не

менее чем в 4-х точках, равномерно расположенных по периметру стыка. Межслойная температура должна быть в интервале от +100°C до +250°C.

При снижении межслойной температуры ниже требуемого значения необходимо выполнять сопутствующий подогрев однопламенной газовой горелкой до температуры +100°C ÷ +130°C.

Сварку выполнять с помощью ручной дуговой сварки электродами марки BÖHLER FOX BVD 90 диаметром 3,2 мм методом «на спуск» на постоянном токе обратной полярности  $I_{св.} = 100 \div 160$  А. В процессе сварки начало и конец каждого технологического участка (электрода) смещать на расстояние 20 ÷ 30 мм

«Возбуждение дуги при сварке следует выполнять только на поверхности разделки свариваемых кромок или на ранее выполненном слое сварного шва. Запрещается зажигать дугу на поверхности металла труб» [31].

После зажигания дуги электрод плавно перемещается вниз, избегая подъема дуги или возвратного движения.

При гашении дуги электрод должен плавно двигаться вниз по касательной к поверхности трубы и плавно подниматься; резкий отрыв электрода приводит к образованию глубокого конечного кратера (требуется вышлифовка).

Электрод можно зажигать только один раз, возобновление дуги не допускается.

Сварку выполнять короткой дугой, не опираясь на кромки, оптимальная длина дуги 3 мм.

Угол наклона электрода: 80° ÷ 90° в положении 12 ÷ 13 часов и 17 ÷ 18 часов, 60° ÷ 70° в положениях 13 ÷ 17 часов.



Рисунок 36 – Выполнение заполняющего слоя шва «на спуск» и «на подъем»

Сварку заполняющего слоя рекомендуется выполнять за один проход с поперечными колебаниями амплитудой до 2-х диаметров электрода. В положении 12÷13 и 17÷18 часов заполняющий слой заканчивать ниже

кромки разделки на 1,0-1,5 мм, в положении 13÷17 часов заполнение выводить заподлицо с кромками;

Облицовочный слой выполнять с поперечными колебаниями за один проход с перекрытием кромок на 1,5÷2,5 мм[31,35]. Параметры облицовочного слоя должны соответствовать рисунку 29.

После окончания сварки зачистить облицовочный слой и околошовную зону с каждой стороны шва шириной не менее 20 мм от шлака и брызг расплавленного металла с помощью шлифмашинки с дисковой проволочной щеткой. При необходимости, удалить брызги с помощью молотка и зубила или напильника. Сварные швы, полученные ручной дуговой сваркой покрытыми электродами при исследовании представлены на рисунке 37 а,б.



а)

б)

а) Вариант 1- «на подъем» с использованием электродов марки Nittetsu L-60LT

б) Вариант 2- «на спуск» с использованием электродов марки BOHLER FOX BVD 90

Рисунок 37 - Сварные швы, полученные РДС покрытым электродом при исследовании

## 4 Анализ технологических вариантов выполнения ручной дуговой сварки

### 4.1 Результаты контроля качества сварных соединений

#### 4.1.1 Визуально-измерительный контроль

При проведении визуального и измерительного контроля были получены результаты, представленные в таблице 24:

Таблица 24 – Результаты ВИК

Показатель	Вариант 1- «на подъем» с использованием электродов марки Nittetsu L-60LT	Вариант 2- «на спуск» с использованием электродов марки BOHLER FOX BVD 90
Ширина шва, e (мм)	12÷14	12÷15
Высота усиления, g (мм)	1,5÷2,5	1,0÷2,5
Обнаруженные дефекты	Не обнаружено	Не обнаружено
Заключение	годен	годен

По результатам ВИК сварные соединения по обоим технологическим вариантам признаны годными и переданы на последующий ультразвуковой контроль.

#### 4.1.2 Ультразвуковой контроль

При проведении ультразвукового контроля (рисунок 38) в контрольных сварных соединениях, выполненных по двум технологическим вариантам недопустимых дефектов, согласно требованиям нормативных документов [3,32,36], не выявлено. Результаты представлены в таблице 25:



Рисунок 38 – Ультразвуковой контроль контрольного сварного соединения

Таблица 25 – Результаты ультразвукового контроля

НД	Вариант 1- «на подъем» с использованием электродов марки Nittetsu L-60LT		Вариант 2- «на спуск» с использованием электродов марки BOHLER FOX BVD 90	
	Обнаруженные дефекты	Заключение	Обнаруженные дефекты	Заключение
РД-25.160.10-КТН- 016-15	Дефектов не обнаружено	Годен	Дефектов не обнаружено	Годен
СТО Газпром 2-2.4- 083-2006	Дефектов не обнаружено	Годен	Дефектов не обнаружено	Годен
ВСН 012-88	Дефектов не обнаружено	Годен	Дефектов не обнаружено	Годен

### 4.1.3 Рентгенографический контроль

По результатам рентгенографического контроля сварные соединения, выполненные по двум технологическим вариантам, согласно требованиям нормативных документов признаны годными [3,32,36], результаты представлены в таблице 26. Фотографии участков рентгенографического снимка представлены на рисунке 39:

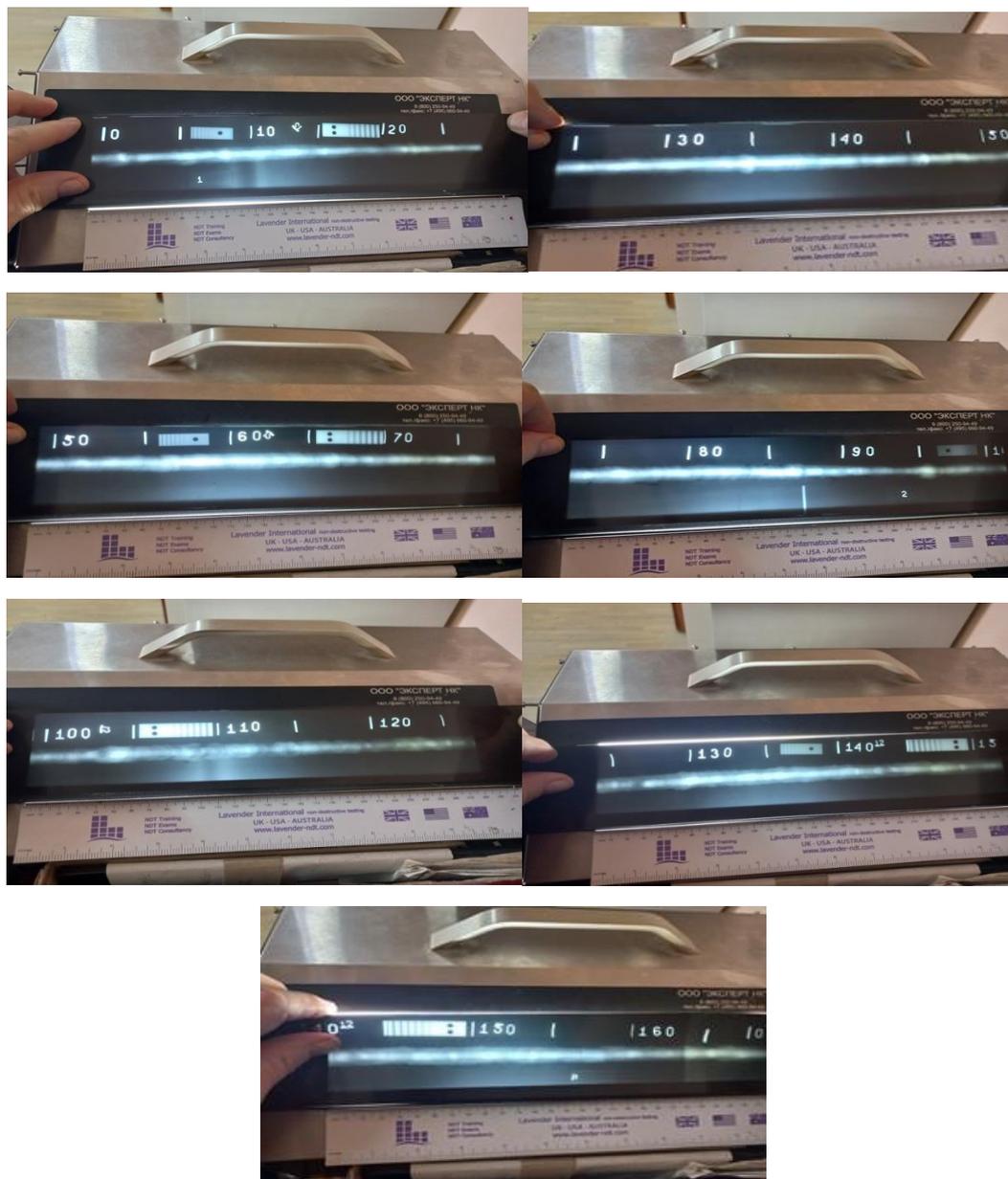


Рисунок 39 – Фотографии участков рентгенографического снимка КСС

Таблица 26 – Результаты рентгенографического контроля

НД	Вариант 1- «на подъем» с использованием электродов марки Nittetsu L-60LT		Вариант 2- «на спуск» с использованием электродов марки BOHLER FOX BVD 90	
	Обнаруженные дефекты	Заключение	Обнаруженны е дефекты	Заключение
РД-25.160.10-КТН- 016-15	Дефектов не обнаружено	Годен	Дефектов не обнаружено	Годен
СТО Газпром 2-2.4- 083-2006	Дефектов не обнаружено	Годен	Дефектов не обнаружено	Годен
ВСН 012-88	Дефектов не обнаружено	Годен	Дефектов не обнаружено	Годен

#### 4.1.4 Испытание сварных соединений на статическое растяжение

В процессе выполнения работы, согласно схемы вырезки, были изготовлены 6 образцов для испытаний на статическое растяжение (рисунок 40).



