

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)

15.04.01 «Машиностроение»

(код и наименование направления подготовки)

«Производство и ремонт сварных конструкций газонефтехимического
оборудования»

(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Исследование технологического процесса сварки тройника в
магистральный трубопровод

Студент

Ю.С. Лапиков

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент К.В. Моторин

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

Тольятти 2022

Содержание

Введение	4
1 Современное состояние изготовления тройников для магистральных трубопроводов.	6
1.1 Описание изделия и условий его эксплуатации.	6
1.2 Сведения о материале изделия.	10
1.3 Особенности базовой технологии сварки тройников магистральных трубопроводов.	17
1.4 Обоснование выбора способа сварки.	24
1.5 Постановка задач на диссертационное исследование	30
2 Повышение ударной вязкости сварных швов при изготовлении сварных тройников магистральных трубопроводов	31
3 Повышение эффективности механизированной сварки в защитных газах проволокой сплошного сечения тройников магистральных газопроводов.	37
3.1 Применение импульсного управления дугой для повышения эффективности механизированной сварки в защитных газах.	37
3.2 Исследование влияния структуры сварного шва на его свойства. .	42
2.4 Способ и устройство для импульсно-дуговой сварки	47
2.5 Наплавка порошковыми проволоками.	38
4 Построение проектной технологии сварки тройника.	51
4.1 Требования к квалификации специалистов по сварке.	51
4.2 Требования к сварочным материалам.	52
4.3 Требования к контролю качества сварочных работ.	54
4.4 Оборудование для сборки и сварки тройника	57
4.5 Описание сварочного оборудования	63

Заключение	66
Список используемой литературы и используемых источников	68

Введение

Актуальность проблемы повышения качества сварки отводов и тройников для магистральных трубопроводов продиктована значительным увеличением числа заказов на эти изделия, которые поступают на соответствующие предприятия [15]. Тройники и отводы изготавливаются из трубной стали марок 10Г2ФБЮ и 09Г2С. Эта сталь обладает высокой теплопроводностью и характеризуется повышенной вязкостью.

Строительство и ремонт магистральных газопроводов и нефтепроводов требует увеличения количества трубных узлов, в том числе и тройников [18]. При этом изготовление тройников в заводских условиях позволяет существенно повысить производительность и качество выполнения этого ответственного трубного узла.

В настоящее время на объектах ОАО «Газпром» наблюдается уменьшение доли применения штамповарных тройников в пользу увеличения доли сварных тройников [6]. Это объясняется преимуществами применения сварных тройников.

Первым преимуществом является отсутствие вредного термического воздействия на основной металл при производстве исходных заготовок. В процессе изготовления штамповарных тройников они подвергаются термосиловому воздействию, причём, величина такого воздействия отличается от партии к партии и от тройника к тройнику. Поэтому можно констатировать низкую стабильность свойств штамповарных тройников.

Вторым преимуществом сварных тройников перед штамповарными тройниками является их технологичность. Для изготовления сварных тройников нет необходимости использования сложной оснастки и оборудования, применение которых вносит дополнительное уменьшение стабильности качества из-за человеческого фактора.

Третьим преимуществом является высокая производительность изготовления сварных тройников по сравнению со штампованными тройниками.

Однако, применение сварных тройников ограничивается существенным их недостатком, а именно, наличием геометрического концентратора напряжений, который может привести к снижению эксплуатационных свойств сварного тройника по сравнению со штампованным тройником.

За счёт введения дополнительных технологических мероприятий отрицательное влияние сварного шва можно минимизировать. Внедрение перспективных способов сварки и повышение точности выполнения заготовок призваны повысить долю сварных тройников при изготовлении магистральных трубопроводов.

Поскольку в процессе эксплуатации магистрального трубопровода его элементы подвергаются статическим и повторно-статическим нагрузкам, под действием внешних факторов скорость разрушения трубопровода возрастает. «В наибольшей степени разрушениям подвергаются участки и элементы трубопровода, которые имеют конструктивные концентраторы напряжений. В первую очередь в качестве такого концентратора выступает тройниковое соединение» [9].

Цель диссертационного исследования – повышение эффективности сварочных операций при изготовлении сварных тройников магистральных трубопроводов.

Объектом исследования является технологический процесс сварки тройников для магистральных трубопроводов.

Предметом исследования является операция сварки соединений при выполнении сварного тройника для магистрального трубопровода.

1 Современное состояние изготовления тройников для магистральных трубопроводов

1.1 Описание изделия и условий его эксплуатации

В сварном тройнике можно выделить три наиболее опасных сечения, которые представлены на рисунке 1 [6]. На рисунках 2-а и 2-б представлены распределения полей эквивалентных напряжений при эксплуатации сварных тройников ТС 1020×720 и ТС 1420×1020.

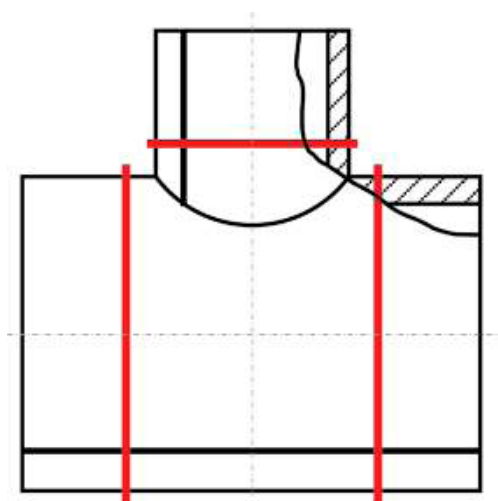


Рисунок 1 – Опасные сечения на рассматриваемом сварном тройнике

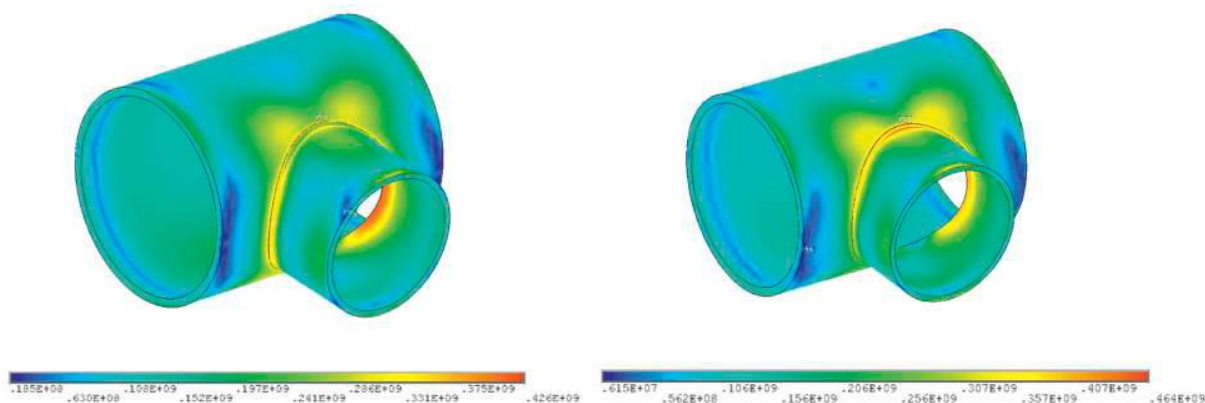


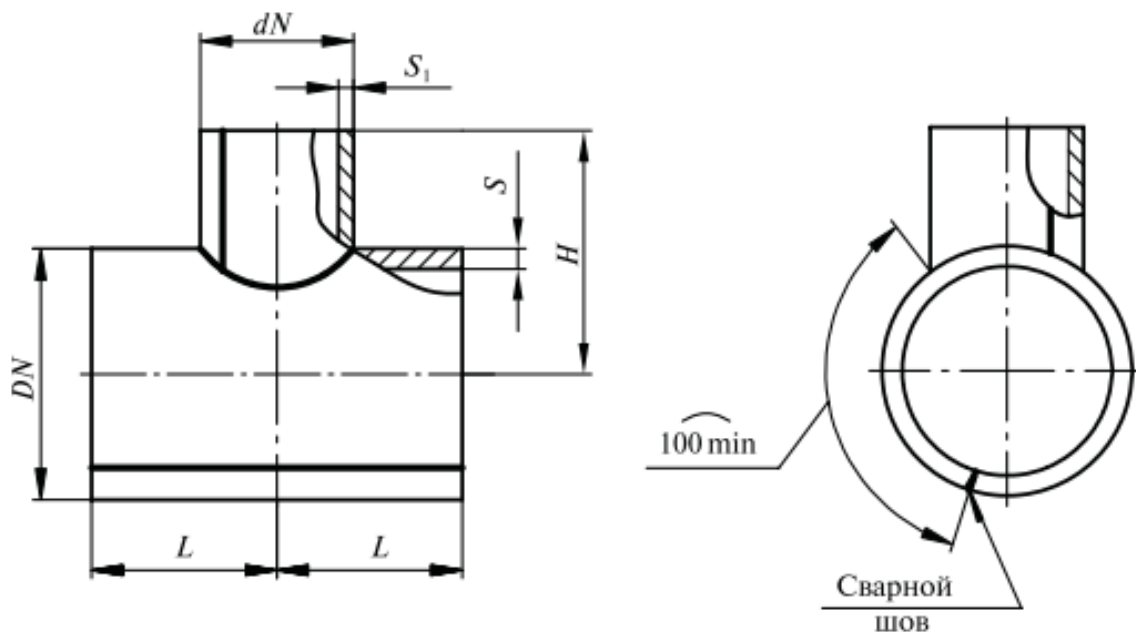
Рисунок 2 – Эквивалентные напряжения в тройнике ТС 1020×720 (а) и ТС 1420×1020 (б)

Установлено, что «величина локальных эквивалентных напряжений при эксплуатации тройников ТС 1020×720 не превышает 426 МПа, а величина средних эквивалентных напряжений в опасных сечениях – 237 МПа. Таким образом, уровень допускаемых напряжений не превышен и составляет всего 53% от максимально допускаемой величины. Допускаемое количество циклов нагружения в этом случае составляет 2896 циклов, что соответствует сроку службы тройника 90 лет.

Величина локальных эквивалентных напряжений в тройниках ТС 1420×1020 не превышает 465 МПа, а величина эквивалентных напряжений в опасных сечениях – 245 МПа. Таким образом, уровень напряжений составляет всего 56 % от допускаемого, что соответствует количеству циклов нагружения 2850 и сроку службы тройника – 89 лет» [6].

Указанные сроки службы сварных тройников превышают нормативный срок службы, установленный в размере 40 лет.

Одним из технических параметров сварного тройника, оказывающим существенное влияние на его эксплуатационные свойства, является строительная длина $2L$ тройника, показанная на рисунке 3.



Н и L – высота и полудлина тройника, DN и dN – условные диаметры магистрали и ответвления тройника, S и S₁ – толщина стенки магистрали и ответвления

Рисунок 3 – Размер сварного тройника

Для испытания были использованы тройники с равными проходами $dN=DN=1020$ мм и строительной длиной $L=750$ мм и $L=1025$ мм. Тройники изготавливались из стали 10Г2ФБЮ. Расчёт напряжённо-деформированного состояния тройников выполнялся для внутреннего давления 9,8 МПа. Установлено, что уровень напряжений для образцов составил соответственно 727 МПа и 703 МПа, что существенно превышает предел текучести материала, равный 441 МПа. При этом уровень деформации в тройниках незначителен и составляет соответственно 9,3% и 5,4% (рис. 4), что существенно меньше, чем нормативное относительное удлинение, равное 19 %.

Для различных дефектов сварных швов, которые могут наблюдаться в сварных тройниках, рассчитан ресурс работоспособности тройников при циклическом нагружении от 0,98 до 9,8 МПа, который представлен в таблице 1 [7].

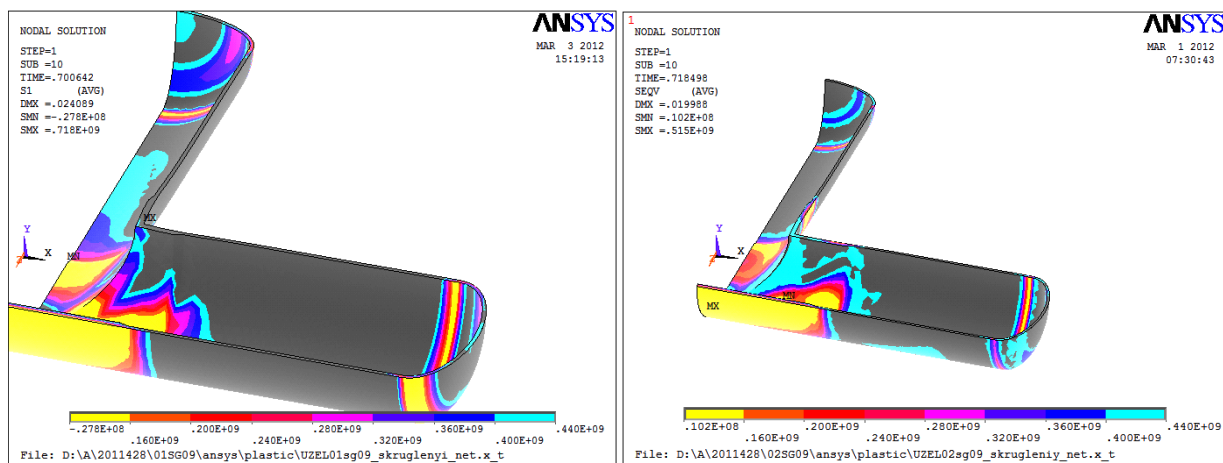


Рисунок 4 – Пластические деформации при нагружении тройника № 1 (а) и тройника № 2 (б)

Таблица 1 – Рабочий ресурс сварных тройников при циклическом нагружении

Исполнение	Количество циклов нагружения до разрушения		
	Трещина 2 мм	Трещина 3 мм	Трещина 4 мм
Тройник № 1	14000	12000	10500
Тройник № 2	17000	14000	12500

Таким образом, установлено, что укорочение строительной длины сварного тройника приводит к увеличению концентрации напряжений в нём на 3...4 %. При этом равнопрочность тройников и металла труб сохраняется, поскольку в пластическую деформацию вовлекается основной металл самой трубы.

Наличие в сварном шве дефектов приводит к уменьшению ресурса сварного тройника на 20 %.



Рисунок 5 - Сварной тройник III типа с усиливающими накладками

Сварной тройник III типа с усиливающими накладками, представленный на рисунке 5, устанавливаемый на магистральном трубопроводе служит для разделения потоков транспортируемой среды. В месте сварного соединения патрубка и обечайки (основной трубы) обеспечивается повышенная прочность за счёт применения усиливающей накладки. Такой тройник способен выдерживать большее давление по сравнению с тройником без накладки. Стоимость изготовления такого тройника существенно ниже, чем стоимость изготовления бесшовного аналога.

1.2 Сведения о материале изделия

Тройники и отводы изготавливаются из трубной стали марок 10Г2ФБЮ и 09Г2С. Эта сталь обладает высокой теплопроводностью и характеризуется повышенной вязкостью. Основные физико-механические и теплофизические свойства стали 10Г2ФБЮ и 09Г2С представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные физико-механические и теплофизические свойства стали 10Г2ФБЮ и 09Г2С

Твёрдость	Предел прочности	Удельная теплопроводность	Удельная теплопроводность	Плотность	Температура плавления	Температуропроводность × 10 ⁻⁶
НВ	МПа	Вт/м·°С	Дж/кг·°С	кг/м ³	°С	м ² /с
≤240	490	43...80	494	7850	1350	11,08...20,6

Одним из затруднений, возникающих при сварке сталей 10Г2ФБЮ и 09Г2С, является пониженная ударная вязкость околошовных зон в сварных соединениях [31], [36]. Следует отметить существенное влияние химического состава основного металла на ударную вязкость околошовной зоны [4]. Снижение ударной вязкости в большинстве случаев наблюдается по причине перегрева металла, который приводит к росту зерна. Такой перегрев, вызывающий нежелательные изменения структуры основного металла, чаще всего наблюдается при электродуговых способах соединения металлов [20].

Для повышения ударной вязкости применяют термическую обработку сварных соединений «закалка + нормализация». Далее, пластические свойства металла повышают путём применения отпуска сварной

конструкции, который одновременно приводит к уменьшению остаточных напряжений в ней. Поэтому, если исходный основной металл достаточно высокого качества, а сварное соединение выполнено без дефектов и концентраторов напряжений, то при условии правильно выполненной термической обработки сварная конструкция будет хорошо сопротивляться ударным нагрузкам [2], [14], [19], [32].

«Ударная вязкость сварных соединений может снижаться по причине химической и структурной неоднородности металла, образования микротрещин в процессе изготовления заготовок и кристаллизации сварных швов. Кристаллизация сплава происходит на интервале температур, а не при одной температуре, как при кристаллизации чистого металла» [8]. В результате этого возникает химическая неоднородность, которая увеличивается при росте температурного интервала кристаллизации. В процессе ликвации происходит снижение качества металла, а его свойства оказываются неравномерными по объёму [8], [11], [22].

При испытаниях на ударную вязкость по ГОСТ 6996-66 могут быть получены неудовлетворительные значения ударной вязкости сварных соединений из стали 10Г2ФБЮ и 09Г2С. Например, при сварке тройников из стали 10Г2ФБЮ и 09Г2С заказчиком требовались значения ударной вязкости $KCU^{-60}=70$ Дж/см² и $KCV^{-40}=50$ Дж/см². При сварке же образцов были получены значения ударной вязкости $KCU^{-60}=22,5$ Дж/см² и $KCV^{-40}=26,6$ Дж/см², что существенно ниже требований заказчика [36].

Содержание химических элементов в стали 09Г2С представлено в таблице 3. Поскольку сталь 09Г2С обладает малым содержанием углерода, то она обладает хорошей свариваемостью. Конструкции, сваренные из этой стали, могут успешно эксплуатироваться при температурах от -70 °С до +450 °С. Из стали 09Г2С изготавливают заготовки для нефтехимической, строительной и добывающей промышленности. Правильное сочетание

сварки и термической обработки позволяет изготавливать трубопроводную арматуру высокого качества.

Таблица 3 – Содержание химических элементов в стали 09Г2С

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu	As
0,12	0,5...0,8	1,3...1,7	до 0,3	до 0,04	до 0,035	0,3	до 0,008	до 0,3	до 0,008

Сварку стали 09Г2С проводят как без предварительного подогрева, так и с подогревом до 100...120 °С. В процессе сварки стали не происходит её закалки или значительного увеличения зернистости. Также эта сталь не склонна к отпускной хрупкости, проведение отпуска не приводит к снижению вязкости.