Рисунок 40 – Образцы для проведения испытаний на статическое растяжение

Результаты испытаний образцов из контрольных сварных соединений на статическое растяжение представлены в таблице 27 и рисунке 41.

Общий вид образцов после проведения испытаний показан на рисунках 42, 43.

Таблица 27 – Результаты испытаний на статическое растяжение

№ варианта	№ образца	$P_{max}$ , кН	$S$ , мм <sup>2</sup>	$\sigma_b$ , МПа	Минимальное нормативное значение по НД $\sigma_{b\text{ норм}}$ , МПа
Вариант 1- «на подъем» с использованием электродов марки Nittetsu L-60LT	1-1	90,6195	160	577,6	550
	2-1	89,9901	158,4	568,1	
	3-1	89,1031	160	567,9	
Вариант 2- «на спуск» с использованием электродов марки BOHLER FOX BVD 90	4-1	91,6972	163,6	571,6	
	5-1	90,1999	164	570,7	
	6-1	91,1822	161,6	575,3	

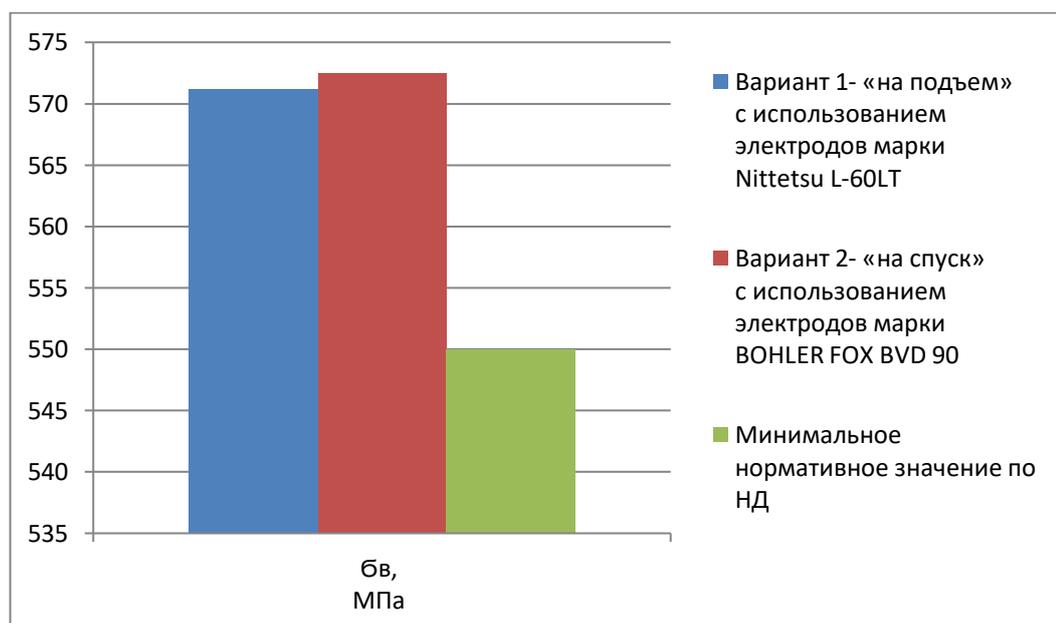


Рисунок 41 – Средние значения результатов испытаний на статическое растяжение



Вариант 1- «на подъем» с использованием электродов марки Nittetsu L-60LT

Рисунок 42 – Образцы после испытаний на статическое растяжение –



Вариант 2- «на спуск» с использованием электродов марки BOHLER FOX BVD 90

Рисунок 43 – Образцы после испытаний на статическое растяжение -

По результатам проведённых испытаний на статическое растяжение все образцы показали значения временного сопротивления не ниже минимально

допустимых значений согласно НД [31, 36]. Таким образом, результаты испытаний образцов из обоих технологических вариантов признаны положительными.

При этом стоит отметить, что разрыв сварных соединений произошёл по основному металлу, однако на разном удалении от сварного шва:

- у образцов, выполненных по варианту 1 - «на подъем» с использованием электродов марки Nittetsu L-60LT, разрыв произошёл рядом со швом в зоне термического влияния (рисунок 42);
- у образцов, выполненных по варианту 2 - «на спуск» с использованием электродов марки BOHLER FOX BVD 90, разрыв произошёл на расстоянии  $45 \div 70$  мм от шва (рисунок 43);

#### **4.1.5 Испытание сварных соединений на статический изгиб**

В процессе выполнения работы, согласно схемы вырезки, были изготовлены 6 образцов для испытаний на статический изгиб.

Результаты испытаний образцов из контрольных сварных соединений на статический изгиб представлены в таблице 28.

Общий вид образцов после проведения испытаний показан на рисунке 44, 45:



Рисунок 44 – Общий вид образцов после проведения испытаний

Таблица 28 – Результаты испытаний на статический изгиб

№ варианта	№ образца	Угол изгиба, град.	Среднее значение угла изгиба, град	Обнаруженные дефекты	Минимальное нормативное значение по НД $\sigma_{В\text{ норм}}$ , МПа
Вариант 1- «на подъем» с использованием электродов марки Nittetsu L-60LT	1-2	125	123	нет	Среднее арифметическое значение угла изгиба образцов должно быть не менее 120°, а минимальное значение угла изгиба одного образца должно быть не ниже 100°*
	2-2	123		нет	
	3-2	121		нет	
Вариант 2- «на спуск» с использованием электродов марки BOHLER FOX BVD 90	4-2	124	124	нет	
	5-2	126		нет	
	6-2	123		нет	

\* Если длина трещин, возникающих в растянутой зоне образца в процессе испытания, не превышает 20 % его ширины, но не более 5 мм, то такие трещины не являются браковочным признаком.



а)



б)

а) Вариант 1- «на подъем» с использованием электродов марки Nittetsu L-60LT

б) Вариант 2- «на спуск» с использованием электродов марки BOHLER FOX BVD 90

Рисунок 45 – Образцы после испытания на статический изгиб

По результатам проведённых испытаний на статический изгиб все образцы показали значения угла изгиба не ниже минимально допустимого согласно НД [31, 36]. Таким образом, результаты испытаний образцов из обоих технологических вариантов признаны положительными.

#### 4.1.6 Испытание сварных соединений на ударный изгиб

В процессе выполнения работы, согласно схемы (рисунок 17) вырезки, были изготовлены 12 образцов для испытаний на ударный изгиб (рисунок 46).

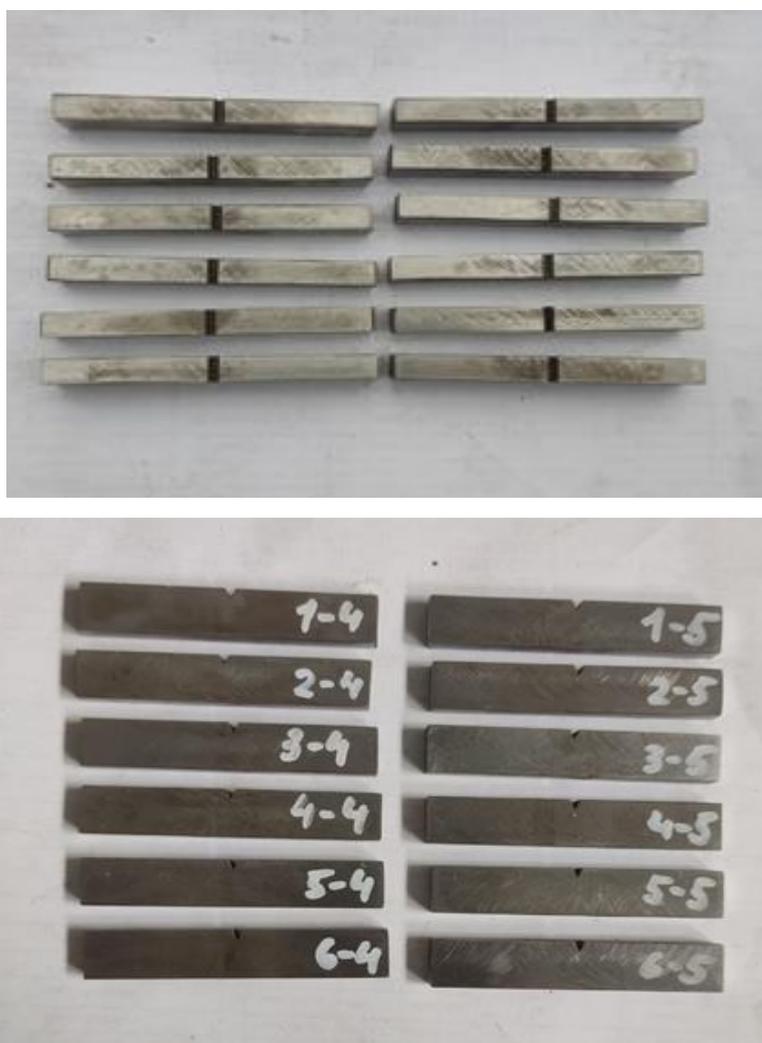


Рисунок 46 – Образцы для проведения испытания на ударный изгиб

Результаты испытаний образцов из контрольных сварных соединений на ударный изгиб представлены в таблицах 29, 30.

Общий вид образцов после проведения испытаний показан на рисунке 47.

Таблица 29 – Результаты испытаний образцов на ударный изгиб по центру шва

№ варианта	№ образца	К, Дж	KCV, Дж/см <sup>2</sup>	KCV <sub>ср</sub> , Дж/см <sup>2</sup>	Норма KCV, Дж/см <sup>2</sup>	
					среднее	минимальное
Вариант 1- «на подъем» с использованием электродов марки Nittetsu L-60LT	1-4	27,44	68,6	52,27	34 <sup>1)</sup> 50 <sup>2)</sup>	25 <sup>1)</sup> 37,5 <sup>2)</sup>
	2-4	17,64	44,1			
	3-4	17,64	44,1			
Вариант 2- «на спуск» с использованием электродов марки BOHLER FOX BVD 90	4-4	37,24	93,1	75,13	34 <sup>1)</sup> 50 <sup>2)</sup>	25 <sup>1)</sup> 37,5 <sup>2)</sup>
	5-4	23,52	58,8			
	6-4	29,4	73,5			
1) согласно РД-25.160.00-КТН-037-14						
2) согласно СТО Газпром 2-2.2-136-2007						

Таблица 30 – Результаты испытаний образцов на ударный изгиб по ЗТВ (линия сплавления + 2 мм)

№ варианта	№ образца	К, Дж	KCV, Дж/см <sup>2</sup>	KCV <sub>ср</sub> , Дж/см <sup>2</sup>	Норма KCV, Дж/см <sup>2</sup>	
					среднее	минимальное
Вариант 1- «на подъем» с использованием электродов марки Nittetsu L-60LT	1-5	76,44	191,1	187,83	62 <sup>1)</sup> 50 <sup>2)</sup>	57 <sup>1)</sup> 37,5 <sup>2)</sup>
	2-5	76,44	191,1			
	3-5	72,52	181,3			
Вариант 2- «на спуск» с использованием электродов марки BOHLER FOX BVD 90	4-5	78,4	196,0	199,3	62 <sup>1)</sup> 50 <sup>2)</sup>	57 <sup>1)</sup> 37,5 <sup>2)</sup>
	5-5	77,42	193,6			
	6-5	83,3	208,3			
1) согласно РД-25.160.00-КТН-037-14						
2) согласно СТО Газпром 2-2.2-136-2007						



Рисунок 47 – Образцы после испытания на ударный изгиб

По результатам проведённых испытаний на ударный изгиб все образцы показали значения выше минимально допустимых значений согласно НД [31, 36]. Таким образом, результаты испытаний образцов из обоих технологических вариантов признаны положительными.

При этом, стоит отметить, что образцы из сварного соединения, выполненного по варианту 2- «на спуск» с использованием электродов марки BOHLER FOX BVD 90 показали значения ударной вязкости выше, чем образцы из сварного соединения, выполненного по варианту 1- «на подъем» с использованием электродов марки Nittetsu L-60LT (рисунок 48).

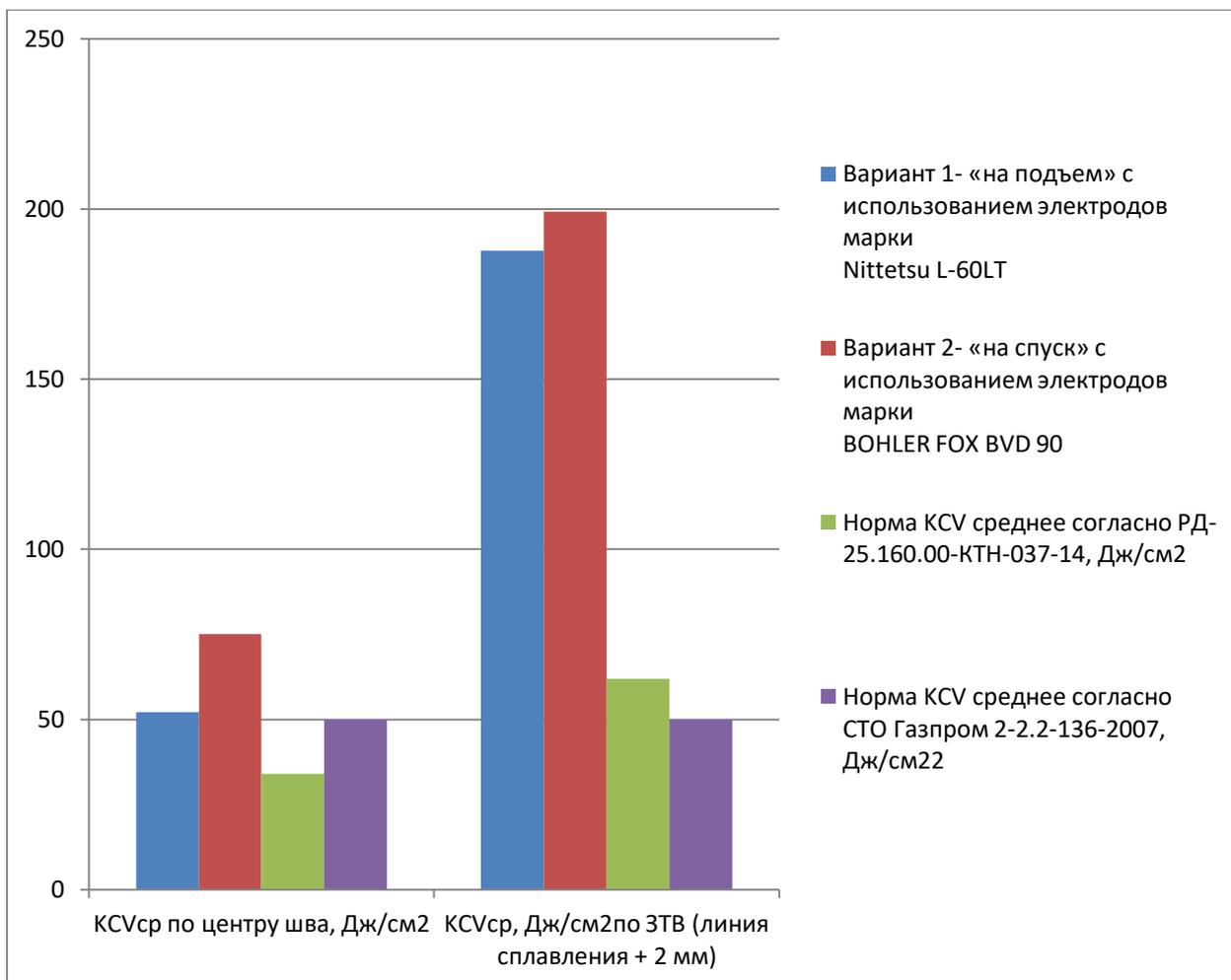


Рисунок 48 – Средние показатели значений ударной вязкости

#### 4.1.7 Металлографическое исследование микроструктуры

В процессе подготовки к проведению исследований микроструктуры металла шва и зоны термического влияния из контрольного сварного соединения согласно схемы вырезки (рисунок 17) было вырезано по 1 образцу из каждого технологического варианта выполнения сварки (рисунок 49).