Сварку стали 09Г2С можно выполнять электродами, которые предназначены для сварки низколегированных и углеродистых сталей. Примером таких электродов являются электроды типа Э42А и Э50А.

Следует отметить, что при сварке стали 09Г2С наблюдается незначительное упрочнение металла в зоне перегрева. Также необходимо принимать во внимание, что на участке рекристаллизации околошовной зоны может происходить снижение ударной вязкости.

При сварке конструкций из стали 09Г2С обеспечение равнопрочности сварного шва и основного металла выполняется за счёт легирования металла сварного шва марганцем и кремнием.

При увеличении скорости охлаждения сварного шва также повышается прочность соединения, но пластические свойства металла шва снижаются. Также увеличение скорости охлаждения приводит к снижению ударной вязкости металла сварного шва. Скорость охлаждения оказывает существенное влияние на свойства металла сварного шва при выполнении однопроходных швов и при выполнении последнего прохода в многопроходных швах.

Низкое содержание углерода в сварном шве обуславливает хорошую стойкость против кристаллизационных трещин, появление которых в

основном возможно по причине неблагоприятной подготовки (глубокая и узкая разделка). Для того, чтобы предупредить образование в сварном шве пор и непроваров необходимо выполнять тщательную зачистку свариваемых кромок, удаляя ржавчину, масло и другие загрязнения.

Содержание химических элементов в стали 10Г2ФБЮ представлено в таблице 4 [13]. Сталь 10Г2ФБЮ относится к низкоуглеродистым низколегированным трубным сталям. Благодаря эконом-легированию алюминием, ванадием и ниобием достигается класс прочности этой стали К60.

4 – Содержание химических элементов в стали 10Г2ФБЮ

С	Mn	Al	V	Ti	S	P	N	Nb
0,08	1,5	0,035	0,047	0,022	0,002	до 0,008	0,0057	0,040

При выполнении сварных соединений из стали 10Г2ФБЮ наблюдается неоднородность металла шва по составу и структуре. В связи с этим следует отметить также неравномерное распределение остаточных напряжений в металле сварного шва. В научной работе [18] исследовался металл сварного шва, выполненного по трём технологиям. «Первая технология предусматривает ручную дуговую сварку корня шва электродами LB-53U, а заполнение разделки и облицовку – электродами ОК 74.70. Вторая технология предусматривает ручную дуговую сварку корня шва электродами Conarc 52, а заполнение разделки и облицовку – электродами Conarc 74. Третья технология предусматривает механизированную сварку самозащитной порошковой проволокой корня шва – проволокой SuperArc L-56, заполнение и облицовку – проволокой Innershield NR-208 Special.

На микроструктуре сварных соединений, представленной на рисунках 6, 7 и 8, видно, что облицовочные слои имеют грубую крупнозернистую структуру с вкраплениями видманштеттова феррита по границам зерен. В тоже время заполняющие слои имеют мелкодисперсную структуру, что

объясняется перекристаллизацией от повторного теплового воздействия» [18].

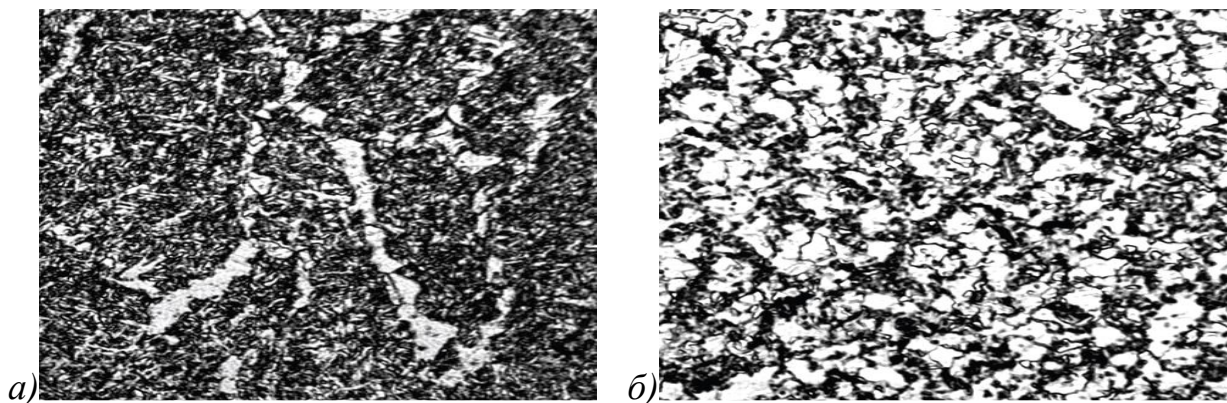


Рисунок 6 – Микроструктура облицовочного (а) и заполняющего (б) слоёв при ручной дуговой сварке электродами ОК 74.70

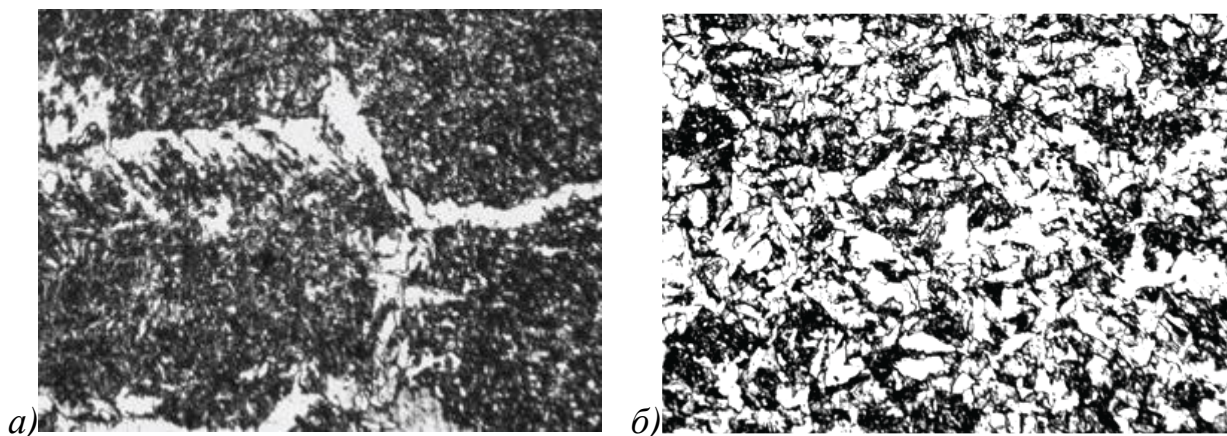


Рисунок 7 – Микроструктура облицовочного (а) и заполняющего (б) слоёв при ручной дуговой сварке электродами Conarc 74

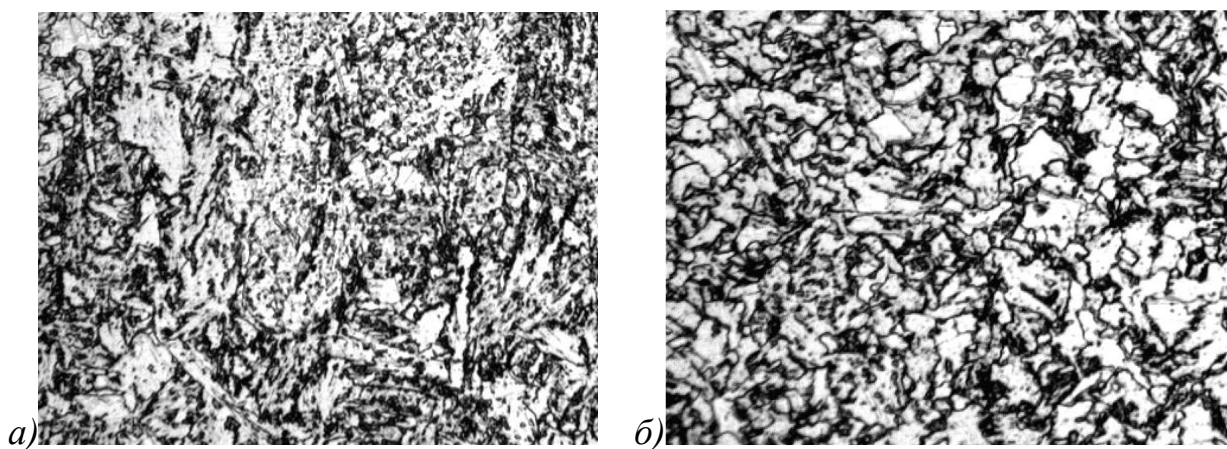
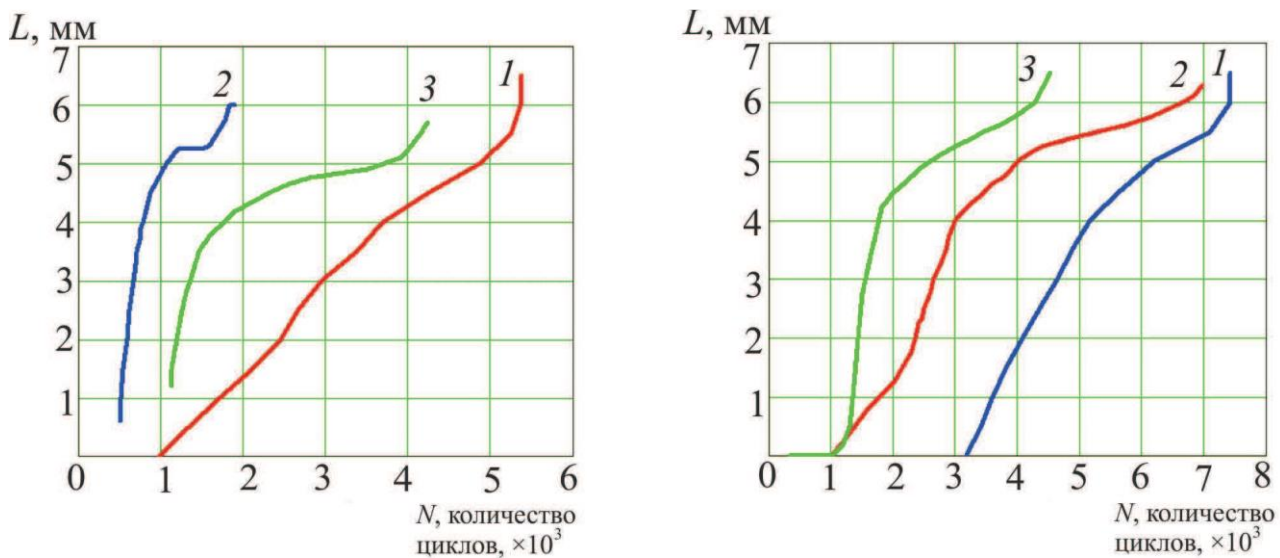


Рисунок 8 – Микроструктура облицовочного (а) и заполняющего (б) слоёв при механизированной сварке самозащитной порошковой проволокой Innershield NR-208 Special

Поскольку облицовочный слой имеет наиболее грубое строение, то зарождение усталостных трещин в нем наиболее вероятно. В зависимости от числа циклов в нём развиваются усталостные трещины различной длины, что демонстрируется диаграммами, представленными на рисунке 9.



- 1 – ручная дуговая сварка корня шва электродами LB-53U, заполнение разделки и облицовка – электродами ОК 74.70;
- 2 – ручная дуговая сварка корня шва электродами Conarc 52, заполнение разделки и облицовка – электродами Conarc 74;
- 3 – механизированная сварка самозащитной порошковой проволокой корня шва – проволокой SuperArc L-56, заполнение и облицовка – проволокой Innershield NR-208 Special

Рисунок 9 – Длина усталостной трещины в облицовочном слое в зависимости от количества циклов нагружения для амплитуды колебаний 1 мм (а) и 1,2 мм (б)

При помощи имитации термического цикла на машине для контактной точечной сварки МТ-1210 исследовали закономерности формирования зоны термического влияния при сварке стали 10Г2ФБЮ [30]. Испытания на ударную вязкость выполняли согласно ГОСТ 9545-78.

Для проведения металлографического анализа применяли микроскоп МИМ-8М, представленный на рисунке 10. Измерение микротвёрдости по ГОСТ 9450-76 выполняли на микротвердомере ПТМ-3, представленном на рисунке 11.



Рисунок 10 – Микроскоп металлографический МИМ-8М



Рисунок 11 – Микротвердомер ПТМ-3

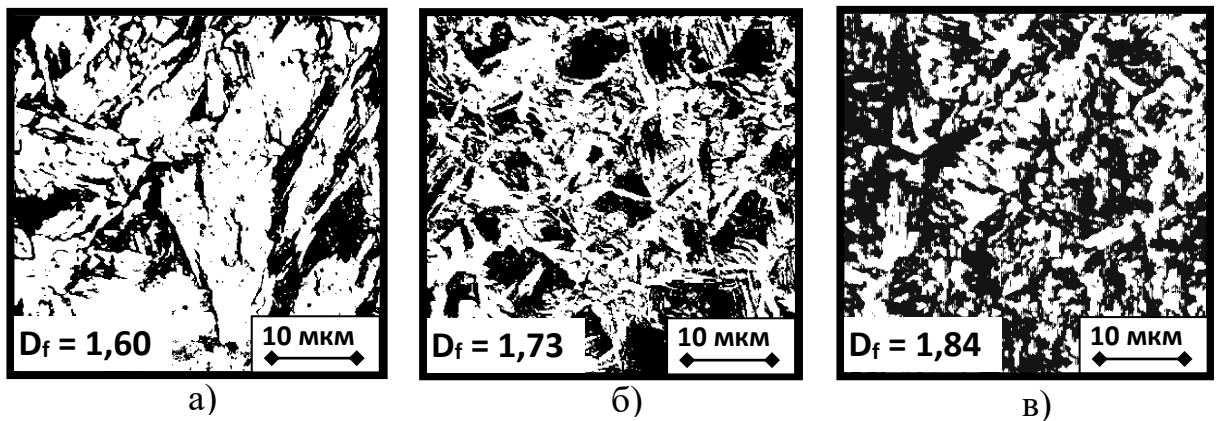


Рисунок 12 – Бинарные фрагменты структуры ЗТВ стали 10Г2ФБЮ

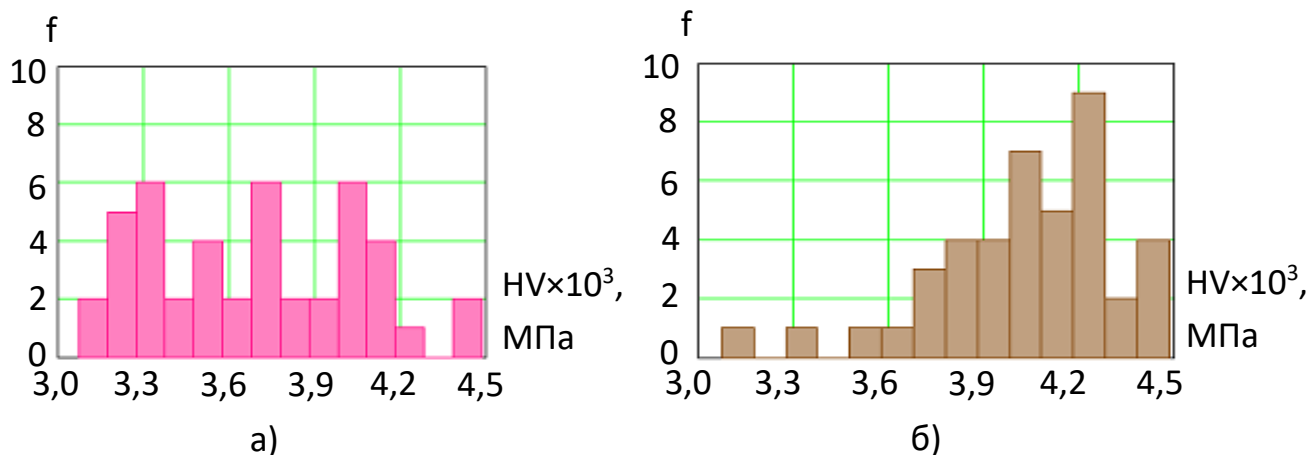


Рисунок 13 – Распределение твёрдости на участке перегрева зоны термического влияния при скорости охлаждения 20 °С/с (а) и 70 °С/с (б)

Для различных скоростей охлаждения получены микроструктуры зоны термического влияния, которые преобразовывались к бинарному фрагменту разрешением 480×480 пикселей, как показано на рисунке 12.

Установлено, что увеличение скорости охлаждения с 20 до 70 °С/с в структуре зоны термического влияния наблюдается увеличение доли мартенсита, что показано на рисунке 13.

1.3 Особенности базовой технологии сварки тройников магистральных трубопроводов

Изготовление сварных тройников выполняется на специализированных предприятиях. К выполнению сварочных работ допускаются сварщики не ниже 5-го разряда, которые прошли аттестацию.