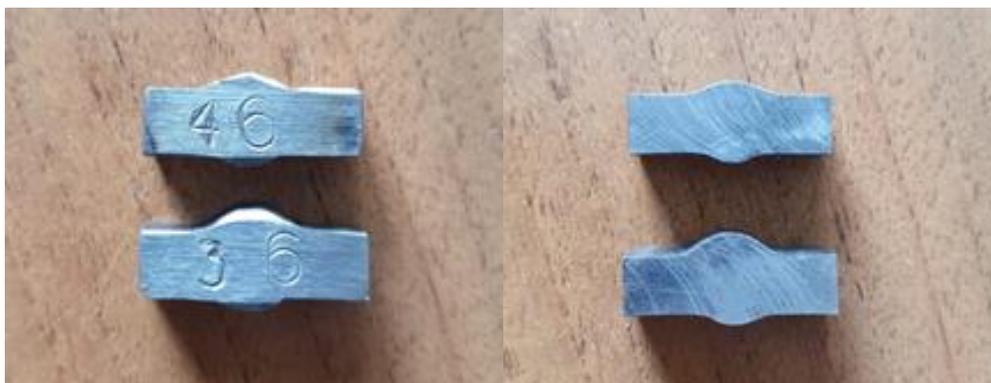
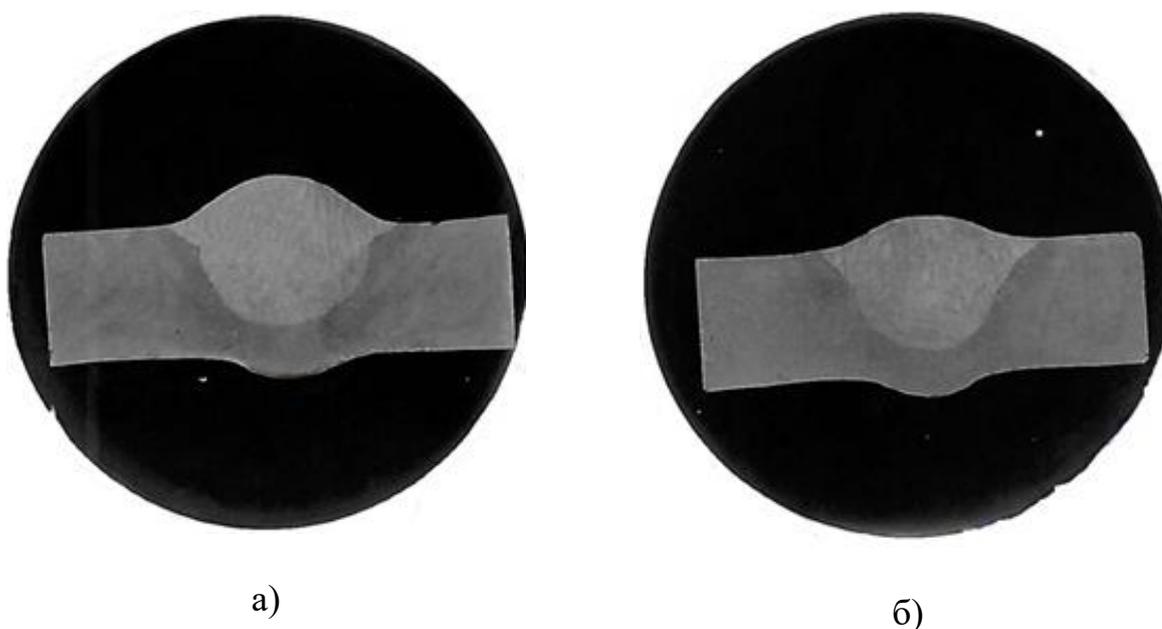


Рисунок 49 – Заготовки для изготовления микрошлифов

Из полученных заготовок, после процессов шлифования, полирования и последующего травления получились шлифы для проведения анализа микроструктуры (рисунок 50)

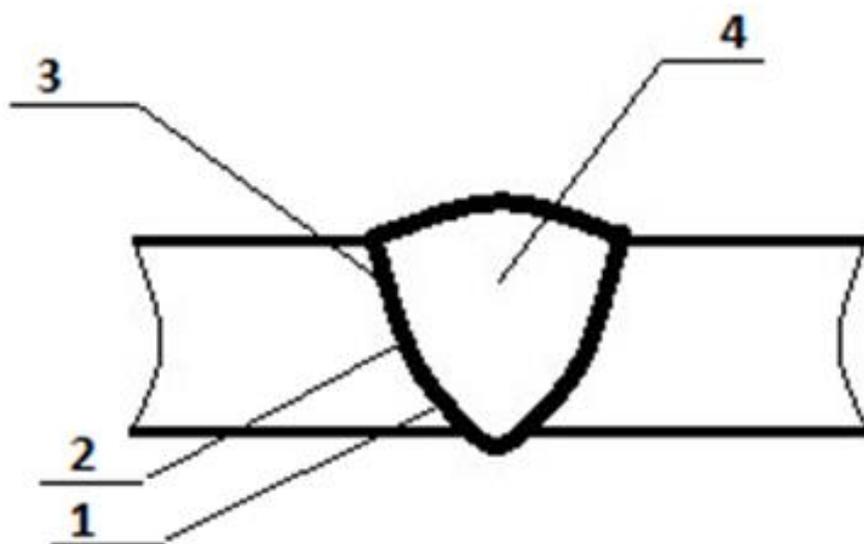


а) Вариант 1- «на подъем» с использованием электродов марки Nittetsu L-60LT

б) Вариант 2- «на спуск» с использованием электродов марки BOHLER FOX BVD 90

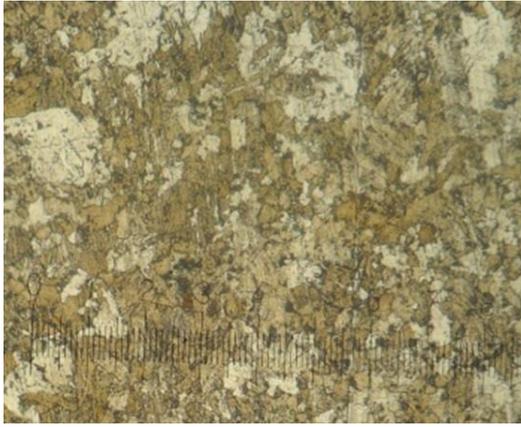
Рисунок 50 – Шлифы для исследования микроструктуры, запрессованные в композит

В процессе выполнения сварного шва происходит расплавление и кристаллизация металла шва и зоны основного металла прилегающего к шву. Термические циклы сварки приводят к структурным изменениям в металле шва и зоне термического влияния, влияющим на свойства сварного соединения. Основными зонами, определяющими свойства сварных соединений являются сам сварной шов (наплавленный металл) и участок линии сплавления шва с основным металлом, который подразделяется на две более мелкие подзоны - участок неполного расплавления и участок перегрева. Поэтому при исследовании микроструктуры были выполнены сравнения участков сварных соединений согласно рисунка 51.



- 1) линия сплавления на границе корневого и заполняющего слоёв шва;
- 2) линия сплавления в сечении заполняющего слоя;
- 3) линия сплавления в сечении облицовочного слоя;
- 4) центр сварного шва в сечении заполняющего слоя.

Рисунок 51 – Участки сравнения микроструктуры сварных соединений:



а)

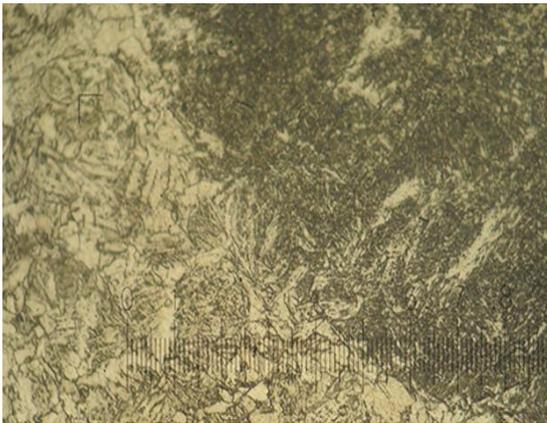


б)

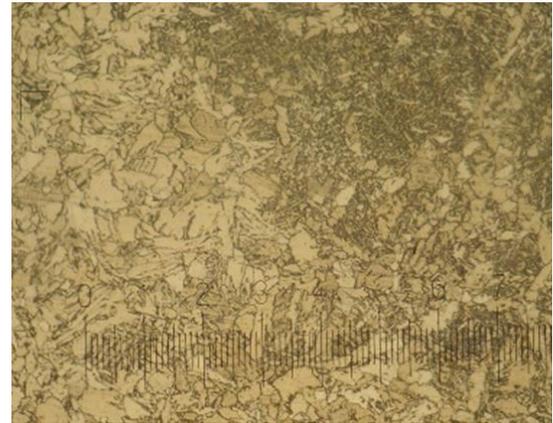
а) Вариант 1- «на подъем» с использованием электродов марки Nittetsu L-60LT

б) Вариант 2- «на спуск» с использованием электродов марки BOHLER FOX BVD 90

Рисунок 52 – Микроструктура исследуемых образцов в участке № 1.



а)



б)

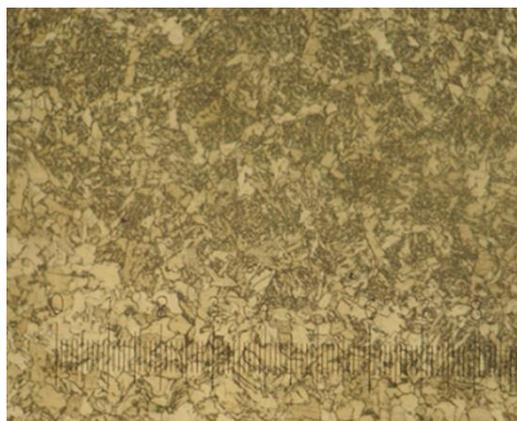
а) Вариант 1- «на подъем» с использованием электродов марки Nittetsu L-60LT

б) Вариант 2- «на спуск» с использованием электродов марки BOHLER FOX BVD 90

Рисунок 53 – Микроструктура исследуемых образцов в участке № 2.