Для изготовления тройников принимаются трубы соответствующего диаметра и толщины стенки из стали 09Г2С и 10Г2ФБЮ. В работе рассмотрен случай выполнения тройника с условным проходом 720 мм и усиливающими накладками, представленный на рисунке 14. Усиливающая накладка изготавливается из стали в зависимости от материала обечайки и ответвления. Толщина обечайки 12 мм, ответвления – 10 мм

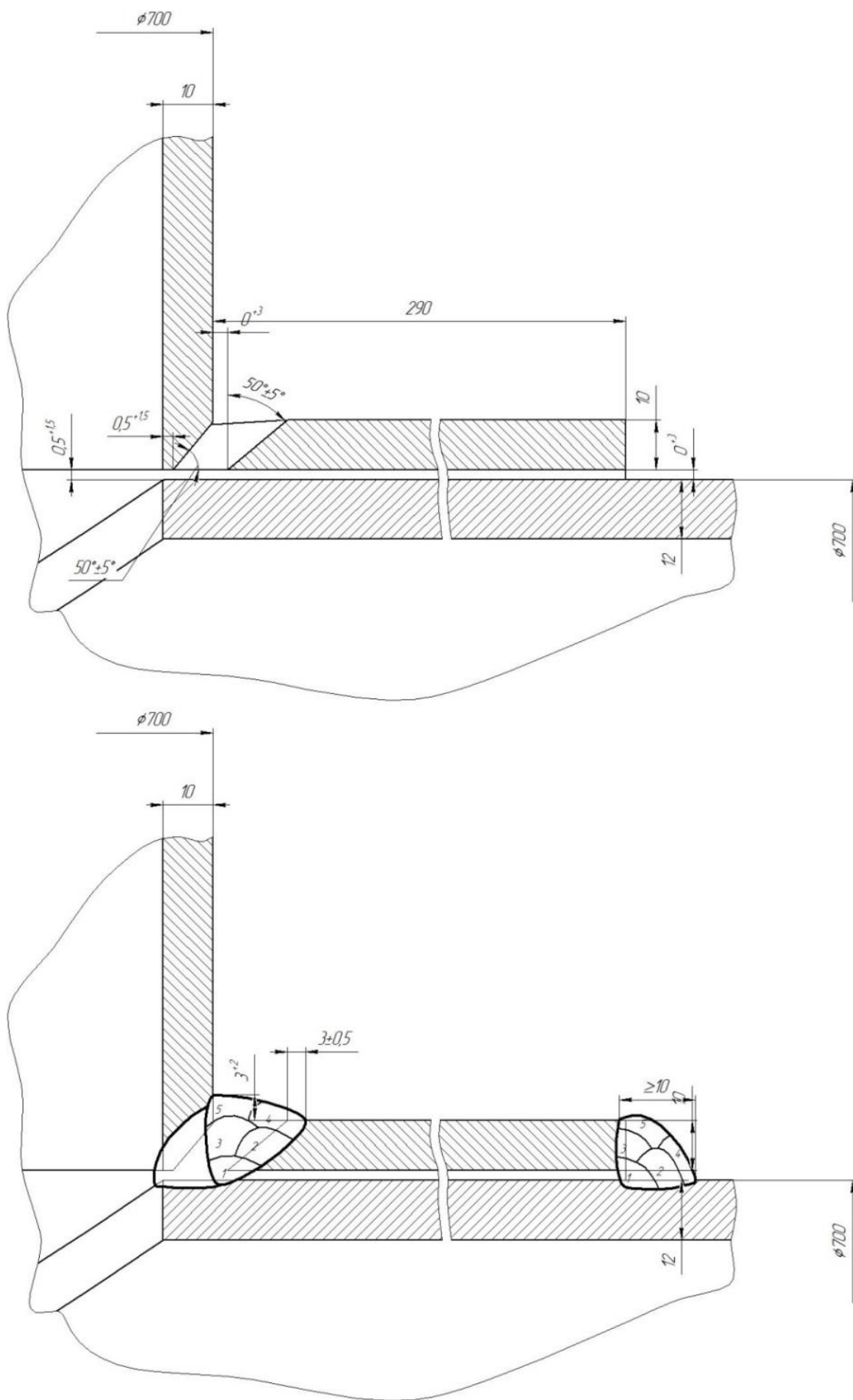


Рисунок 14 – Геометрические размеры тройникового соединения

Патрубок (ответвление) относительно основной трубы (обечайки) должен располагаться таким образом, чтобы расстояние от заводского шва на обечайке до патрубка было не менее 250 мм. При этом отклонение от перпендикулярности должно быть не более 1°, а смещение осей обечайки и патрубка не должно превышать 5 мм.

Отверстие в обечайке (основной трубе) вырезают при помощи механизированной газовой сварки. Для этого применяется машина CG2-800, представленная на рисунке 15. Данная машина позволяет выполнять отверстия диаметром от 90 до 800 мм в обечайке диаметром от 300 до 2000 мм. Толщина стенки обечайки может быть в пределах 5...70 мм. Правильный выбор мундштука обеспечивает отсутствие необходимости механической обработки кромки после реза. В качестве горючего газа используется ацетилен или пропан. Допуск овальности реза составляет ± 1 мм, чистота поверхности резания – не менее 12,5.



Рисунок 15 – Специализированная машина для вырезки отверстий в трубах CG2-800

Обрезку торца патрубка выполняют с применением седельной машины «Saddle Machine» модели 5SA, представленной на рисунке 16. Эта машина позволяет получать точный и качественный рез на трубах диаметром 630...720 мм.



Рисунок 16 – Седельная машина «Saddle Machine» модель 5SA

Сварку ведут на постоянном токе прямой полярности («+» - на электроде). Параметры режима сварки представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры режима и сварочные материалы при изготовлении сварных тройников

Слои	Марка электрода	Ø, мм	Полярность	Ток, А
Корневой	ОК-53.70 или LB-52U	2,5	обратная	70 – 90
		3,2		80 – 120
Заполняющие	ОК 53.70	3,2	обратная	90 – 120
		4		130 – 170
Облицовочный	ОК 53.70	3,2	Обратная	80 – 110
		4		130 – 160

«Патрубок следует располагать вертикально относительно обечайки. При выполнении каждого валика сварного шва его следует разбивать на 6 участков. Сварку каждого участка выполняют таким образом, чтобы каждый последующий участок был диаметрально противоположен ранее сваренному участку. При этом направление сварки каждого участка должно совпадать с направлением сварки предыдущего участка» [6].

Смещение «замков» смежных слоёв относительно друг друга должно быть 25...30 мм.

После приварки патрубка необходимо до установки и приварки усиливающих накладок контролировать сварной шов с применением визуального метода и неразрушающим контролем.

В качестве источника питания применяется выпрямитель ВД-252, представленный на рисунке 17.



Рисунок 17 – Сварочный выпрямитель ВД-252

Сварку следует выполнять за один цикл без перерывов двумя сварщиками. В процессе сварки контролируют межслойную температуру, которая должна быть не ниже 100 °С. В случае снижения температуры или при вынужденном перерыве необходимо выполнить сопутствующий подогрев до температуры 150 °С. В процессе сварки необходимо выполнять послойную очистку сварного шва с применением механической

шлифмашины. Каждый слой шва необходимо подвергать визуальному контролю. В случае обнаружения видимых дефектов их следует устранить механической обработкой.

Качество сварки контролируется следующими методами:

- визуально-измерительный контроль места сварки в объёме 100%;
- радиографический контроль в объёме 100%.

Осмотру с целью выявления внешних дефектов должны подвергаться все сварные швы независимо от применения других методов контроля. Осмотр сварных швов должен производиться по всей их протяженности с двух сторон, за исключением мест, недоступных для осмотра. Невооруженным глазом или с применением лупы с не менее чем четырехкратным увеличением проверяют наличие трещин, подрезов, свищей, прожогов, натеков, не проваров корня и кромок.

Не допускается сваривать заготовки и сборочные единицы до устранения имеющихся в зоне сварного соединения недопустимых вмятин, заусенцев, окалины, ржавчины и т. п.

Качество подготовки кромок под сварку определяется чистотой кромок, правильностью их разделки.

Перед контролем сварной шов и прилегающие к нему поверхности должны быть очищены от шлака и других загрязнений, затрудняющих осмотр, на ширину не менее 20 мм по обе стороны шва.

Дефекты, выявленные внешним осмотром, должны быть устранены перед проведением контроля другими методами.

Визуальный контроль сварных соединений проводится невооруженным глазом или с помощью оптических приборов. Расчетные соединения должны осматриваться с применением лупы десятикратного увеличения.

При внешнем осмотре выявляются наплывы, подрезы, прожоги, незаваренные кратеры, наружные трещины швов и околошовной зоны, непровары корня шва, пористость.

По результатам визуального контроля должны выполняться следующие требования:

- сварной шов должен иметь гладкую структуру с плавным переходом к основному металлу, при этом неровность не должна быть более 0,5 мм (если шов является легкодоступным) или не более 1 мм (если шов является труднодоступным);

- должны отсутствовать скопления пор и шлаковых включений, свищи, наплывы по всей длине сварного шва;

- не допускается наличие незаваренных кратеров.

По результатам рентгеновского контроля должны выполняться следующие требования:

- не допускается наличие непроваров в корне шва глубиной более 3 мм;

- не допускаются поры и шлаковые включения размером более 3 мм;

- не допускаются скопления пор более 5-штук на 1 см².

Если недопустимые дефекты были обнаружены, необходимо их устранить. Удаление дефекта выполняется механическим способом (абразивным инструментом, вырубкой, фрезеровкой) по всей длине дефекта плюс 10 мм в каждую сторону от дефекта. Запрещено выплавлять дефект дуговыми способами. Допустимо применение плазменно-дуговых процессов.

Если обнаружены сквозные трещины, перед их заваркой следует засверлить концы, чтобы исключить возможность дальнейшего роста трещины при нагреве от сварки. Заваривание дефектного участка следует выполнять на всю глубину.

Не допускается исправление дефектного участка более двух раз.

Сварка по базовой технологии обладает следующими недостатками:

– значительное количество дефектов сварки, которые требуют затрат времени и материалов для своего устранения;

– малая производительность ручной дуговой сварки;

– тяжёлые условия труда сварщика, которые сказываются на его здоровье, а также производительности и качестве сварки.

1.4 Обоснование выбора способа сварки

При выборе способа сварки необходимо руководствоваться:

- свойствами материала свариваемых деталей;
- толщиной свариваемых деталей;
- габаритами выполняемой конструкции;
- овышением производительности и снижением издержек при сварке конструкции.

Исходя их свойств материала свариваемых деталей, толщины и габаритов изделия в качестве возможных способов сварки можно рассмотреть:

- ручная дуговая сварка штучными электродами;
- механизированная и автоматическая сварка в защитных проволокой сплошного сечения;
- механизированная и автоматическая сварка в защитных порошковой проволокой;
- механизированная сварка самозащитной порошковой проволокой;
- сварка неплавящимся электродом в инертном газе.

Самым распространенным способом сварки в настоящее время можно считать ручную дуговую сварку, схема выполнения которой представлена на рисунке 18.



Рисунок 18 – Схема выполнения ручной дуговой сварки штучными электродами

Ручная дуговая сварка имеет ряд преимуществ, которые позволили получить ей широкое распространение во многих отраслях промышленности:

- относительная дешевизна и простота сварочного оборудования;
- возможность проведения сварки с использованием уже имеющегося на предприятии оборудования;
- построение технологического процесса с применением ручной дуговой сварки не требует глубоких профессиональных знаний.

В настоящее время применение ручной дуговой сварки планомерно сокращается. Это обусловлено её недостатками, влияние которых следует учитывать в современном производстве:

- увеличенные потери сварочного материала на угар, разбрызгивание и образование огарков;
- низкая производительность процесса сварки, которая обусловлена малой производительностью ручной дуговой сварки. В настоящее время ручная дуговая сварка исчерпала возможности повышения производительности за счёт корректировки параметров режима и назначения оптимальных сварочных материалов;
- недостаточная стабильность качества сварки, обусловленная пористостью, непроварами и возникновением трещин из-за перегрева основного металла;
- тяжёлые условия труда сварщика, обусловленные вредностью сварочного аэрозоля, образующегося при горении сварочных электродов.

В качестве преимуществ сварки проволокой сплошного сечения в смеси защитных, схема выполнения которой представлена на рисунке 19, следует отметить [26], [27]:

- производительность, которая выше, чем у ручной дуговой сварки;
- в процессе сварки не образуется шлаковая корка, что положительно сказывается на качестве сварных швов;

- расплавленный металл обладает повышенной по сравнению с ручной дуговой сваркой и сваркой порошковой проволокой вязкостью, что позволяет выполнять сварку в различных пространственных положениях;
- оборудование для механизированной сварки в защитных газах проволокой сплошного сечения несколько сложнее, чем для ручной дуговой сварки, но намного проще, чем для сварки неплавящимся электродом, кроме того, сплошная проволока не заламывается, как это деталей порошковая проволока.

Недостатками механизированной сварки проволокой сплошного сечения в защитных газах являются [26], [27]:

- наличие газовых баллонов и механизма подачи проволоки, что несколько усложняет способ сварки и снижает его мобильность;
- повышенное разбрызгивание электродного металла ограничивает ток сварки и не позволяет повысить производительность сварочных работ за счёт перехода на форсированные режимы сварки;
- из-за пониженной пластичности расплавленного металла повышается вероятность получения трещин.

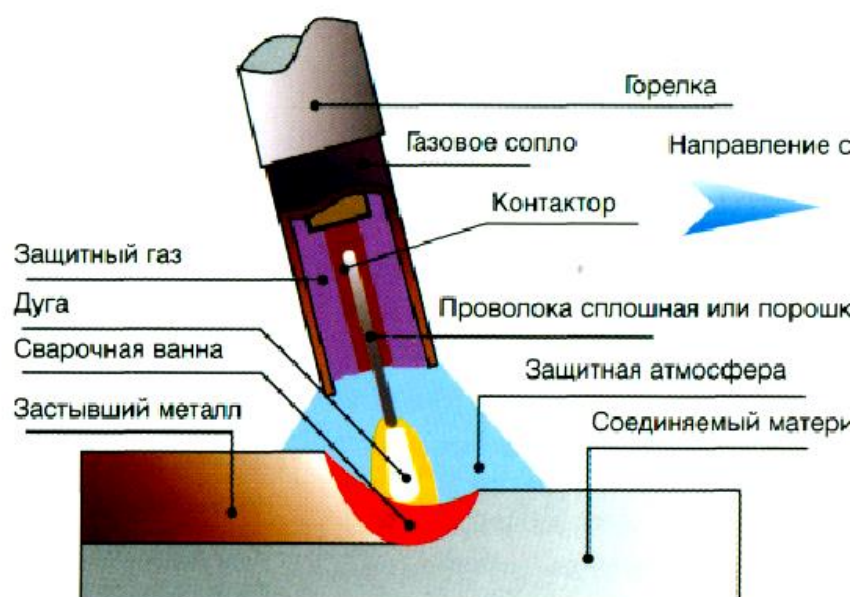


Рисунок 19 – Схема выполнения механизированной сварки проволокой сплошного сечения в защитных газах

Расширенными технологическими возможностями обладает механизированная сварка порошковой проволокой в защитных газах [28], преимуществами которой являются:

- возможность повышения производительности по сравнению со сваркой проволокой сплошного сечения;
- существенное повышение стойкости против трещинообразования;
- улучшение качества и внешнего вида сварных швов;
- уменьшение теплового перегрева основного металла.

Однако этот способ сварки сочетает в себе недостатки сварки порошковыми проволоками и сварки в защитных газах [39]:

- остаётся необходимым применение газового оборудования, что снижает мобильность сварщика и ухудшает качество газовой защиты при сварке на открытом воздухе;
- порошковая проволока склонна к заломам и требует применения более сложного механизма подачи, сама подача проволоки может осуществляться на меньшее расстояние, чем при сварке проволокой сплошного сечения.

Сварка самозащитной порошковой проволокой предоставляет значительные преимущества при организации технологического процесса, которые наиболее полно проявляются именно в условиях монтажа и ремонта [4], [29], [37]. Схема выполнения сварки представлена на рисунке 20. В числе преимуществ сварки самозащитными порошковыми проволоками можно обозначить:

- отсутствие газовой аппаратуры, что повышает мобильность способа сварки при выполнении монтажных и ремонтных работ;
- улучшение защиты шва при сварке на открытом воздухе;
- возможность повышения производительности сварки по сравнению со сваркой проволоками сплошного сечения.

Однако применение самозащитных порошковых проволок ограничивается из-за множественных недостатков:

- самозащитная проволока склонна к заломам, что предъявляет повышенные требования к подающему механизму и уменьшает расстояние, на которое может быть подана проволока;
- горение самозащитной проволоки происходит неравномерно, оболочка проволоки расплавляется, а сердечник проволоки может просыпаться в сварочную ванну и становится причиной образования пор и шлаковых включений;
- наличие шлака на поверхности сварного шва приводит к необходимости зачистки при выполнении многослойных швов, что снижает производительность выполняемых работ;
- из-за повышенной текучести шлака при сварке порошковой самозащитной проволокой высока опасность образования шлаковых карманов, усложняется сварка в узкую разделку и сварка корневого слоя шва;
- высокая текучесть металла сварочной ванны существенно усложняет выполнение вертикальных и потолочных швов.



Рисунок 20 – Схема выполнения сварки самозащитной порошковой проволокой

При сварке неплавящимся электродом в среде инертных газов, схема выполнения которой представлена на рисунке 21, получается самое высокое

качество сварных швов. В числе преимуществ сварки неплавящимся электродом в инертных газах следует отметить:

- качественную защиту сварочной ванны;
- возможность сварки в узкую разделку и высокое качество выполнения корневого слоя шва;
- при сварке не образуется шлаковая корка, что повышает качество сварки;
- низкая склонность металла сварного шва к образованию трещин и пор.

В числе недостатков сварки следует отметить:

- высокую стоимость защитного газа;
- необходимость в высокой квалификации сварщика;
- высокую стоимость сварочного оборудования.

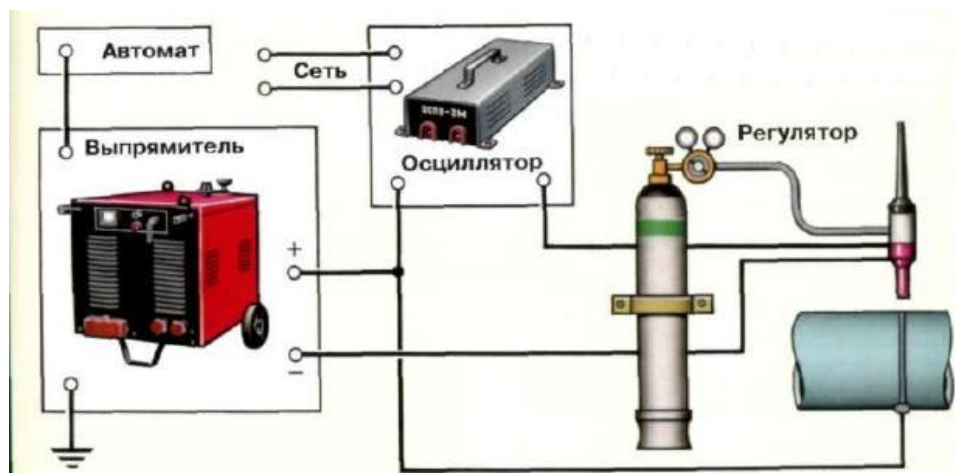


Рисунок 21 – Схема выполнения сварки неплавящимся электродом в защитных газах

На основании анализа преимуществ и недостатков каждого способа для построения проектной технологии предлагаем применить механизированную сварку в защитных газах проволокой сплошного сечения.

В ходе выполнения настоящей выпускной квалификационной работы следует предусмотреть меры по повышению эффективности выбранного способа сварки за счёт устранения его недостатков, которые были отмечены выше.