а)

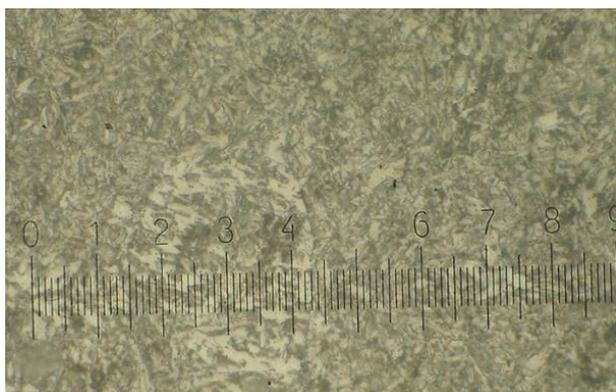


б)

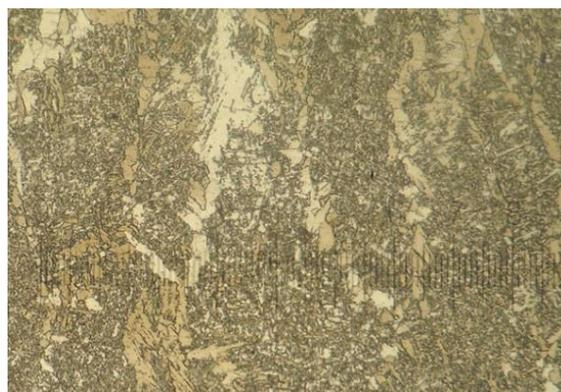
а) Вариант 1- «на подъем» с использованием электродов марки Nittetsu L-60LT

б) Вариант 2- «на спуск» с использованием электродов марки BOHLER FOX BVD 90

Рисунок 54 –Микроструктура исследуемых образцов в участке № 3.



а)



б)

а) Вариант 1- «на подъем» с использованием электродов марки Nittetsu L-60LT

б) Вариант 2- «на спуск» с использованием электродов марки BOHLER FOX BVD 90

Рисунок 55 –Микроструктура исследуемых образцов в участке № 4.

При анализе микроструктуры при 200 кратном увеличении (рисунки 52-55) можно сделать следующие выводы:

– структура металла шва, из «варианта 2» более мелкозернистая, а из «варианта 1» имеет четко выраженную дендритную структуру, более похожую на литую [5];

– структура основного металла вдоль линии сплавления из «варианта 2» так же более мелкозернистая и более равноосная, чем из «варианта 1».

Полученные структуры металла шва и ЗТВ объясняются особенностями термических циклов сварки по разным вариантам, так как при сварке по «варианту 1» тепловложение в металл больше за счёт меньшей скорости сварки и большему нагреву зоны термического влияния [12].

Полученные структуры подтверждают и различие в полученных результатах при проведении механических испытаний.

#### 4.1.8 Химический анализ сварных швов

Выполненный химический анализ облицовочных слоёв сварных соединений, выполненных по двум технологическим вариантам показал значения, представленные на рисунке 56 и таблице 31.

Таблица 31 – Химический состав облицовочных слоёв сварных соединений

Элемент	Nittetsu L-60LT				BOHLER FOX BVD 90			
	1-3	2-3	3-3	Среднее	4-3	5-3	6-3	Среднее
C	0,0717	0,0749	0,0760	0,074	0,0640	0,0534	0,0476	0,0550
Si	0,4819	0,5473	0,5655	0,5316	0,3802	0,4110	0,4375	0,4096
Mn	1,3764	1,3632	1,3676	1,37	1,1626	1,1847	1,2815	1,2096
Cr	0,1343	0,1201	0,1352	0,130	0,0732	0,0789	0,0798	0,077
Ni	0,5248	0,5499	0,5492	0,54	1,7906	1,8401	1,9132	1,8480
Cu	0,0558	0,0273	0,0300	0,0377	0,0342	0,0211	0,0190	0,0248

Продолжение таблицы 31

Элемент	Nittetsu L-60LT				BOHLER FOX BVD 90			
	1-3	2-3	3-3	Среднее	4-3	5-3	6-3	Среднее
P	0,0116	0,0113	0,0093	0,011	0,0059	0,0061	0,0068	0,006
S	0,0036	0,0045	0,0039	0,004	0,0054	0,0047	0,0048	0,005
Ti	0,0149	0,0149	0,0135	0,014	0,0069	0,0080	0,0067	0,007
Mo	0,1671	0,1738	0,1706	0,170	0,0088	0,0069	0,0114	0,0091
V	0,0127	0,0118	0,0132	0,013	0,0204	0,0214	0,0211	0,021
Nb	0,0139	0,0135	0,0156	0,014	0,0124	0,0108	0,0098	0,011
Co	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,0017	0,0040	0,0036	0,0031
Al	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
W	0,0188	0,0175	< 0,001	0,0182	0,0054	0,0413	< 0,001	0,0233
As	0,0078	0,0073	0,0090	0,008	0,0070	0,0094	0,0090	0,0085
B	0,0018	0,0020	0,0021	0,002	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Sn	0,0055	0,0056	< 0,001	0,0056	0,0034	0,0014	0,0046	0,0032
Zr	0,0013	0,0012	0,0011	0,0012	0,0011	0,0012	0,0012	0,0012

При анализе полученных данных по химическому составу можно сделать следующие выводы:

- Полученные данные по содержанию легирующих элементов в облицовочном слое сварных швов по каждому технологическому варианту примерно соответствуют составу наплавленного металла, заявленного в сертификатах качества на соответствующие электроды;
- Содержание в облицовочных слоях, выполненных разными электродами, основных легирующих элементов практически одинаково за исключением Ni, содержание которого в металле шва, выполненного электродами BOHLER FOX BVD 90 превышает его содержание в металле шва, выполненного электродами Nittetsu L-60LT примерно в

3,3 раза. Никель способствует измельчению зерен металла, улучшает пластичность металла шва и его прочность. Эти данные подтверждаются результатами проведенных испытаний механических свойств контрольных сварных соединений [38].

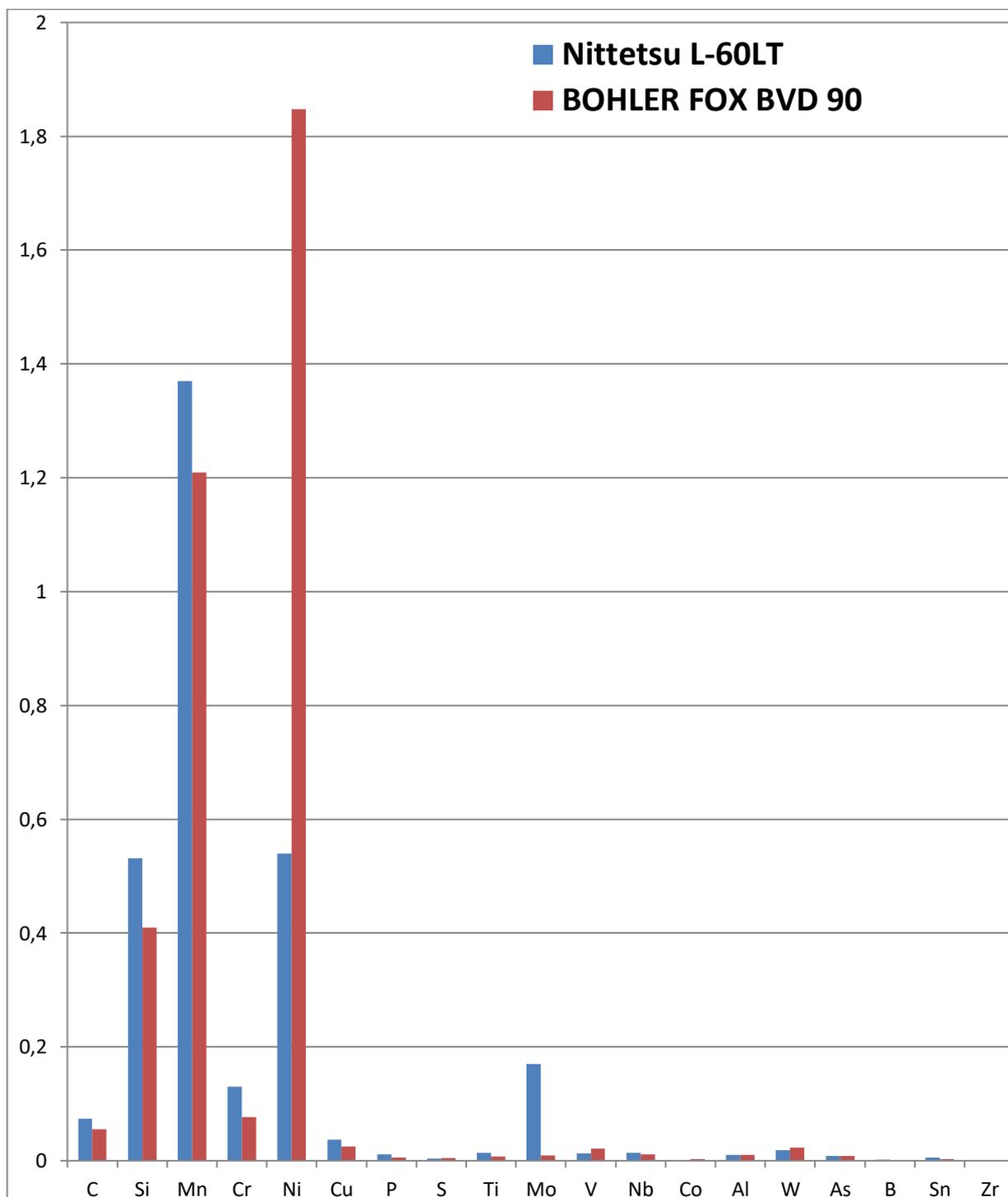


Рисунок 56 – Химический состав облицовочных слоёв сварных соединений

## 4.2 Показатели технологического процесса при выполнении контрольных сварных соединений

Значения времени выполнения сварных соединений и количество затраченных сварочных материалов представлены в таблице 32:

Таблица 32 – Показатели технологического процесса при выполнении контрольных сварных соединений

Параметр	Единицы измерения	вариант 1 (Nittetsu)	вариант 2 (FOX BVD)
T <sub>1</sub> - время предварительного подогрева до +50°C ÷ +80°C при Токр возд +10°C	мин	1,0	1,0
T <sub>2</sub> - время на сборку стыка с установкой (с установкой с каждой стороны 2-х прихваток)	мин	4,0	4,0
N <sub>1</sub> - количество электродов на установку прихваток	шт	2	2
T <sub>3</sub> - время сварки корневого слоя	мин	35,0	35,0
N <sub>2</sub> - количество электродов на сварку корневого слоя	шт	16	16
T <sub>4</sub> - время на зачистку корневого слоя	мин	10	10
T <sub>5</sub> - время на межслойный подогрев до +100°C ÷ +130°C	мин	0,5	0,5
T <sub>6</sub> - время сварки заполняющего слоя	мин	12	7
N <sub>3</sub> - количество электродов на сварку заполняющего слоя	шт	7	4
T <sub>7</sub> - время на зачистку заполняющего слоя, T <sub>2</sub>	мин	8	3
T <sub>8</sub> - время на межслойный подогрев до +100°C ÷ +130°C	мин	0	0
T <sub>9</sub> - время сварки облицовочного слоя	мин	20	12
N <sub>4</sub> - количество электродов на сварку облицовочного слоя	шт	11	7
T <sub>10</sub> - время на зачистку облицовочного слоя	мин	2	2

Суммарное время на выполнение сварного стыка по каждому технологическому варианту составляет:

$$\Sigma T1 = 1 + 4 + 35 + 10 + 0,5 + 12 + 8 + 0 + 20 + 2 = 92,5 \text{ (мин)}$$

$$\Sigma T2 = 1 + 4 + 35 + 10 + 0,5 + 7 + 3 + 0 + 12 + 2 = 74,5 \text{ (мин)}$$

Суммарное время на выполнение заполняющего и облицовочного слоёв по каждому технологическому варианту составляет:

$$\Sigma T1 = 12 + 8 + 0 + 20 + 2 = 42 \text{ (мин)}$$

$$\Sigma T2 = 7 + 3 + 0 + 12 + 2 = 24 \text{ (мин)}$$

Суммарный расход электродов на выполнение заполняющего и облицовочного слоёв по каждому технологическому варианту:

$$P1 = 0,036 \times (7 + 11) = 0,648 \text{ (кг)}$$

$$P2 = 0,034 \times (4 + 7) = 0,374 \text{ (кг)}$$

Полученные суммарные показатели времени при выполнении сварного стыка и расхода электродов при выполнении заполняющего и облицовочного слоёв шва по каждому технологическому варианту представлены в таблице 33:

Таблица 33 – Суммарные показатели технологических вариантов

Параметр	Единицы измерения	вариант 1 (Nittetsu)	вариант 2 (FOX BVD)
Суммарное время, затраченное на выполнение заполняющего и облицовочного слоёв	мин	42	24
Суммарный расход электродов на сварку заполняющего и облицовочного слоёв	кг	0,648	0,374

В результате проведенного сравнительного анализа двух технологических вариантов получены следующие данные:

- время выполнения сварного стыка по варианту 2 меньше на 19,5% чем по варианту 1;
- расход сварочных материалов на сварку заполняющего и облицовочного слоёв шва по варианту 2 меньше на 42,3%.

## Заключение

Целью диссертационного исследования являлось повышение производительности ручной дуговой сварки стыков магистральных трубопроводов, при сохранении требуемого уровня качества сварных соединений.

На основании проведённых литературных исследований были сделаны выводы и сформулированы задачи диссертационного исследования:

- разработать технологию ручной дуговой сварки методом «на спуск» применением электродов с основным видом покрытия.
- разработать методику исследования процессов ручной дуговой сварки стыков магистральных трубопроводов из сталей класса прочности K56.
- провести сравнительный анализ процессов ручной дуговой сварки стыков магистральных трубопроводов из сталей класса прочности K56 с применением электродов марки Nittetsu L-60LT диаметром 3,2 мм и марки BOHLER FOX BVD 90 диаметром 3,2 мм.
- провести сравнительный анализ сварных соединений стыков магистральных трубопроводов из сталей класса прочности K56, выполненных с помощью ручной дуговой сварки с применением электродов марки Nittetsu L-60LT диаметром 3,2 мм и марки BOHLER FOX BVD 90 диаметром 3,2 мм

В процессе выполнения работы была разработана технология сборки и сварки стыков труб магистральных трубопроводов, выполняемых комбинированным способом: «ручная дуговая сварка электродами с основным видом покрытия методом «на подъем» корневого слоя шва + ручная дуговая сварка электродами с основным видом покрытия методом «на спуск» заполняющего и облицовочного слоёв шва» (приложение А).

Разработана методика исследования процессов ручной дуговой сварки стыков магистральных трубопроводов из сталей класса прочности K56.

Проведен сравнительный анализ сварных соединений труб класса прочности К56, выполненных с помощью ручной дуговой сварки с применением электродов марки Nittetsu L-60LT и марки BOHLER FOX BVD 90, который показал, что качество выполненных сварных соединений по обоим технологическим вариантам, при неразрушающем контроле и проведении механических испытаний получилось не ниже требуемых действующей нормативной документацией. Однако ударная вязкость сварного шва и зоны термического влияния сварного соединения, выполненного электродами марки BOHLER FOX BVD 90, оказалась выше, чем у сварного соединения, выполненного электродами марки Nittetsu L-60LT.

Проведён сравнительный анализ процессов ручной дуговой сварки стыков магистральных трубопроводов из сталей класса прочности К56 с применением электродов марки Nittetsu L-60LT диаметром 3,2 мм и марки BOHLER FOX BVD 90 диаметром 3,2 мм, который показал, что разработанная технология сварки комбинированным способом является более производительной, по сравнению с традиционным способом выполнения сварных соединений методом «на подъём». Это объясняется более высокой скоростью выполнения сварки и меньшими затратами времени на зачистку заполняющего слоя, за счёт получения оптимальной формы заполняющего слоя без образования шлаковых карманов, требующей зачистки только дисковой проволочной щёткой. Это подтверждается полученными значениями времени, затраченного на выполнение сварки заполняющего и облицовочного слоёв, которое при сварке методом «на спуск» (вариант 2) на 19,5 % меньше, чем при сварке методом «на подъём» (вариант 1).

Дополнительным фактом также является снижение расхода сварочных материалов на 42,3% затраченных на выполнение сварки заполняющего и облицовочного слоёв методом «на спуск» (вариант 2), по сравнению с методом «на подъём» (вариант 1).

Проведённые исследования позволили установить, что предложенный технологический вариант ручной дуговой сварки электродами с основным видом покрытия выполняемых комбинированным способом: «методом «на подъем» корневого слоя шва + методом «на спуск» заполняющего и облицовочного слоёв шва» является более производительным и с более высоким уровнем качества.

## Список используемой литературы и используемых источников

1. Волченко В.Н. Контроль качества сварки. М. : Машиностроение, 1975. 328 с.
2. ВСН 006-89 Строительство магистральных и промысловых трубопроводов. Сварка. М. : ВНИИСТА, 1989. 217с.
3. ВСН 012-88 Миннефтегазстрой Строительство магистральных и промысловых трубопроводов. Контроль качества и приемка работ. М. : ВНИИСТА, 1989. 151с.
4. Галушкина В. Н. Технология производства сварных конструкций: учебник для нач. проф. Образования. М. : Академия, 2010. 192 с.
5. Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г. Материаловедение . М. : Металлургия, 1975. 447 с.
6. Гладков Э. А. Управление процессами и оборудованием при сварке: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. М. : Академия, 2006. 432 с.
7. ГОСТ 2601-84 Сварка металлов. Термины и определения основных понятий. М. : Издательство стандартов, 1995. 55с.
8. ГОСТ 6996-66 Сварные соединения. Методы определения механических свойств. М. : Стандартиформ, 2006. 45 с.
9. ГОСТ 7512-82 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод. М. : Издательство стандартов, 1988. 31с.
10. ГОСТ 7122-81 Швы сварные и металл наплавленный. Методы отбора проб для определения химического состава. М. : Издательство стандартов, 1981. 4с.
11. ГОСТ 16037-80 Соединения сварные стальных трубопроводов. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. М. : Издательство стандартов, 1998. 23с.
12. Ефименко Л.А. Металловедение и термическая обработка сварных соединений. М. : Логос, 2007. 455 с.
13. ГОСТ Р 55724-2013 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. М. : Стандартиформ, 2019. 31с.