1.5 Постановка задач на диссертационное исследование

Базовая технология изготовления сварного тройника предусматривает применение ручной дуговой сварки, недостатками которой являются:

- значительное количество дефектов сварки, которые требуют затрат времени и материалов для своего устранения;
- малая производительность ручной дуговой сварки;
- тяжёлые условия труда сварщика, которые сказываются на его здоровье, а также производительности и качестве сварки.

Также анализ свойств сварных соединений из стали 09Г2С и 10Г2ФБЮ показал проблему снижения ударной вязкости сварных швов, которую тоже нужно решить.

При анализе альтернативных способов сварки были рассмотрены: ручная дуговая сварка штучными электродами, механизированная и автоматическая сварка в защитных проволокой сплошного сечения, механизированная и автоматическая сварка в защитных порошковой проволокой, механизированная сварка самозащитной порошковой проволокой, сварка неплавящимся электродом в инертном газе. На основании анализа преимуществ и недостатков каждого способа для построения проектной технологии предлагаем применить механизированную сварку в защитных газах проволокой сплошного сечения.

Задачами диссертационного исследования являются:

- повышение ударной вязкости сварных швов при изготовлении сварных тройников магистральных трубопроводов;
- повышение эффективности выбранного способа сварки применительно к изготовлению сварных тройников магистральных трубопроводов;
- выбор оборудования для повышения производительности и автоматизации операций сварки тройников магистральных трубопроводов.

2 Повышение ударной вязкости сварных швов при изготовлении сварных тройников магистральных трубопроводов

В качестве объекта исследования был принят штампосварной тройник размером 1020×325 мм, который изготавливался из стали 10Г2ФБЮ с толщиной стенки 22 мм. Удлинительное кольцо толщиной 14 мм изготавливалось из стали 09Г2С. Из кольцевого сварного шва по направлению вдоль оси трубы выполнялась вырезка образцов для проведения для макро- и микроструктурных исследований.

Химический состав участков сварного шва определяли спектральным анализом с использованием оптико-эмиссионного спектрометра ДФС-500, который представлен на рисунке 22. Макроструктуру сварного шва исследовали согласно ГОСТ 57180-2016. При этом выполняли травление образцов в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Съемку и анализ микроструктуры образцов проводили с использованием микроскопа Axio Observer D1, который представлен на рисунке 23. Микротвёрдость металла участков сварного шва измеряли твердомером FM-800, представленным на рисунке 24.



Рисунок 22 – Оптико-эмиссионный спектрометр для анализа металлов ДФС-500



Рисунок 23 – Микроскоп Axio Observer D1 для проведения металлографических исследований



Рисунок 24 – Твердомер FM-800

Для сварки применяли электроды LB52U (корневой проход) и электродов BOENLER FOX V65 (заполняющий и облицовочный слой). Эти электроды имеют повышенное содержание никеля, который улучшает показатели прочности.

При анализе химического состава шва не было обнаружено отклонений в составе от заявленного химического состава наплавленного металла, который представлен в таблице 6.

На образце, представленном на рисунке 25, заполнение разделки выполнялось в три прохода. При этом следует обратить внимание, что сварной шов выполнен со смещением, т.е. наблюдается нарушение соосности между нижним и верхним валиками. Поскольку сварной шов имеет неравномерную структуру, то сварной образец разрушается по участкам, которые имеют наиболее хрупкую структуру.

Таблица 6 – Содержание химических элементов в участках сварного шва

Наименование образцов	Содержание химических элементов, %										
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Al	V	Mo	Nb	Ti
Наружный шов	0,1	1,43	0,44	0,07	0,54	0,1	0,005	0,014	0,17	0,01	0,007
Внутренний шов	0,08	0,98	0,54	0,05	0,04	0,06	0,002	0,01	0,012	0,006	0,01
Середина шва	0,09	1,12	0,59	0,05	0,31	0,06	0,003	0,01	0,015	0,01	0,008

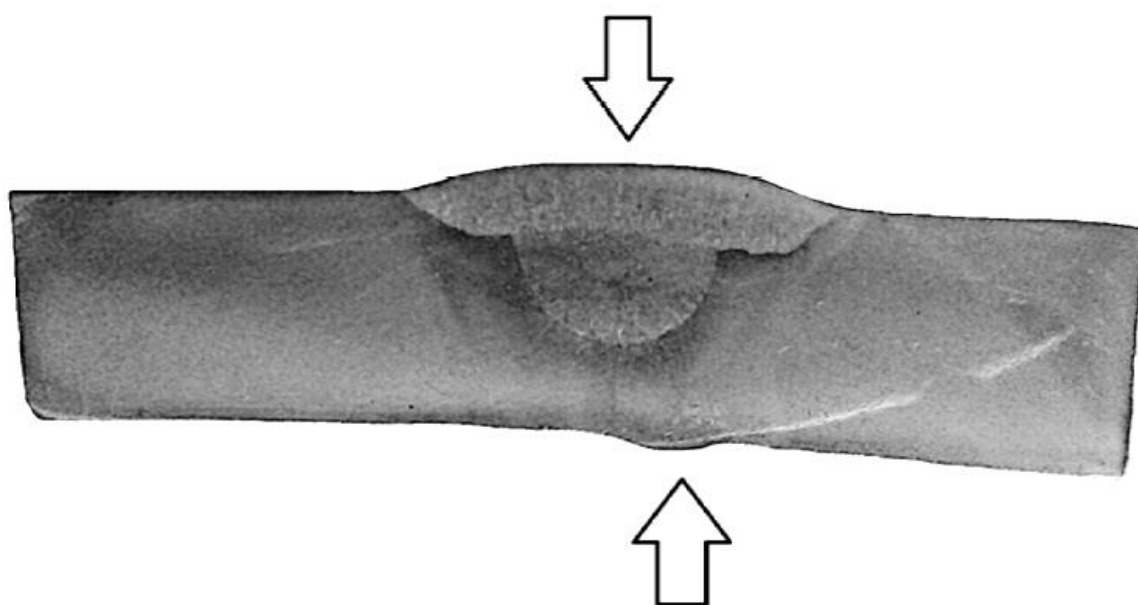


Рисунок 25 – Макрошлиф сварного шва и линия смещения

В результате проведённого исследования микроструктуры сварных швов выявлена крупнозернистая структура с выделением видманштетт феррита. Такая структура негативно влияет на механические свойства металла сварного шва [3], [22], [23], [35]. Микроструктура металла сварного шва на расстоянии 2,5 мм от наружной поверхности трубы представлена на рисунке 26. На рисунке 27 представлена микроструктура металла сварного шва на расстоянии 4 мм от наружной поверхности трубы. Сравнение этих рисунков позволяет заключить, что с увеличением глубины металла уменьшается содержание грубоигольчатой структуры. Иными словами, структурные составляющие распределяются по высоте сварного шва неравномерно, что подтверждается ранее проведёнными исследованиями [5], [10].

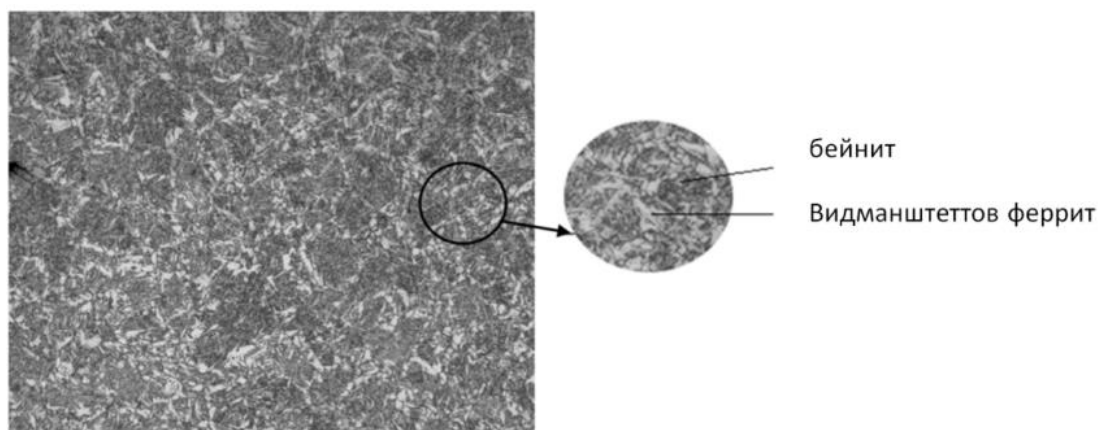


Рисунок 26 – Микроструктура металла сварного шва на расстоянии 2,5 мм от наружной поверхности трубы (увеличение 100 крат)

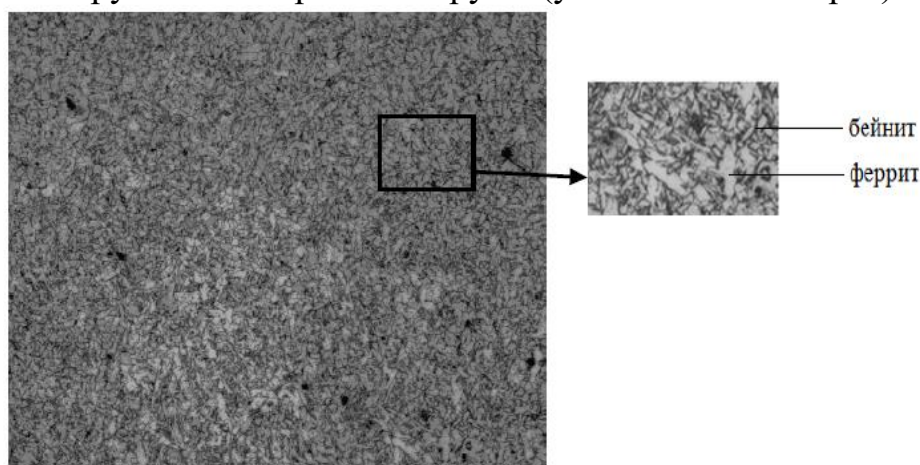


Рисунок 27 – Микроструктура металла сварного шва на расстоянии 4 мм от наружной поверхности трубы (увеличение 100 крат)

Выполнялось исследование влияния количества проходов на структуру металла сварного шва. Выполняли сварку образцов в 3 и 4 прохода. Анализ микроструктуры образцов, представленных на рисунке 28-а и 28-б, позволил заключить, что увеличение числа проходов при сварке уменьшает образование грубой видманшеттовой структуры.

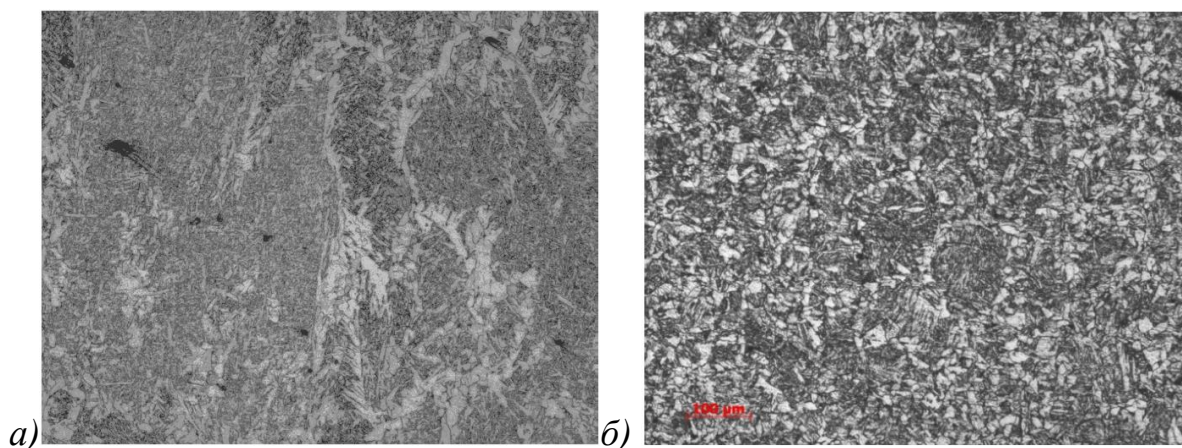


Рисунок 28 – Микроструктура металла сварного шва (увеличение 100 крат) после сварки в три прохода (а) и после сварки в четыре прохода (б)

По результатам замера микротвёрдости также можно судить о положительном влиянии последних проходов на структуру металла сварного шва. На рисунке 29 представлены результаты измерения микротвёрдости на образцах после сварки в три прохода. На рисунке 30 представлены результаты измерения микротвёрдости на образцах после сварки в четыре прохода.

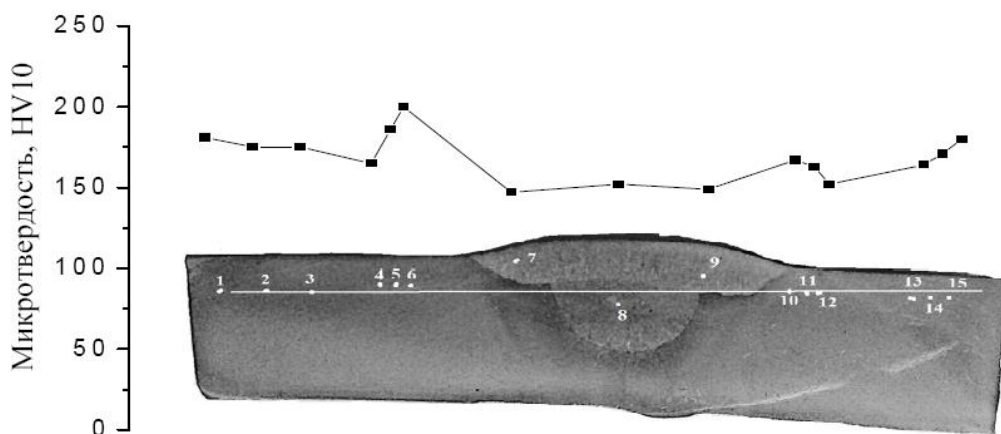


Рисунок 29 – Участки и результаты замера микротвёрдости при сварке в три прохода

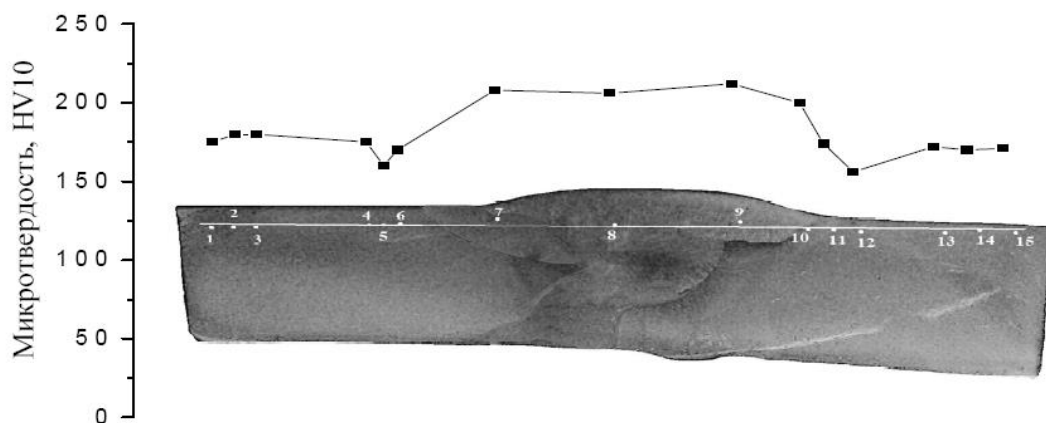


Рисунок 30 – Участки и результаты замера микротвёрдости при сварке в четыре прохода

Из рисунков 29 и 30 видно, что наибольшее значение твёрдости наблюдается в области наложения последнего валика, который не подвергается перекристаллизации, как предыдущие валики. При испытаниях образцов, выполненных с использованием четырёх валиков, в ходе ударных испытаний установлено, что значение ударной вязкости соответствует требованиям стандарта и заказчика. Заказчиком требовалось получить $KCU^{-60}=70$ Дж/см² и $KCV^{-40}=50$ Дж/см². На образцах, выполненных с применением четырёх проходов, получены значения ударной вязкости $KCU^{-60}=234$ Дж/см² и $KCV^{-40}=179$ Дж/см².

Выводы по второму разделу

Таким образом, можно сделать заключение о положительном влиянии отжигающего валика на механические свойства сварных соединений при изготовлении тройников из стали 10Г2ФБЮ и 09Г2С.

Полученные результаты согласуются с ранее проведёнными исследованиями, проведёнными за рубежом [42].

3 Повышение эффективности механизированной сварки в защитных газах проволокой сплошного сечения тройников магистральных газопроводов

3.1 Применение импульсного управления дугой для повышения эффективности механизированной сварки в защитных газах

Повышение стабильности горения сварочной дуги и её технологических свойств может быть осуществлено с использованием импульсного управления [16]. Особенно актуально повышение стабильности горения дуги для сварки в положениях, отличных от нижнего. Исследования импульсного управления дугой выполняется по следующим направлениям:

- импульсная подача сварочной проволоки;
- сварка модулированным током;
- сварка пульсирующей дугой;
- импульсно-дуговая сварка.

Следует выполнять снижение величины тока при сварке в верхнем и вертикальном положениях. В тоже время для того, чтобы обеспечить требуемые технологические свойства сварочной ванны и сварочной дуги необходимо увеличивать сварочный ток выше значений, необходимых для пространственного удержания сварочной ванны. Для того, чтобы разрешить это противоречие, приходится выполнять с электродом различные манипуляции, которые определяют технику ведения сварки.

Импульсная модуляция позволяет выполнить противоречивые требования к величине сварочного тока. По сравнению со сваркой стационарной дугой при импульсной модуляции обеспечивается:

- улучшение формирования сварного шва при сварке в различных пространственных положениях;
- дегазация сварочной ванны;
- уменьшение остаточных напряжений и деформаций в сварном шве;

- повышение механических свойств сварных соединений.

Технологическая устойчивость горения сварочной дуги при сварке модулированным током обеспечивается за счёт применения дополнительных импульсов, которые протекают за время основной паузы. Длительность и величина этих импульсов позволяют получить равномерное плавление проволоки и качественное формирование корневого слоя шва.

Сварка пульсирующей дугой обеспечивает струйный перенос электродного металла. Это процесс позволяет эффективно управлять геометрией сварного шва, изменяя контуры шва и глубину провара. Подача импульсов высокого напряжения позволяет получить значительную глубины проплавления основного металла, при этом она термического влияния не увеличивается. Стабильность горения дуги обеспечивается фоновым током, который протекает между импульсами повышенного тока. Импульсная дуга позволяет увеличить проплавление и уменьшить термическое воздействие на основной металл, однако производительность сварки при этом уменьшается на 20...40 % [16].

При импульсной подаче сварочной проволоки может обеспечиваться двумя способами. При первом способе происходит генерирование импульсов подачи за счёт применения специальных электродвигателей, осуществляющих подачу проволоки. При втором способе в механизм подачи проволоки дополнительно вводят механический модулятор.

Повышение производительности и качества при импульсной подаче сварочной проволоки объясняется следующим [21], [38], [43], [45]:

- появляется возможность осуществить управление образованием капель электродного металла, при этом не происходит дополнительных затрат электрической энергии на перегрев капель расплавленного металла;
- при сварке отсутствуют импульсы повышенного тока при коротком замыкании капли металла на свариваемое изделие;

- наблюдается увеличение тока в импульсе подачи капли на изделие, что способствует повышению коэффициента плавления без увеличения затрат электрической энергии.

Перенос капель расплавленного металла при импульсной подаче сварочной проволоки происходит в четыре этапа, представленные на рисунке 31. Сварка выполняется проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм в среде углекислого газа. Частота подачи проволоки составляет 30 с^{-1} .

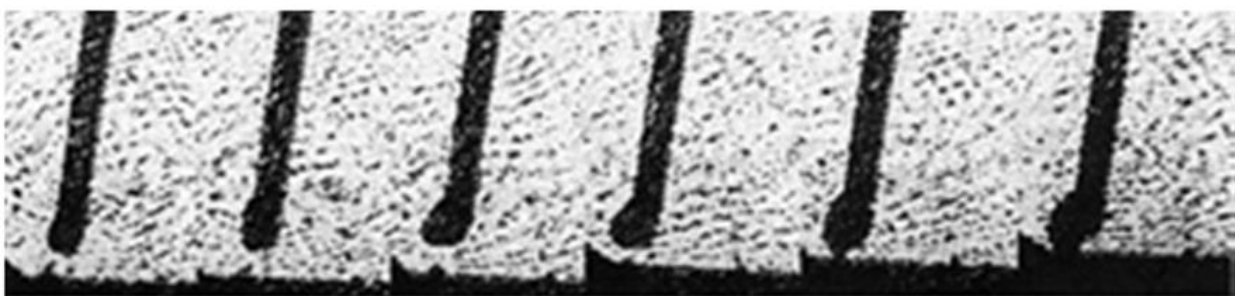


Рисунок 31 – Видеограмма переноса электродного металла при импульсной подаче сварочной проволоки

На первом этапе вследствие плавления электродной проволоки на её конце формируется капля расплавленного металла.

На втором этапе электродная проволока с находящейся на её конце каплей расплавленного металла движется в направлении сварочной ванны.

На третьем этапе происходит торможение сварочной проволоки, при этом капля расплавленного металла продолжает своё движение в сторону сварочной ванны.

На четвёртом этапе происходит касание капли расплавленного металла сварочной ванны с образованием жидкой перемычки между проволокой и расплавленным металлом сварочной ванны.

Применение защитной газовой смеси «аргон + углекислый газ» позволяет значительно повысить эффективность сварки с импульсной подачей проволоки [24], [40], [41]. При этом значительно снижается расход электродного металла на разбрызгивание и угар [44].

Импульсно-дуговая сварка получила применение в таких процессах, как STT, SpeedPulse, ColdArc, ForceArc.

В частности, технология SpeedPulse сочетает в себе производительность струйного переноса электродного металла и качество выполнения соединений импульсной сварки. Сварочный процесс STT, предложенный фирмой «Lincoln Electric», является результатом многолетних исследований в области управляемого переноса электродного металла при сварке. Процесс STT является развитием процесса переноса металла короткими замыканиями, но выгодно отличается от него возможностью эффективного воздействия на характер переноса [1].

Ещё одним способом повышения эффективности управления горением дуги является механизированная сварка сжатой короткой дугой. Формированное горение сжатой короткой дуги по сравнению со струйным переносом позволяет:

- получить глубокое проплавление, которое достигается за счёт увеличения давления дуги на сварочную ванну;
- при применении короткой дуги отсутствуют подрезы в сварном шве;
- увеличение коэффициента наплавки приводит к повышению производительности сварки;
- снижаются требования к разделке кромок, величину которой можно уменьшить при сварке сжатой короткой дугой.

Осциллограммы тока и напряжения при сварке с применением технологии SpeedArc и RapidArc представлены на рисунке 32. В обоих случаях сварка выполняется с короткими замыканиями, в момент которых наблюдается уменьшение тока. Это позволяет уменьшить разбрызгивание электродного металла и улучшить формирование сварного шва.

Макрошлифы соединений, представленных на рисунке 33, показывают, что в обоих случаях обеспечивается глубокое проплавление.

Сварка короткой сжатой дугой может быть применена при выполнении конструкций из толстолистового металла, в узкую разделку, для выполнения корневого слоя шва, легированных сталей.

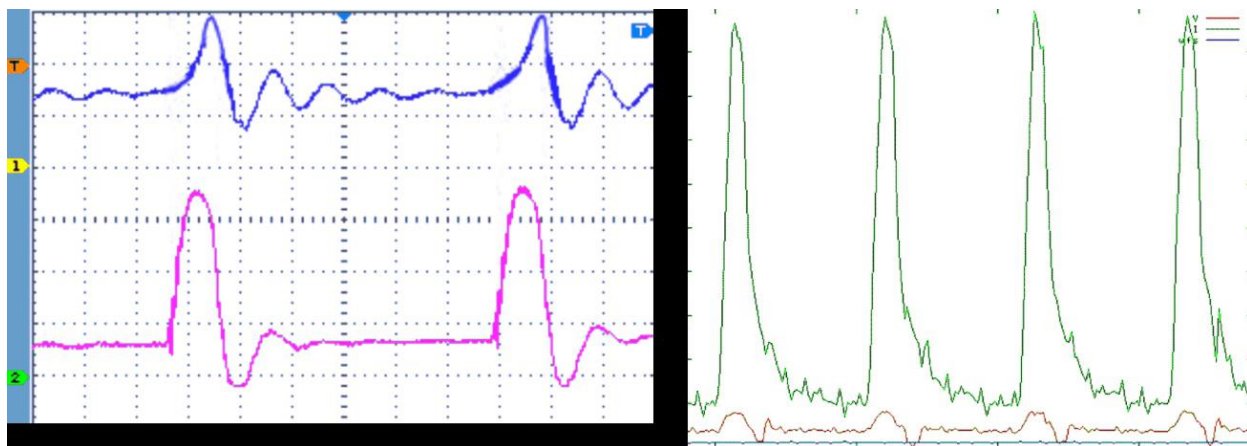


Рисунок 32 – Осциллограммы тока и напряжения при сварке по технологии SpeedArc (слева) и RapidArc (справа)

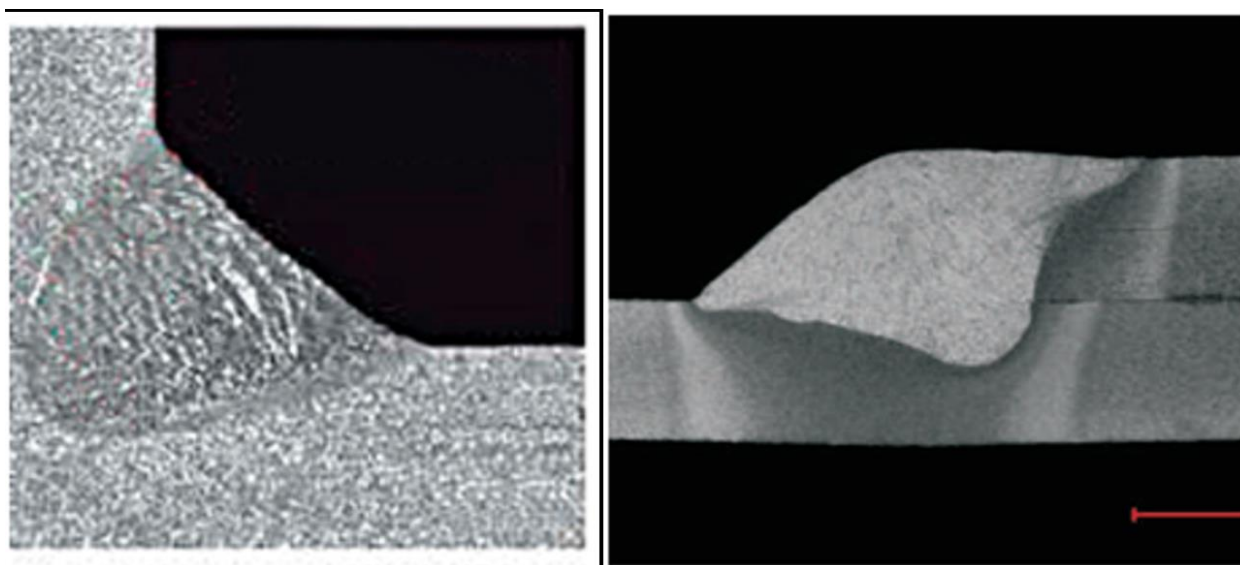


Рисунок 33 – Макрошлифы, полученные при сварке по технологии SpeedArc (слева) и RapidArc (справа)

Одним из недостатков рассмотренных способов управления импульсной дугой является высокая стоимость источников питания, обеспечивающих сварку по предлагаемым процессам.

3.2 Исследование влияния структуры сварного шва на его свойства

Выполнение сварных швов при изготовлении конструкций магистральных трубопроводов является ответственной задачей, от решения которой зависит безопасность эксплуатации всего трубопровода. Аварии на трубопроводах в основном происходят по причине образующихся при сварке дефектов, которые в ходе длительной эксплуатации трубопровода начинают себя проявлять.

Для того, чтобы повысить качество сварных соединений при выполнении элементов трубопроводов продолжаются исследования в области взаимосвязи механических свойств металла сварного шва и дефектов при сварке [12], [33], [34].

«Значительное влияние на свойства сварных соединений оказывают неметаллические включения, которые обязательно присутствуют в металле сварного шва. Эти включения играют роль концентраторов напряжений и в процессе эксплуатации трубопровода могут привести к образованию трещин и впоследствии, к разрушению трубопровода» [34].

Исследования выполняли на сварных образцах из стали 10Г2ФБЮ. Сварные швы выполняли с применением технологии STT проволокой Super Arc L-56 диаметром 1,14 мм в смеси защитных газов «аргон + углекислый газ».

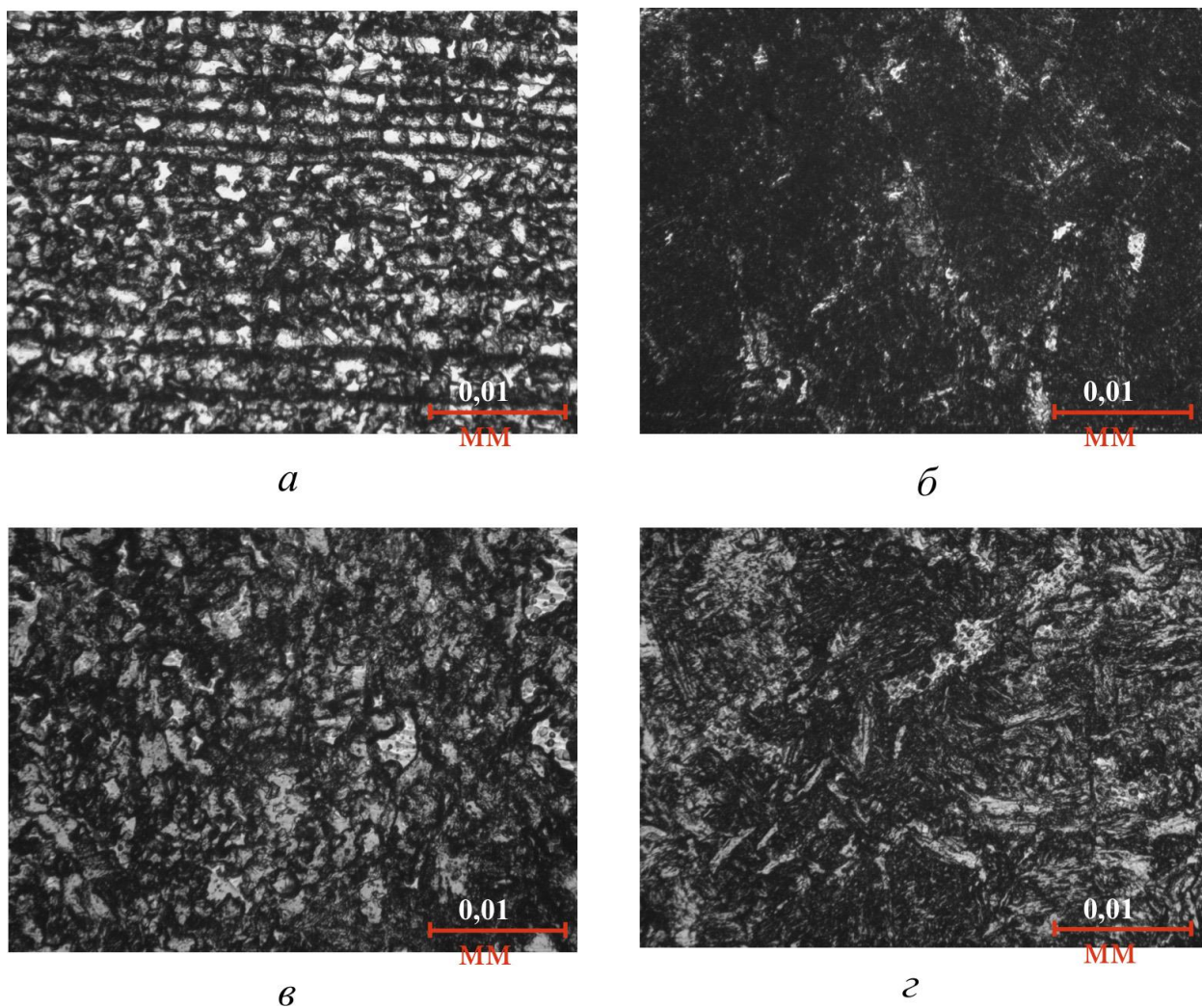
В ходе металлографических исследований по сечению сварного шва обнаружены следующие изменения структуры, представленной на рисунке 34:

- структура основного металла – мелкозернистая ферритно-перлитная;
- корневой слой шва – ферритно-перлитная структура, в которой преобладает перлитная фаза, имеются включения игольчатого феррита (видманштетта);

- заполняющие слои характеризуются увеличением доли ферритной фазы, структура зерна близка к структуре основного металла;
- облицовочный слой имеет структуру с преобладанием игольчатого феррита (видманштетта).

Особенности структуры различных слоёв сварного шва представлены в таблице 7.

В заполняющих слоях содержится значительное количество неметаллических включений, что видно по данным таблицы 7. Это объясняется выполнением в несколько проходов и влиянием повторного термического цикла.



а – основной металл; *б* – корень шва; *в* – заполняющие слои; *г* – видманштеттова структура

Рисунок 34 – Микроструктура стали 10Г2ФБЮ

Таблица 7 – Микроструктура различных зон сварного соединения стали 10Г2ФБЮ

Зона сварного шва	Объёмная доля неметаллических включений по ГОСТ 1778	Структурные составляющие
Основной металл	0,844	38,7% - феррит, 61,3 % - перлит
Облицовочный слой	0,528	70% - феррит, 30 % - перлит
Заполняющие слои	0,808	51,3% - феррит, 48,7 % - перлит
Корневой слой	0,502	28,3% - феррит, 71,7 % - перлит

Размеры неметаллических включений изменяются в широком диапазоне и определяются природой этих включений. «В результате раскисления металла сварного шва образуются включения малых размеров, величина которых определяется, главным образом, в каком состоянии металла они образовались – в твёрдом или жидком. Также на размеры включений влияет скорость охлаждения, уменьшение скорости охлаждения приводит к увеличению размеров неметаллических включений. Размеры включений зависят также от их химического состава: силикатные включения – 150 мкм, нитриды титана – 7 мкм, оксид алюминия – 2...7 мкм, сульфид марганца – 2...8 мкм» [34].

Неметаллические включения могут иметь различную форму. Каплеобразная форма характерна для закиси железа. Шарообразная форма характерна для силикатных включений и окисульфидов железа. Сульфид железа образует плёнку по граница зёрен металла.

При испытаниях на усталостную прочность изготавливались образцы типа Шарпи, представленные на рисунке 35, которые вырезали из сварного шва. При вырезке образцов первого типа старались максимально захватить облицовочный слой шва и частично заполняющие слои, надрез выполняли со стороны облицовочного слоя. При вырезке образцов второго типа старались максимально захватить корень шва и заполняющие слои, надрез выполняли со стороны корня шва.