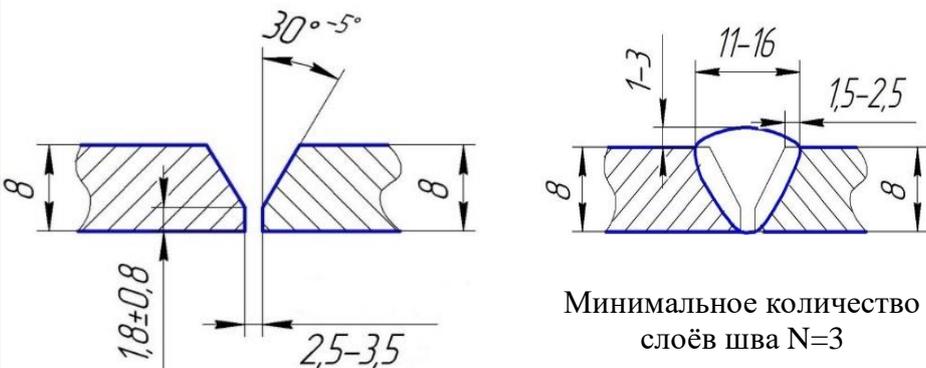
14. ГОСТ Р 57180-2016 Соединения сварные Методы определения механических свойств, макроструктуры и микроструктуры. М. : Стамдартинформ, 2016. 24с.
15. Колотов О.В. Металлические конструкции : учебное пособие. Н. Новгород: ННГАСУ, 2010. 100 с.
16. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. М. : Машиностроение, 1990. 528с.
17. Лосев В.А., Юхин Н.А. Пособие сварщика (иллюстрированное) М.: Соуэло, 2000. 56с.
18. Лебедев В.К. Машиностроение. Энциклопедия. Т IV. Оборудование для сварки. М. : Машиностроение, 1999. 496 с.
19. Малышев Б.Д. Ручная дуговая сварка: учебник для профессионально-технических училищ . М. : Стройиздат, 1990. 319с.
20. Маслов В.И. Сварочные работы: учебник для начального профессионального образования. М. : ИРПО; Академия, 1999. 240 с.
21. Матохин, Г. В. Прочность и долговечность сварных конструкций: учебное пособие. М. : Вологда; Инфра-Инженерия, 2021. 288 с.
22. Милютин В.С. Источники питания для сварки. М. : Айрис-пресс, 2007. 384 с.
23. Мустафин Ф.М. Сварка трубопроводов: учеб. пособие. М. : НедраБизнесцентр, 2002. 350 с.
24. Никифоров Г.Д. Технология и оборудование сварки плавлением: учебник для вузов (2-е изд.). М. : Машиностроение, 1986. 320 с.
25. Никифоров Н.И., Капустин О.Е., Жуков Д.В. Пособие по безопасному проведению сварочных работ. М.: НЦ ЭНАС, 2007. 125с
26. Николаев Г.А., Куркин С.А., Винокуров В.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций: учеб. пособие. М. : Высшая школа, 1982. 272 с.
27. Овчинников В. В. Современные виды сварки: учеб. пособие учеб. пособие для нач. проф. Образования. М. : Академия, 2011. 208 с.

28. Овчинников В.В. Электросварщик ручной сварки (сварка покрытыми электродами). М. : Академия, 2010. 64 с.
29. Овчинников В.В. Электросварщик на автоматических и полуавтоматических машинах (1-е изд.): учеб. пособие. М. : Издательский центр «Академия», 2008. 64 с.
30. РД 03-606-03 Инструкция по визуальному и измерительному контролю. Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России . М. : 2004. 104 с.
31. РД-25.160.00-КТН-037-14 Сварка при строительстве и ремонте магистральных нефтепроводов. М. : 2014. 190 с.
32. РД-25.160.10-КТН-016-15 Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Неразрушающий контроль сварных соединений при строительстве и ремонте магистральных трубопроводов. М. : 2015. 179с.
33. Руге Ю. Техника сварки. М. : Металлургия, 1984. 560 с.2
34. Степанов В.В. Справочник сварщика. – М.: Машиностроение, 1975. 520 с.
35. СТО Газпром 2-2.2-136-2007 Инструкция по технологиям сварки при строительстве и ремонте промысловых и магистральных газопроводов. М. : Издательский дом полиграфия , 2007. 247с.
36. СТО Газпром 2-2.4 - 083 - 2006 Инструкция по неразрушающим методам контроля качества сварных соединений при строительстве и ремонте промысловых и магистральных газопроводов. М. : Информационно - рекламный центр газовой промышленности, 2007. 105с.
37. Уварова С.Г., Закирова Г.М. Ручная дуговая сварка плавящимися электродами: учебное пособие. Казань : Офсет-Сервис, 2016. 56с.
38. Фролов В.В. Теория сварочных процессов: Высшая школа. М. : 1988. 559 с.

39. Хромченко Ф.А. Справочное пособие электросварщика. М. : Машиностроение, 2005. 416 с.
40. Хромченко Ф.А. Сварочные технологии при ремонтных работах: справочник. Ростов н/Д: Феникс, 2010. 397 с.
41. Чернышов Г.Г. Технология электрической сварки плавлением: учебник для студенческих учреждений среднего профессионального образования. М. : Академия, 2010. 496 с.
42. Ilić A. et al. Analysis of Influence of the Welding Procedure on Impact Toughness of Welded Joints of the High-Strength Low-Alloyed Steels [Электронный ресурс] // Applied Sciences. 2020. Т. 10. №. 7. PP. 2205. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/7/2205> (дата обращения: 05.04.2021)
43. Thomas D. J. Analyzing the Failure of Welded Steel Components in Construction Systems [Электронный ресурс] // Journal of Failure Analysis and Prevention. 2018. Vol. 18. №. 2. PP. 304-314. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11668-018-0392-x> (дата обращения: 01.10.2020)
44. Mohtadi-Bonab M. A., Ghesmati-Kucheki H. Important factors on the failure of pipeline steels with focus on hydrogen induced cracks and improvement of their resistance [Электронный ресурс] // Metals and Materials International. 2019. Т. 25. №. 5. PP. 1109-1134. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12540-019-00266-7> (дата обращения: 29.03.2021)
45. Sabokrouh M., Farahani M. Experimental study of the residual stresses in girth weld of natural gas transmission pipeline [Электронный ресурс] // Journal of Applied and Computational Mechanics. 2019. Т. 5. №. 2. PP. 199-206. URL: [https://jacm.scu.ac.ir/article\\_13695.html](https://jacm.scu.ac.ir/article_13695.html) (дата обращения: 26.03.2021)
46. Vignesh S. et al. Identifying the optimal HVOF spray parameters to attain minimum porosity and maximum hardness in iron based amorphous metallic coatings [Электронный ресурс] // Defence technology. 2017. Vol. 13. №. 2. PP. 101-110. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214914717300089> (дата обращения: 01.10.2020)

## Приложение А

### Технологическая карта ручной дуговой сварки с применением электродов марки BÖHLER FOX BVD 90

<p>Операционная технологическая карта сборки и сварки стыков труб магистральных трубопроводов, выполняемых комбинированным способом: «ручная дуговая сварка электродами с основным видом покрытия методом «на подъем» корневого слоя шва + ручная дуговая сварка электродами с основным видом покрытия методом «на спуск» заполняющего и облицовочного слоёв шва»</p>					
тип трубопровода	стыкуемые элементы			шифр карты	
магистральный трубопровод	труба + труба			ТК-РД-М03-ТТ-НЦ-01	
характеристика труб					
номер ТУ, ГОСТ, марка стали	диаметр мм	толщина стенки, мм	класс прочности стали	нормативный предел прочности, МПа	эквивалент углерода, %
ТУ 1381-051-05757848-2011	530	8,0	K56	550	0,38
Сварочные электроды	<p>Прихватки и корневой слой шва: Nittetsu 16W (E7016-G по AWS A5.1) Ø2,6 мм Заполняющие и облицовочный слой шва: BÖHLER FOX BVD 90 (E9018-G по AWS A5.5) Ø3,2 мм</p>				
Предварительный подогрев	<p>+50+30 °С при Токр.возд. выше 0 °С; +100+30 °С при Токр.возд. ниже 0 °С</p>				
Форма разделки кромок и сварного шва	 <p style="text-align: center;">Минимальное количество слоёв шва N=3</p>				
Режимы сварки					
сварочные слои	марка электродов	диаметр, мм	полярность	сварочный ток, А	
Прихватки	Nittetsu 16W	2,6	обратная	55-85	
Корневой	Nittetsu 16W	2,6	обратная	55-85	
Заполняющий	BÖHLER FOX BVD 90	3,2	обратная	110-160	
Облицовочный	BÖHLER FOX BVD 90	3,2	обратная	100-150	