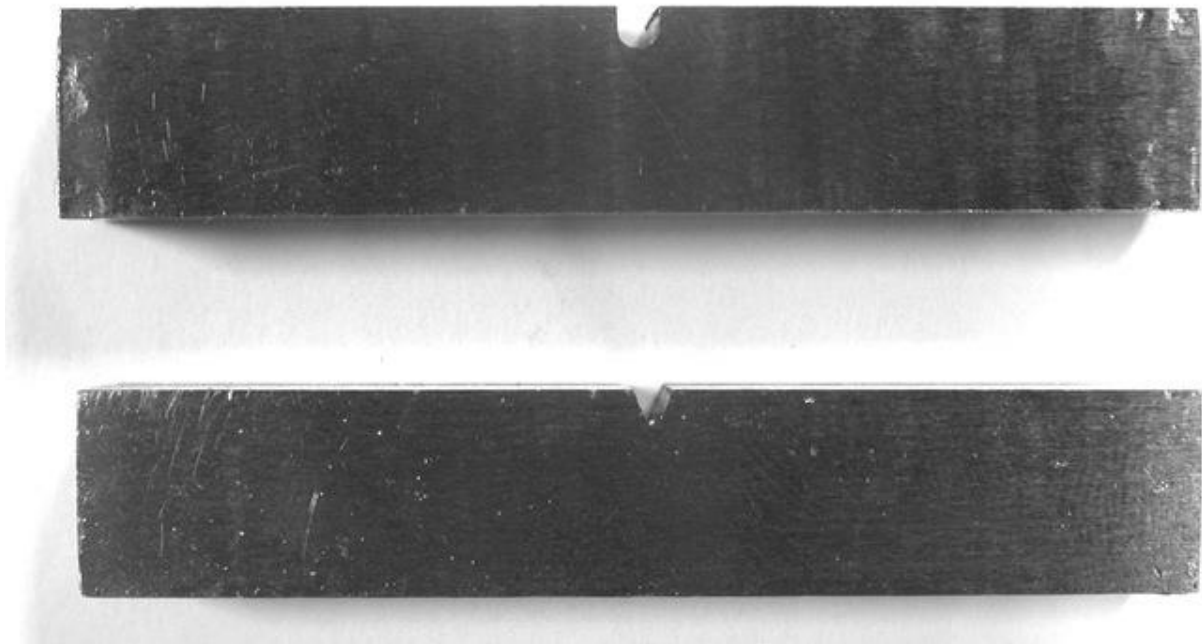
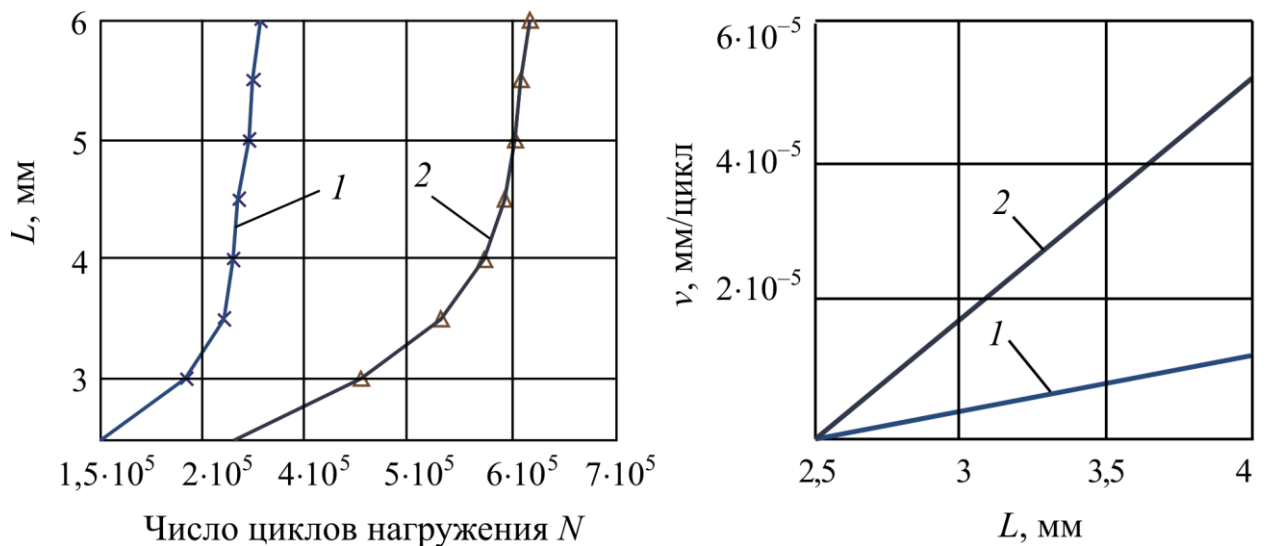


Рисунок 35 – Внешний вид образцов при испытаниях на усталостную прочность

Испытания показали, что инкубационный период зарождения усталостной трещины для образцов с надрезом со стороны облицовочного слоя составляет $(1,5...2) \cdot 10^5$ циклов, а для образцов с надрезом со стороны корня шва – $(3,2...3,5) \cdot 10^5$ циклов, как показано на рисунке 36.



1 – образцы с надрезом со стороны облицовочного слоя; 2 – образцы с надрезом со стороны корня шва

Рисунок 36 – Усталостные кривые (слева) и скорость роста трещины (справа)

Рост трещин в корне шва характеризуется равномерностью, скорость роста составляет 1,1...1,3 мм/цикл, при этом разрушение происходит преимущественно по границам перлитного зерна, как показано на рисунке 37. При прохождении усталостной трещины по заполняющим слоям скорость роста трещины замедляется, что объясняется увеличением доли ферритной фазы, при этом излом имеет вязкий характер, как на рисунке 38.

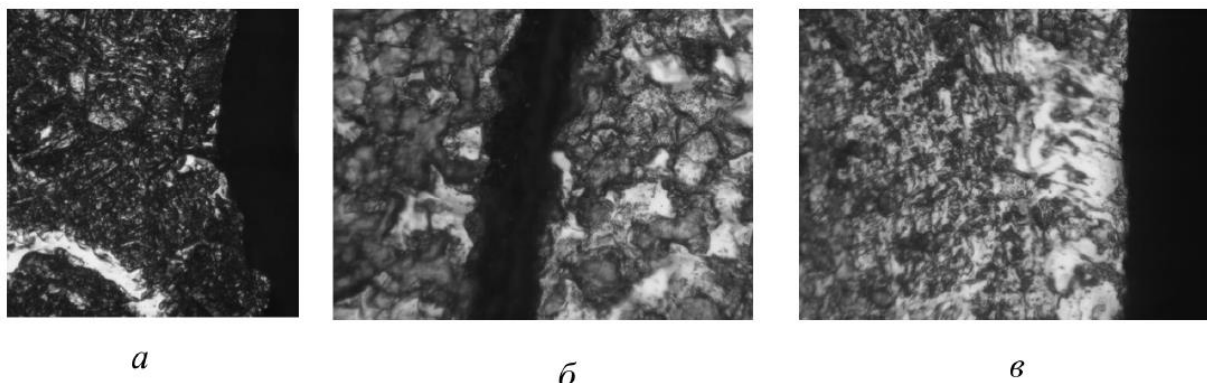


Рисунок 37 – Особенности прохождения усталостной трещины на образцах в корне шва (*а*), заполняющих слоях (*б*) и облицовочном слое (*в*)

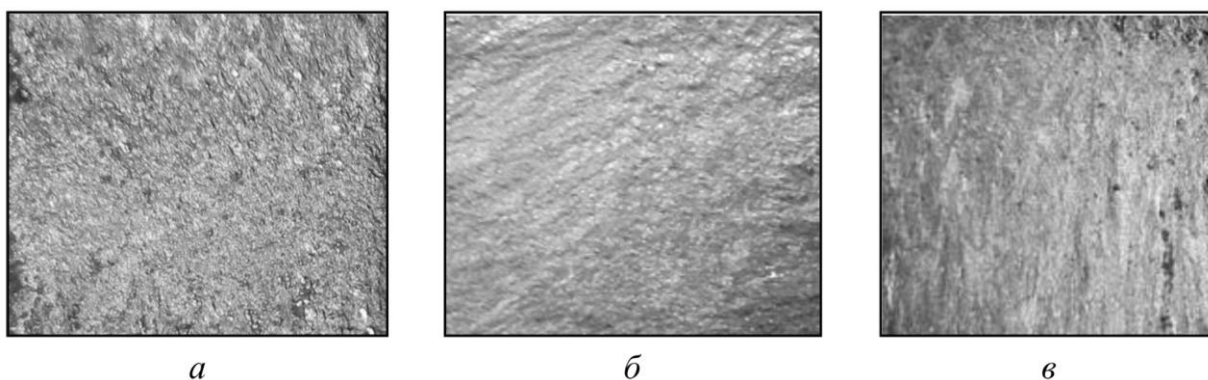


Рисунок 38 – Структура излома в усталостной трещине в корне шва (*а*), заполняющих слоях (*б*) и облицовочном слое (*в*)

Рост усталостной трещины со стороны облицовочного слоя происходит значительно быстрее, скорость составляет 1,3...2,8 мм/цикл. Само разрушение происходит в структуре с видманштеттовым ферритом и является внутризерновым. При переходе трещины в заполняющие слои происходит некоторое уменьшение скорости её роста. Характер излома имеет очаги хрупкого разрушения, как показано на рисунке 38.

3.3 Способ и устройство для импульсно-дуговой сварки

За последние годы все ведущие фирмы, занимающиеся выпуском оборудования для механизированной сварки в защитных газах, представили на рынке свои разработки в области импульсного управления сварочной дугой: FastMigPulse, DeepARC, ForceArc, SpeedArcTandemControlSystem-KempArcPulse TCS, CMT; Interpulse, SpeedUp, SpeedPulse, SpeedRoot, TwinPulsing, Speed-TwinPulseThermal-Pulse, SynergicPulseWelding, PulseMigTwinPulse, SynergicPulse MIG welding.

Дозирование энергии в процессе сварки позволяет стабилизировать размер капель при переносе электродного металла при механизированной сварке в защитных газах [17].

Дозирование энергии при сварке осуществляется во время импульса тока начиная с момента отрыва предыдущей капли. Эпюры тока и напряжения представлены на рисунке 39.

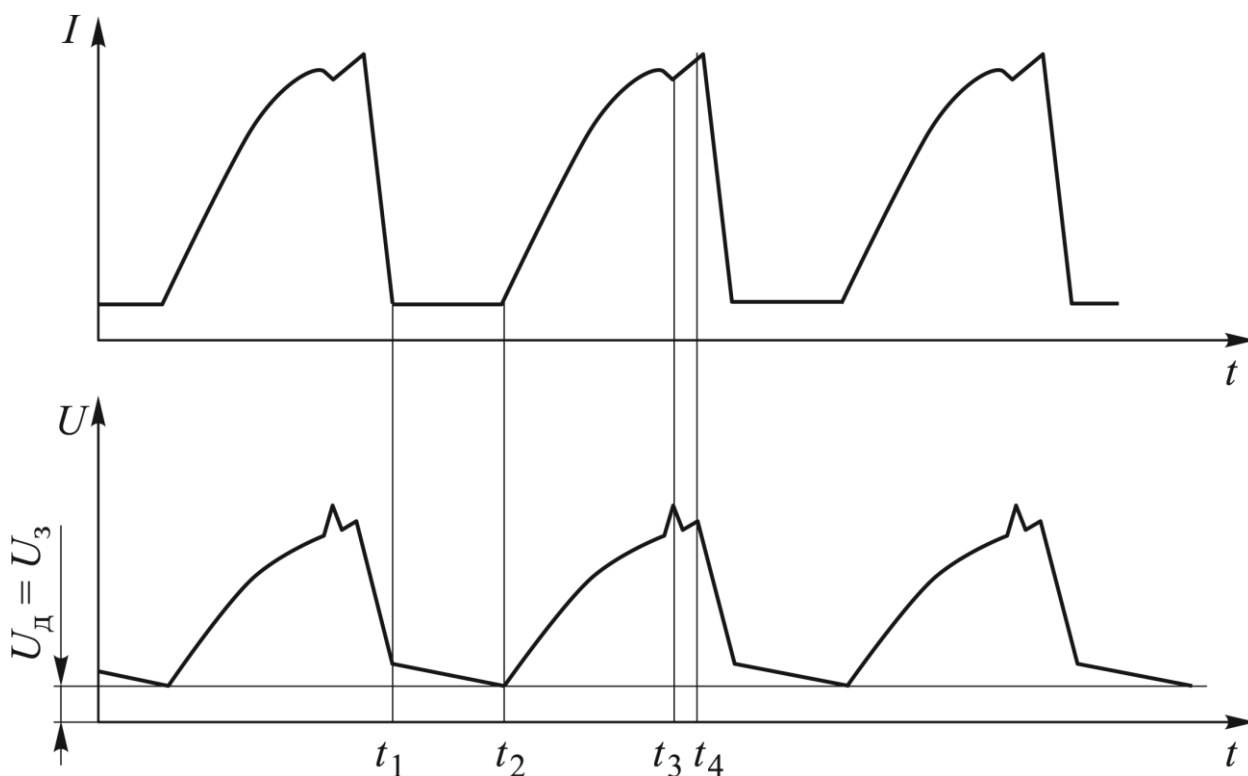


Рисунок 39 – Эпюры тока и напряжения при импульсно-дуговой сварке

На интервале времени $t_1 - t_2$ проходит горение дежурной дуги, которая характеризуется минимальным током, величина тока дежурной дуги составляет 15...40 А. В течение этого промежутка времени происходит подача сварочной проволоки, а капля расплавленного металла занимает соосное положение со сварочной проволокой. Длина дугового промежутка уменьшается, уменьшается также напряжение на дуге U_d .

В момент t_2 , когда напряжение на дуге снижается до заданного значения U_3 , производится подача импульса тока. При этом электромагнитные силы заставляют каплю расплавленного металла на торце электрода втягиваться в столб дуги и двигаться в сторону сварочной ванны.

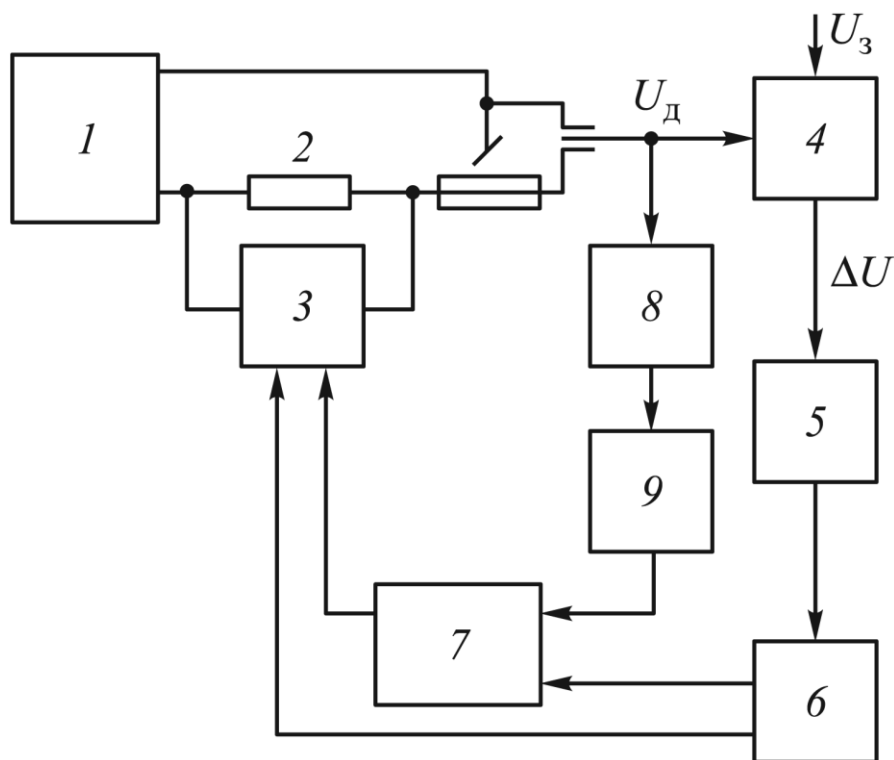
В момент времени t_3 происходит отрыв капли расплавленного металла от торца сварочной проволоки. Капля начинает ускоренное движение в сварочную ванну, оставшаяся на торце проволоки часть расплавленного металла отесняется на боковую поверхность проволоки. При этом жидкая прослойка между проволокой и ванной расплавленного металла минимальна, что создает благоприятные условия для нагрева торца электрода.

На интервале времени $t_3 - t_4$ проходит дозирование энергии, которая будет затрачена на формирование следующей капли расплавленного металла на торце сварочной проволоки. Момент t_3 начала дозирования энергии определяется по скачку напряжения.

Реализация предлагаемого способа дозирования энергии осуществляется с применением устройства [25], функциональная схема которого приведена на рисунке 40. Момент отрыва капли расплавленного металла фиксируется при помощи датчика 8 по скачку напряжения на дуге. Датчик 8 соединён с линией задержки, которая соединена с коммутирующим устройством 3.

Во входную цепь сварочного источника питания 1 подключено балластное сопротивление 2, параллельно которому выполнено подключение устройства коммутации 3. Блок сравнения напряжений 4 выполняет

отслеживание напряжения на дуге. Этот блок соединён с коммутирующим устройством 3 и выходом блока формирования импульсов 7.



1- источник питания сварочной дуги; 2 – реостат; 3 – устройство коммутации; 4 – блок сравнения напряжения; 5 – блок формирования паузы; 6 – реле; 7 – блок формирования импульсов; 8 – датчик отрыва капли; 9 - усилитель

Рисунок 40 – Функциональная схема дозирования энергии при импульсно-дуговой сварке

Устройство позволяет выполнять дозирование энергии, которая идёт на формирование капли расплавленного металла. На рисунке 41 представлена сущность сварки с дозированием энергии.

При выделении времени отрыва капли и приняв его за начало отсчёта дозирования энергии, становится возможным регулировать количество энергии, идущее на формирование капли расплавленного металла. При этом длительность импульса тока задается от момента отключения силовых тиристоров. За время $t_{сп}$ ток и напряжение на дуге уменьшаются. Дежурный ток во время паузы имеет минимальное значение и практически не оказывает влияния на размеры следующей капли расплавленного металла.

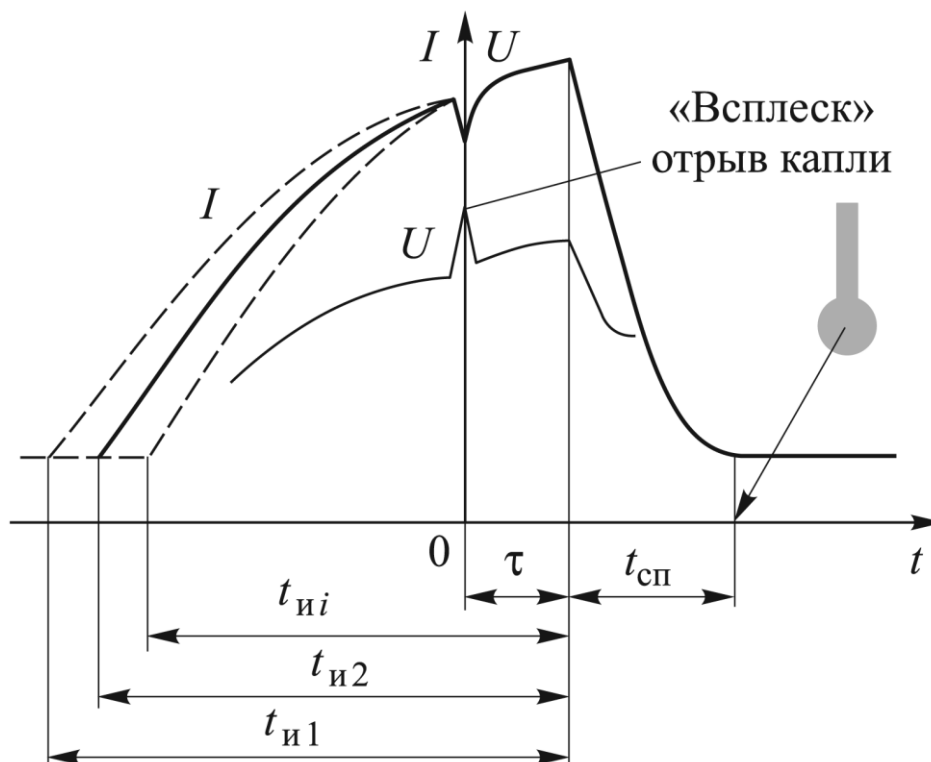


Рисунок 41 – Схема импульсно-дугового способа сварки с дозированием энергии

Дозирование энергии позволяет обеспечить капли расплавленного металла одинакового размера, стабилизирует процесс переноса электродного металла при механизированной сварке в защитных газах.