## Продолжение Приложения А

### Дополнительные требования и рекомендации

1. Перед использованием электроды необходимо прокалить по рекомендации завода-изготовителя:
  - Nittetsu 16W при температуре  $+300^{\circ}\text{C} \div +350^{\circ}\text{C}$  в течение 1-2 ч.;
  - BÖHLER FOX BVD 90 при температуре  $+300^{\circ}\text{C} \div +350^{\circ}\text{C}$  в течение минимум 2,0 ч.;
2. «Присоединение обратного кабеля к свариваемым трубам должно выполняться с помощью специальных устройств, обеспечивающих надежный контакт с телом трубы и исключающих образование искрений на теле трубы при сварке. Не допускается приваривать к телу трубы какие-либо крепежные элементы обратного кабеля» [31].
3. При выпадении осадков и/или скорости ветра более 10 м/сек производить сварочные работы без инвентарных укрытий запрещено.
4. Допускается замена сварочного оборудования на аттестованные аналоги.
5. Сварные соединения оставлять незаконченными не допускается.
6. «Межслойная температура должна быть в интервале от  $+100^{\circ}\text{C}$  до  $+250^{\circ}\text{C}$ . В случае снижения межслойной температуры ниже  $+100^{\circ}\text{C}$ , следует произвести сопутствующий (межслойный) подогрев до температуры  $+100^{+30}\text{ }^{\circ}\text{C}$ » [31].
7. Сварку каждого слоя должны выполнять одновременно два сварщика.
8. «Возбуждение дуги при сварке следует выполнять только на поверхности разделки свариваемых кромок или на ранее выполненном слое сварного шва. Запрещается зажигать дугу на поверхности металла труб» [31].
9. При выполнении прихваток и сварке корневого слоя шва:
  - направление сварки - на подъём;
  - сварку выполнять по зазору короткой дугой  $L= 0,5 \div 1,0 d$  электрода без поперечных колебаний, прожигая «окно»; с целью придания наружной части шва более плоской формы, допускаются небольшие поперечные колебания электродом.
10. При сварке заполняющего и облицовочного слоёв шва:
  - направление сварки - на спуск;
  - после зажигания дуги электрод плавно перемещается вниз, избегая подъема дуги или возвратного движения;
  - при гашении дуги электрод должен плавно двигаться вниз по касательной к поверхности трубы и плавно подниматься; резкий отрыв электрода приводит к образованию глубокого конечного кратера (требуется вышлифовка);
  - электрод можно зажигать только один раз, возобновление дуги не допускается.
  - при соблюдении правил зажигания и прерывания дуги, перед началом выполнения следующего слоя шлак удаляется только металлическими щетками;
  - сварку выполнять короткой дугой, не опираясь на кромки, оптимальная длина дуги 3 мм
  - угол наклона электрода:  $80-90^{\circ}$  в положении 12-13 часов и 17-18 часов,  $60-70^{\circ}$  в положениях 13-17 часов
  - сварку заполняющего слоя рекомендуется выполнять за один проход с поперечными колебаниями амплитудой до 2-х диаметров электрода; В положении 12-13 и 17-18 часов заполняющий слой заканчивать ниже кромок разделки на 1,0-1,5 мм, в положении 13-17 часов заполнение выводить заподлицо с кромками;
  - облицовочный слой выполнять с поперечными колебаниями за один проход с перекрытием кромок на  $1,5 \div 2,5$  мм.

Продолжение Приложения А

Операция	Содержание операции	Оборудование и инструмент
Очистка	<ul style="list-style-type: none"> <li>• «очистить внутреннюю полость труб от попавшего грунта, снега и других загрязнений» [40].</li> </ul>	Скребок, щетка.
Подготовка	<ul style="list-style-type: none"> <li>• «Осмотреть торцы и поверхности труб на ширине 150 мм;</li> <li>• Устранить шлифованием на наружной поверхности неизолированных торцов труб царапины, риски, задиры глубиной до 0,4 мм, при этом толщина стенки не должна выйти за пределы минусового допуска согласно ТУ (минимальная толщина стенки 7,6 мм);</li> <li>• Концы труб с забоинами и задирами фасок, вмятинами любой глубины, исправлению не подлежат и должны быть обрезаны с помощью механизированной газовой резки.</li> <li>• После вырезки участка с недопустимыми дефектами, следует выполнить УЗК участка, прилегающего к торцу шириной не менее 40 мм по всему периметру трубы для выявления возможных расслоений. При выявлении расслоений произвести вырезку трубы с дефектным участком на расстоянии не менее 300 мм и произвести ультразвуковой контроль в соответствии с выше приведенными правилами;</li> <li>• После выполнения резки и положительных результатов УЗК, резаная кромка должна быть обработана механическим способом станком подготовки кромок или шлифмашинкой до требуемых параметров разделки, при этом металл резанного торца после термической резки, должен быть удален механической обработкой на глубину не менее 1,0 мм от поверхности реза, а внутреннее усиление заводского продольного шва должно быть зашлифовано «заподлицо» с внутренней поверхностью трубы на длине не менее 50 мм.» [40].</li> <li>• Усиления наружных заводских швов удалить до высоты 0-0,5 мм на расстоянии 10-15 мм от торца;</li> <li>• Зачистить до металлического блеска свариваемые кромки и прилегающие к ним внутреннюю и наружную поверхности труб на ширину не менее 15 мм.</li> </ul>	Ультразвуковой толщиномер, ультразвуковой дефектоскоп, шаблон сварщика УШС-3, линейка, штангенциркуль, шлифмашинка, пост механизированной газовой резки, станок подготовки кромок
Подогрев	<ul style="list-style-type: none"> <li>• «Выполнить предварительный подогрев, предварительно совмещённых торцов труб до температуры, указанной в разделе «Предварительный подогрев»» [31];</li> <li>• Замер температуры производить не менее чем в четырех точках равномерно по периметру стыка на расстоянии от 60 до 75 мм от торца каждой трубы.</li> <li>• «Допускается при снижении температуры</li> </ul>	Кольцевая газовая горелка, однопламенная газовая горелка, пирометр

Продолжение Приложения А

Операция	Содержание операции	Оборудование и инструмент
	предварительного подогрева свариваемых кромок не более, чем на 20% ниже регламентированного значения выполнять подогрев однопламенными газовыми горелками» [31].	
Сборка	<ul style="list-style-type: none"> <li>• «Осуществить сборку труб с помощью наружного центратора.</li> <li>• При сборке заводские продольные швы смещать относительно друг друга на расстояние не менее чем 75 мм;</li> <li>• Величина зазора между стыкуемыми трубами должна составлять 2,0÷3,0 мм.» [31].</li> <li>• Наружное смещение кромок электросварных труб не должно превышать 1,6 мм (20% от нормативной толщины стенки);</li> <li>• Выполнить 4 прихватки длиной 60÷100 мм. Прихватки следует выполнять на расстоянии не менее 100 мм от заводских продольных швов. Прихватки с недопустимыми дефектами (надрывами, трещинами, порами и др.) должны быть удалены абразивным инструментом и заверены вновь. Начало и конец каждой прихватки должны быть зачищены шлифмашинкой с абразивным кругом до плавного перехода.</li> <li>• При сборке запрещается любая ударная правка концов труб.</li> </ul>	Центратор наружный, шаблон сварщика УШС-3, рулетка, сварочные выпрямители, шлиф-машинки,
Сварка	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Выполнить «сварку не менее 60% периметра корневого слоя шва.</li> <li>• Снять наружный центратор.</li> <li>• Зачистить все сваренные участки от шлака и брызг, а их концы обработать абразивным кругом.</li> <li>• Выполнить сварку оставшейся части периметра корневого слоя» [31].</li> <li>• Зачистить корневой слой снаружи трубы от шлака и брызг до чистого металла, зашлифовать замки.</li> <li>• Выполнить последовательную сварку заполняющего и облицовочного слоёв шва с учетом следующих рекомендаций:               <ul style="list-style-type: none"> <li>- после завершения каждого слоя производить зачистку от шлака и брызг;</li> <li>- «места начала сварки каждого последующего слоя должно быть смещено относительно начала предыдущего слоя шва не менее чем на 30 мм» [31];</li> <li>- После окончания сварки облицовочного слоя, зачистить шов и прилегающие поверхности труб на ширине не менее 100 мм от брызг, «участки поверхности облицовочного слоя с грубой чешуйчатостью (превышение гребня над впадиной составляет 1 мм и</li> </ul> </li> </ul>	Наружный центратор, сварочные источники, шлиф-машинки, пирометр, газовая горелка, УШС-3, термоизолирующий пояс, инвентарное укрытие, анемометр, маркер

Продолжение Приложения А

Операция	Содержание операции	Оборудование и инструмент
	<p>более), а также участки с превышением усиления шва следует обработать шлифовальным кругом» [31].</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• «По окончании сварки с целью предотвращения быстрого остывания стыка после сварки накрыть его влагонепроницаемым теплоизолирующим поясом до полного остывания» [31].</li> </ul> <p>Выполнить маркировку сварного соединения.</p>	
Контроль	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Выполнить ВИК сварного соединения</li> <li>• Выполнить УЗК сварного соединения</li> <li>• Выполнить РК сварного соединения</li> </ul>	Комплект ВИК, оборудование для УЗК, РК.