Выводы по третьему разделу

При сварке конструкций для магистральных трубопроводов из стали 10Г2ФБЮ следует особое внимание обратить на формирование облицовочного слоя, который может стать источником зарождения усталостных трещин при эксплуатации трубопровода.

В работе предложено использовать отечественную разработку по стабилизации каплепереноса при механизированной сварке в защитных газах. Способ импульсно-дуговой сварки позволяет дозировать энергию, которая затрачивается на формирование капли расплавленного металла, стабилизировать размеры капли и улучшать формирование сварного шва.

4 Построение проектной технологии сварки тройника

4.1 Требования к квалификации специалистов по сварке

Руководство сварочными работами и контроль качества должны осуществляться специалистами, которые прошли соответствующую аттестацию по «Правилам аттестации сварщиков и специалистов сварочного производства», которые были утверждены Ростехнадзором. Также привлекаемые для руководства сварочными работами и контроля качества специалисты должны иметь специальное сварочное образование.

К руководству сварочными работами могут быть допущены только аттестованные специалисты, которые имеют уровень не ниже IV, а также инженерно-технические работники, которые изучили необходимую нормативную документацию.

Назначение руководителя сварочных работ осуществляется приказом по организации, копия которого прикладывается к журналу контроля качества сварочных работ.

В обязанности руководителя сварочных работ перед началом сварки входит:

- изучение проектной документации на сварной тройник;
- укомплектование сварочного участка сварочными материалами, основным и вспомогательным оборудованием, инструментом, проверка их качества;
- отбор сварщиков для выполнения работ и проверка их допуска на выполнение соответствующих работ;
- проведение инструктажа сварщиков перед выполнением работ;
- организация выполнения каждым сварщиком контрольных образцов.

Каждый сварщик должен иметь соответствующее удостоверение, подтверждающее его квалификацию и допуск. Сведения по удостоверению

каждого сварщика вносятся в журнал контроля сварочных работ. При нарушении технологии и низком качестве сварщики от работы отстраняются.

4.2 Требования к сварочным материалам

Необходимо, чтобы все сварочные материалы, применяемые для сварки тройника, прошли аттестацию в соответствии с требованиями РД 03-613-03.

Для сварки применяется проволока согласно ГОСТ 2246, аргон согласно ГОСТ 10157, углекислый газ согласно ГОСТ 8050 или газовые смеси на их основе.

На каждую партию сварочной проволоки должен быть выдан сертификат, в котором следует указать:

- условное обозначение сварочной проволоки;
- товарный знак изготовителя;
- состояние поверхности проволоки;
- номер плавки и партии проволоки;
- химический состав сварочной проволоки и результаты механических испытаний наплавленного материала;
- масса проволоки.

После поступления на предприятие необходимо, чтобы проволоку принял отдел технического контроля, который осуществляет проверку сертификата и состояние поверхности проволоки.

На поверхности сварочной проволоки не должно быть масла, окалины, следов смазки и других загрязнений. Поверхность проволоки должна быть чистой и гладкой.

При использовании углекислого газа допускается применение с чистотой не ниже 98,8%. Подача углекислого газа в зону сварки должна осуществляться через осушающее устройство. Перед использованием газа следует выполнить его проверку отделом технического контроля.

Перед выполнением сварки следует выполнить пробную наплавку на стальную пластину длиной 100...150 мм. О качестве сварочных материалов судят по анализу поверхности наплавки, устойчивости горения дуги, разбрызгиванию и характеру переноса металла.

В качестве защитного газа предложено использовать готовую газовую смесь в соотношении 82 % аргона и 18 % углекислого газа. Вместо неё можно использовать газовую смесь в соотношении 80 % аргона и 20 % углекислого газа.

Выбор в пользу двухкомпонентной смеси перед однокомпонентным защитным газом (чистый аргон или чистый углекислый газ) сделан по следующим причинам:

- применение двухкомпонентной смеси по сравнению с чистым углекислым газом позволяет в 1.5...3 раза уменьшить разбрызгивание электродного металла;
- производительность сварки увеличивается в 1,5 раза по сравнению со сваркой в чистом аргоне;
- двухкомпонентная смесь позволяет значительно уменьшить трещинообразование по сравнению со сваркой в чистом углекислом газе;
- условия труда сварщика улучшаются;
- сварка с применением двухкомпонентной смеси позволяет стабилизировать процесс горения сварочной дуги и улучшить микроструктуру металла сварного шва за счёт уменьшения оксидных включений и пористости;
- относительное удлинение металла сварного шва увеличивается на 10 %, а ударная вязкость – в 1,5...2 раза по сравнению со сваркой в чистом углекислом газе.

Сварочную проволоку следует подбирать по механическим свойствам основного металла и близкой по химическому составу к основному металлу. Для сварки предложим использовать проволоку производства концерна

ESAB OK AristoRod 12.50, состав которой представлен в таблице 8. Покрытие проволоки позволяет улучшить её подачу. Проволока может применяться как при сварке в чистом углекислом газе, так и при сварке в смеси «аргон + углекислый газ». Проволока содержит уменьшенное количество вредных примесей – серы и фосфора. Горение проволоки характеризуется уменьшенным разбрызгиванием. Поскольку проволока не омеднена, то при её использовании не происходит засорения проволокопровода, срок службы горелки увеличивается, уменьшается износ наконечника. Это особенно важно для возможной роботизации сварки.

Таблица 8 – Химический состав проволоки ОК AristoRod 12.50

C	Si	Mn	P	S
0,06...0,14	0,80...1,00	1,40...1,605	менее 0,025	менее 0,025

После сварки образцов из стали 10Г2ФБЮ в смеси «аргон + углекислый газ» механические свойства наплавленного металла составляют:

- относительное удлинение – 25 %;
- ударная вязкость KCV при 20 °С – 110 Дж;
- предел прочности – 540 МПа;
- предел текучести – 440 МПа.

4.3 Требования к контролю качества сварочных работ

На стадиях изготовления заготовок, монтажа и сварки выполняется производственный контроль качества сварочных работ, для осуществления которого привлекаются инженерно-технические работники, сотрудники сварочных лабораторий, органы технического надзора заказчика.

В процессе производства и приёмки тройников основные контрольные операции включают в себя:

- входной контроль;

- операционный контроль;
- приемочный контроль.

Проводимые контрольные операции устанавливают возможность выполнения сварочных работ с соблюдением требуемого уровня качества выпускаемой продукции. Также назначение контрольных операций – выявлять причины появления брака.

Входной контроль проводится перед началом выполнения сборки и сварки, он включает в себя:

- проверка правильности оформления технологической документации на изготовление сварного тройника;
- проверка квалификации рабочего персонала (инженеров, дефектоскопистов и сварщиков);
- проверка качества сварочных материалов (проволоки и защитного газа);
- проверка рабочего состояния контрольного оборудования, исправность инструментов и приспособлений для контроля;
- проверка результатов испытаний качества сварки контрольных образцов;
- контроль правильности назначения и установки параметров режима сварки.

Пооперационный контроль включает в себя:

- контроль правильности выполнения подготовки сварочных кромок;
- проверка качества, количества, размеров и мест простановки прихваток;
- проверка правильности сборки (перпендикулярность, зазоры и т.д.);
- проверка правильности назначения и поддержания температуры предварительного подогрева;
- проверка правильности выполнения термической обработки конструкции после сварки.

Также при пооперационном контроле в процессе сварки выполняется проверка:

- назначения и поддержания параметров режима сварки;
- размеры сварочных валиков и правильность последовательности наложения сварных швов;
- правильность выполнения послойной зачистки сварных швов;
- отсутствие дефектов в сварных швах (проверяется после каждого слоя);
- простановка клейма сварщика после выполнения сварки.

При приёмочном контроле сварных соединений проверяется качество выполнения сварки путём визуального и измерительного контроля, неразрушающего контроля, гидравлических испытаний.

Перед проведением визуального и измерительного контроля качества следует выполнить очистку сварных швов и прилегающих поверхностей от брызг металла, шлака и других загрязнений. Проверке визуальным и измерительным контролем подвергаются 100 % сварных соединений.



Рисунок 42 – Универсальный двухполюсной рентгеновский аппарат YXLON.MG 325/425

По результатам визуального контроля должны быть выполнены следующие требования к сварному соединению:

- сварные швы не должны иметь резких переходов к основному металлу, поверхность швов должна быть гладкой и равномерной чешуйчатости;
- сварные швы не должны иметь видимых прожогов, наплывов и сужений по всей длине, не допускаются непровары в корне шва, шлаковые включения и поры, подрезы;
- не допускается наличие трещин любой формы и ориентации;
- в местах вынужденной остановки сварки катеры должны быть заварены.

Для выполнения визуального и измерительного контроля применяется набор ВИК.

Радиографический метод проводится применительно к 100 % сварных соединений. Для его проведения применяется рентгеновский аппарат постоянного напряжения YXLON.MG 325/425, представленный на рисунке 42.

4.4 Оборудование для сборки и сварки тройника

Технология сборки и сварки тройника предусматривает выполнение сварных швов различной пространственной ориентации. При этом желательно проводить сварку в нижнем или горизонтальном положении. Для этого целесообразно применение сварочного вращателя РТ-3000, представленного на рисунке 43.

Конструкцией вращателя позволяет установку на нём с свариваемых деталей, перемещение с маршевой скоростью для ориентирования деталей в удобное положение при сварки, вращение со сварочной скоростью при выполнении сварных швов (одновременное перемещение сварочного робота и свариваемых деталей). Этот вращатель может с успехом применяться при составлении роботизированных технологических комплексов на современных предприятиях.

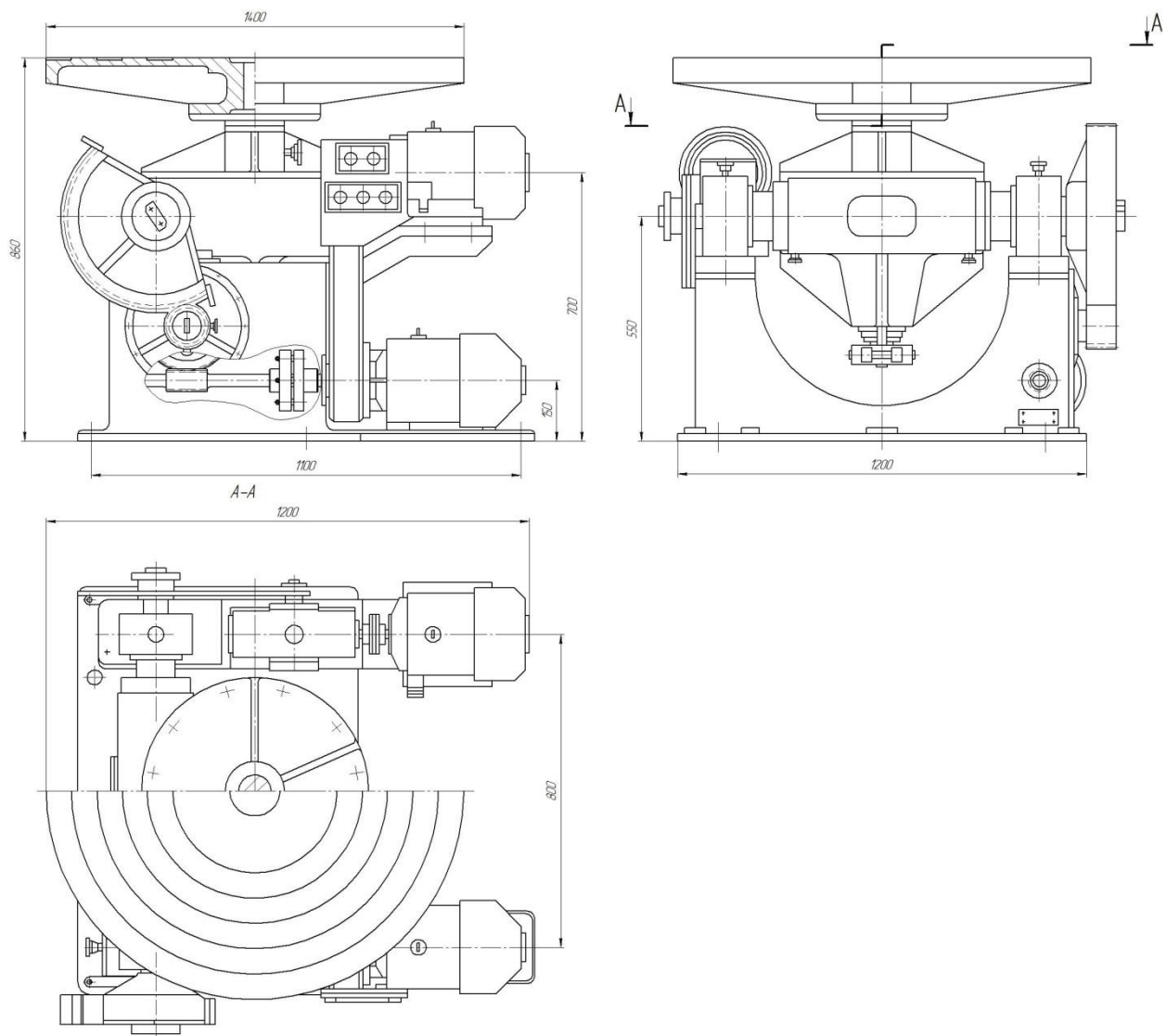


Рисунок 43 – Сварочный вращатель

Для роботизированной сварки применим сварочный робот производства концерна FANUC. При стационарно расположенных катушке сварочной проволоки и механизме подачи требования к грузоподъемности сварочного робота будут самые минимальные. Поэтому в качестве сварочного робота подойдет робот AM 120iB, представленный на рисунке 44.

За счёт конструкции робот AM 120iB обладает увеличенной рабочей зоной и предназначен специально для выполнения ответственных сварных конструкций, точность позиционирования составляет 0,08 мм. Максимальный вылет робота составляет 1667 мм, а грузоподъемность – 20 кг.

Для автоматизации сборочных и вспомогательных операций применим промышленный робот М-710 iВ/45-iAW, представленный на рисунке 45.



Рисунок 44 – Сварочный робот АМ 120iВ



Рисунок 45 – Промышленный робот М-710 iВ/45-iAW

Промышленный робот М-710 iB/45-iAW позволяет выполнять следующие операции:

- сборка;
- укладка деталей;
- загрузка / разгрузка деталей;
- обслуживание технологического оборудования.

Комплектация робота представлена на рисунке 46. В состав робота входит базисное основание 1, относительно которого происходит вращение карусели 2 вокруг оси А1. Коромысло 3 обеспечивает поворот вокруг оси робота А2. Основание руки 4 обеспечивает поворот руки вокруг оси А3. Рука робота 5 позволяет выполнять вращение вокруг оси А4. Кисть робота обеспечивает ориентацию схвата путём поворота вокруг осей А5 и А6. Таким образом, робот обеспечивает перемещение вокруг шести осей. Камера объёмного видения 7 закреплена на кисти робота. Также на кисти робота размещаются сенсор усилия 8 и схват деталей 9.

Техническая характеристика робота М-710 iB/45-iAW представлена в таблице 9.

Таблица 9 – Технические характеристики ПР М-710 iB/45-iAW

№	Наименование	Значение
1	Грузоподъёмность, кг	45
2	Количество осей, шт.	6
3	Точность позиционирования, мм	±0,15
4	Максимальный вылет, мм	1706
5	Масса манипулятора, кг	600
6	Масса контроллера, кг	240
7	Максимальная скорость перемещений по осям, град/сек: - А1 - А2 - А3 - А4 - А5 - А6	160 120 150 240 240 340

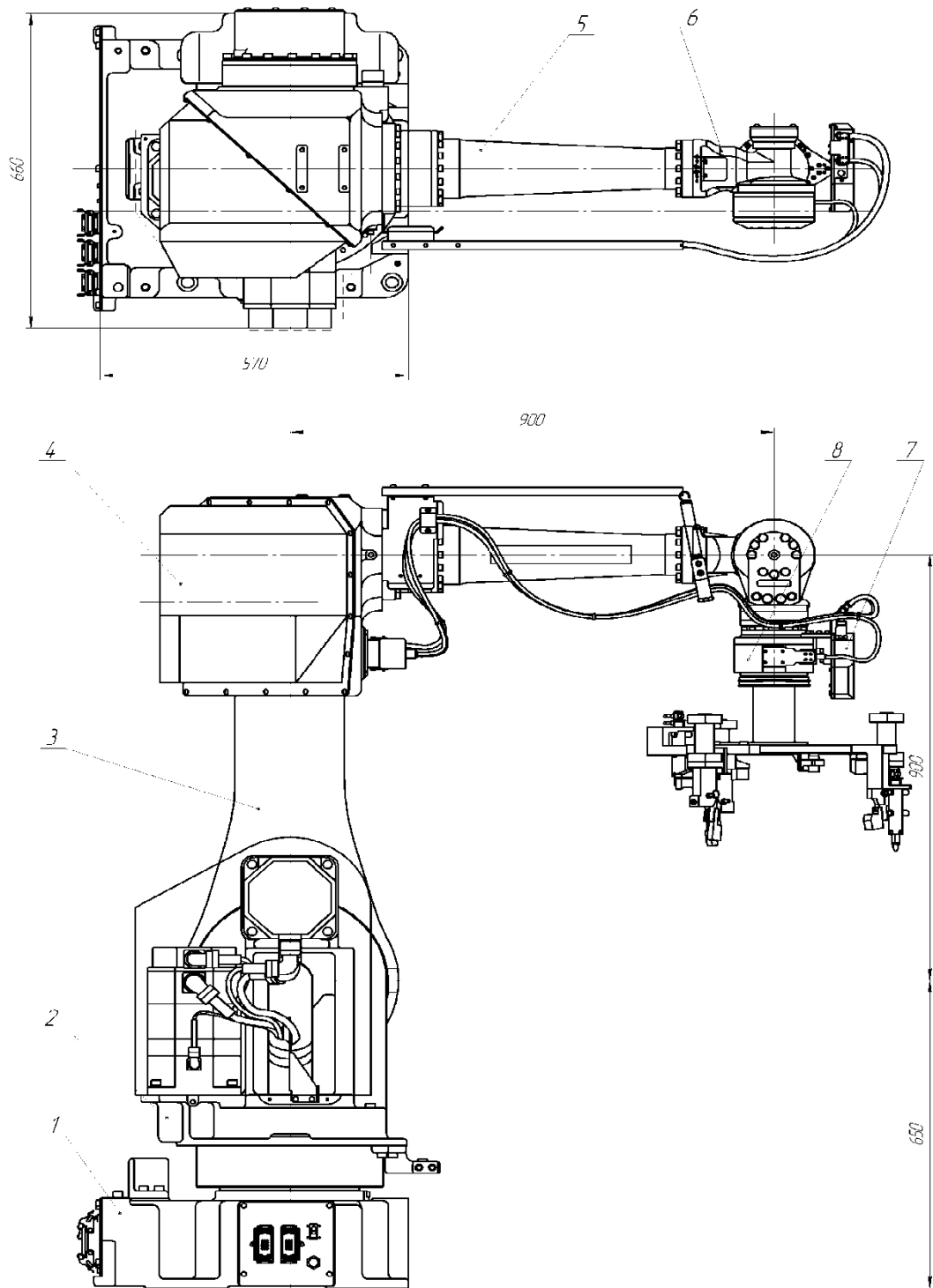
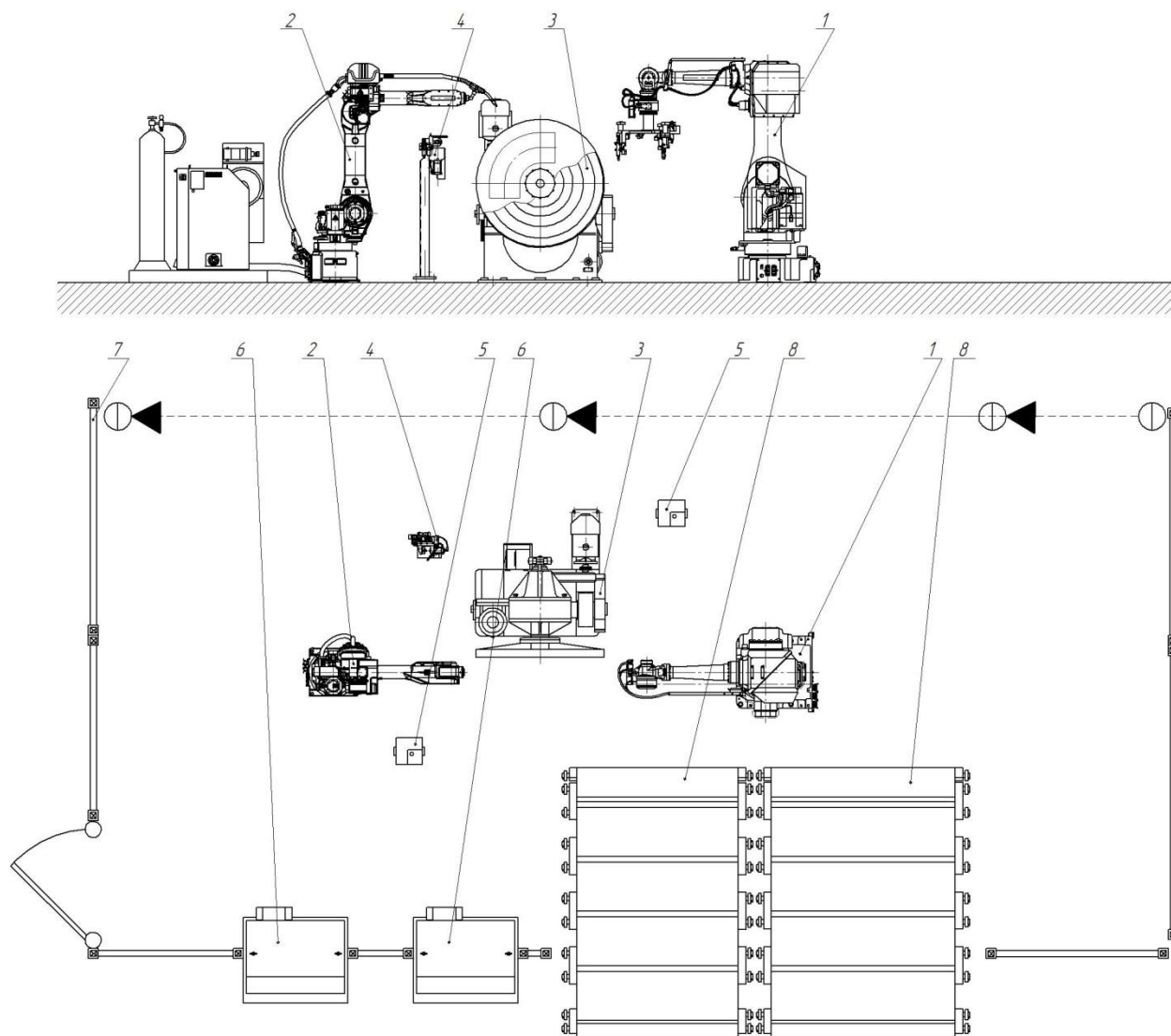


Рисунок 46 – Комплектация промышленного робота схватом и системой объёмного видения

Роботизированный технологический комплекс, представленный на рисунке 47, включает в себя вспомогательный робот 1, сварочный робот 2, вращающуюся часть изделия 3, стойку обслуживания сварочной горелки 4, стойку концевого выключателя 5, шкаф управления 6, ограду 7, транспортёр-накопитель.



1 – робот М-710iВ с оснасткой для схвата деталей; 2 – робот АМ-120iВ с оснасткой для дуговой сварки; 3 – узел разворота оснастки; 4 – стойка обслуживания сварочной горелки; 5 – стойка концевого выключателя; 6 – шкаф управления роботом; 7 – ограда; 8 – транспортёр-накопитель

Рисунок 47 – Состав роботизированного технологического комплекса для сборки и сварки тройника магистрального трубопровода

Расположение шкафа управления относительно робота выполнено таким образом, что при работе с ним оператор никогда не попадёт в рабочую зону робота, при этом, сам робот всегда будет находиться в зоне видимости оператора. Размещение транспортёра выполнено таким образом, что обслуживающий его оператор также никогда не попадёт в рабочую зону роботов. Это необходимо для обеспечения безопасности.

Ограда роботизированного комплекса снабжена калиткой, через которую осуществляется доступ внутрь комплекса. При открытии калитки срабатывает датчик, который приводит к остановке работы комплекса. Также роботизированный комплекс автоматически останавливается при пересечении оператором светового барьера.

4.5 Описание сварочного оборудования

Для сварки применим сварочный аппарат Taurus 505 производства фирмы EWM, представленный на рисунке 48. Этот аппарат позволяет выполнять сварку штучным электродом, механизированную сварку в защитном газе и сварку неплавящимся электродом. Возможности аппарата позволяют интегрировать его в роботизированную технологическую ячейку.

Среди достоинств аппарата можно отметить:

- высокую продолжительность включения, которая позволяет выполнять сварку на форсированных режимах длительное время, что и требуется для роботизированной сварки;
- эргономическое, прочное и компактное исполнение, что делает возможным промышленное применение этого аппарата;
- возможность сварки различными типами проволок, что позволяет обеспечить технологическую гибкость роботизированной технологической ячейки;
- защита от перегрева и аварийных ситуаций, что позволяет использовать его в автоматизированных комплексах.



Рисунок 48 – Сварочный полуавтомат Taigus 505 производства фирмы EWM

Аппарат снабжён дистанционным управлением по протоколу ArcLink, Ethernet и DeviceNet. Класс защиты аппарата составляет IP23, что делает возможным его применение в различных производственных цехах.

Технология управления сварочной дугой EWM Waveform Control Technology позволяет назначать оптимальную эпюру тока и напряжения в зависимости от особенностей сварочного процесса отдельно для выполнения корня шва, заполняющих слоёв или облицовочного слоя.

Выводы по четвёртому разделу

В ходе выполнения настоящего раздела диссертационного исследования были сформулированы требования к сварочным материалам (сварочная проволока и защитный газ). Дано описание применяемой сварочной проволоки и защитной смеси.

Также выставлены требования к подготовке и квалификации персонала, который осуществляет работы по изготовлению сварных тройников.

Сформулированы требования к контролю качества работ: входному, пооперационному и приёмочному.

Дано описание оборудования, которое предлагается применять для изготовления сварных тройников:

- для контроля качества;
- выполнения сварки;
- перемещения деталей в процессе сварки;
- сварочный робот;
- вспомогательный робот.

Выполнена планировка роботизированного технологического комплекса, который позволяет выполнять сборку и сварку тройников широкой номенклатуры.

Использование сварочного аппарата Taurus 505 производства фирмы EWM позволяет добиться технологической гибкости за счёт возможности применения как проволоки сплошного сечения, так и порошковой проволоки.

Предложенный роботизированный технологический комплекс может быть внедрён в производство при изготовлении типовых деталей магистрального трубопровода, позволяет значительно повысить производительность выполнения работ по сравнению с механизированными и ручными способами сварки.

Заключение

В диссертационном исследовании поставлена цель – повышение эффективности сварочных операций при изготовлении сварных тройников магистральных трубопроводов.

Базовая технология изготовления сварного тройника предусматривает применение ручной дуговой сварки, недостатками которой являются:

- значительное количество дефектов сварки, которые требуют затрат времени и материалов для своего устранения;
- малая производительность ручной дуговой сварки;
- тяжёлые условия труда сварщика, которые сказываются на его здоровье, а также производительности и качестве сварки.

При анализе альтернативных способов сварки были рассмотрены: ручная дуговая сварка штучными электродами, механизированная и автоматическая сварка в защитных проволокой сплошного сечения, механизированная и автоматическая сварка в защитных порошковой проволокой, механизированная сварка самозащитной порошковой проволокой, сварка неплавящимся электродом в инертном газе. На основании анализа преимуществ и недостатков каждого способа для построения проектной технологии предлагаем применить механизированную сварку в защитных газах проволокой сплошного сечения.

Также анализ свойств сварных соединений из стали 09Г2С и 10Г2ФБЮ показал проблему снижения ударной вязкости сварных швов. На основании проведённых исследований сделано заключение о положительном влиянии отжигающего валика на механические свойства сварных соединений при изготовлении тройников из стали 10Г2ФБЮ и 09Г2С.

При сварке конструкций для магистральных трубопроводов из стали 10Г2ФБЮ следует особое внимание обратить на формирование облицовочного слоя, который может стать источником зарождения усталостных трещин при эксплуатации трубопровода.

В работе предложено использовать отечественную разработку по стабилизации каплепереноса при механизированной сварке в защитных газах. Способ импульсно-дуговой сварки позволяет дозировать энергию, которая затрачивается на формирование капли расплавленного металла, стабилизировать размеры капли и улучшать формирование сварного шва.

Выполнена планировка роботизированного технологического комплекса, который позволяет выполнять сборку и сварку тройников широкой номенклатуры.

Предложенный роботизированный технологический комплекс может быть внедрён в производство при изготовлении типовых деталей магистрального трубопровода, позволяет значительно повысить производительность выполнения работ по сравнению с механизированными и ручными способами сварки.

На основании вышеизложенного следует сделать вывод, что поставленная цель диссертационного исследования достигнута за счёт проведения исследований в области прочности сварных соединений трубных сталей, обоснования способа сварки изделия, выбора способа стабилизации переноса электродного металла и проектирования роботизированного технологического комплекса.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Алешин Н. П., Гладков Э.А., Бродягин В. Н. Импульсные технологии управления каплепереносом при MIG\MAG сварке // Сварка и диагностика. 2014. № 3. С. 17–21.
2. Бернштейн М. Л., Займовский М. А. Механические свойства металлов // М. : Metallurgy, 1979. 496 с.
3. Биронт В. С. Теория термической обработки металлов // Красноярск : СФУ, 2007. 180 с.
4. Блехерова Н. Г. Прохоров В. В. Пискорский П. В., Глушак Н. В. Автоматическая сварка самозащитной порошковой проволокой. Преимущества процесса // Территория НЕФТЕГАЗ. 2012. № 6. С. 94–95.
5. Брайент К. Л., Бенерджи С. К. Охрупчивание конструкционных сталей // М. : Metallurgy, 1988. 550 с.
6. Васильев О. П., Свердлик Ю. М., Устюжанин А. В. О возможности применения сварных тройников на объектах ОАО «Газпром» // Эспозиция Нефть Газ. 2014. № 7. С. 33–35.
7. Войдер К. А., Глухов М. Г., Есиев Т. С. Оценка работоспособности сварных тройников при уменьшении строительных длин // Вестник ЮУрГУ, серия «Metallurgy». 2014. Т. 14, № 1. С. 96–100.
8. Голиков И. Н., Масленков С. Б. Дендритная ликвация в сталях и сплавах // М. : Metallurgy, 1977. 244 с.
9. Гривняк И. Свариваемость микролегированных сталей (металлургические аспекты) // Автоматическая сварка. 1972. № 8. С. 10–15.
10. Гудков А. А. Трещиностойкость стали // М. : Metallurgy, 1989. 375 с.
11. Гуляев А. П. Metallovedenie : учебник для вузов // М. : Metallurgy, 1986. 544 с.
12. Дуб А.В. Неметаллические включения в низколегированной трубной стали // Metallurg. 2003. № 4. С. 67–73.

13. Карева Н. Т., Заварцев Н. А., Чунгаков Д. Т. Исследование причин снижения ударной вязкости соединительных деталей трубопроводов из стали 10Г2ФБЮ // Вестник ЮУрГУ, серия «Металлургия». 2020. Т. 20, № 3. С. 33–41.
14. Климов В. Н., Адашкин А. М., Седов Ю. Е. Материаловедение в машиностроении // М. : Юрайт, 2016. 535 с.
15. Комаров В. А., Зуев В. В., Боровик Т. Н. Новая технология механической обработки поверхностей отводов и разрезных тройников // Компетентность. 2019. № 3. С. 49–50.
16. Крампит А. Г., Зернин Е. А., Крампит М. А. Современные способы импульсно-дуговой MIG/MAG сварки // Технологии и материалы. 2015. № 7. С. 4–10.
17. Крампит Н.Ю., Крампит А.Г., Князьков С.А. Особенности импульсного управления процессом сварки длинной дугой в углекислом газе // Автоматизация и современные технологии. 2002. № 9. С. 12–15.
18. Кривоносова Е.А., Рудакова О. А. Определение характеристик сопротивления усталости многослойных сварных швов стали 10Г2ФБЮ // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2012. № 2. С. 29–36.
19. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение // М. : Машиностроение, 1990. 528 с.
20. Лозовская, А.В. Исследование влияния дополнительного нагрева на структуру и свойства низколегированных трубных сталей контролируемой прокатки с целью реализации наследственного упрочнения изделий в процессе термической обработки: Диссертация магистра. Донецк: ДонГТУ. 2009.
21. Мозок В. М. Дополнительные особенности технологии дуговой механизированной и автоматической сварки с импульсной подачей электродной проволоки // Сварочное производство. 2010. № 2. С. 34–38.

22. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов // М. : Металлургия, 1978. 392 с.
23. Овчинников В. В. Дефекты сварных соединений // М. : Академия, 2012. 64 с.
24. Павлов Н. В., Крюков А. В., Зернин Е. А. Сварка с импульсной подачей проволоки в смеси газов // Сварочное производство. 2010. № 4. С. 27–28.
25. Патент РФ № 2185941 МПК-8 В23К9/00 Устройство для сварки / А.Ф. Князьков, С.А. Князьков, А.Г. Крампит, А.В. Веревкин. Заявл. 27.07.2002
26. Потапьевский А. Г., Сараев Ю. Н., Чинахов А. Д. Сварка сталей в защитных газах плавящимся электродом. Техника и технология будущего : монография. Томск : Издательство Томского политехнического университета, 2012. 208 с.
27. Потапьевский А. Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. М. : Машиностроение, 1974. 240 с.
28. Походня И. К., Шлепаков В. Н., Максимов С. Ю., Рябцев И. А. Исследования и разработки ИЭС им. Е.О. Патона в области электродуговой сварки и наплавки порошковой проволокой // Автоматическая сварка. 2010. № 12. С. 34–42.
29. Розерт, Р. Применение порошковых проволок для сварки в промышленных условиях // Автоматическая сварка. 2014. № 6-7. С. 60–64.
30. Рудакова О. А. Методы экспертной оценки свойств сварных соединений сталей феррито-перлитного класса на основе фрактального анализа структурного состава: Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет. 2011.
31. Смирнов И. В. Сварка специальных сталей и сплавов : учебное пособие // Санкт-Петербург : Лань, 2021. 268 с.

32. Смирнов М. А., Счастливец В. М., Журавлев Л. Г. Основы термической обработки стали // Екатеринбург : УрО РАН, 1999. 495 с.
33. Федосеева Е. М., Игнатов М. Н., Летягин И. Ю. Влияние повторного термического цикла сварки на образование неметаллических включений в многослойных сварных швах трубных сталей // Сварка и диагностика. 2011. № 2. С. 18–21.
34. Федосеева Е. М., Игнатов М. Н., Казымов К. П. Современные методы идентификации неметаллических включений в сварных соединениях трубных сталей // Тяжелое машиностроение. 2011. № 1. С. 45–47.
35. Федосов С. А. Основы технологии сварки // М. : Инновационное машиностроение, 2017. 125 с.
36. Шевченко А. А., Семенова Е. С., Шабурова Н. А. Определение причин низкой ударной вязкости кольцевого сварного шва // Вестник ЮУрГУ, серия «Металлургия». 2019. Т. 19. № 2. С. 63–70.
37. Шлепаков В. Н. Гаврилюк Ю. А., Котельчук А. С. Современное состояние разработки и применения порошковых проволок для сварки углеродистых и низколегированных сталей // Автоматическая сварка. 2010. № 3. С. 46–51.
38. Щедро А. Д., Шапиро Я. О. Производство трубных узлов – комплексная задача // Территория НЕФТЕГАЗ. 2008. № 5. С. 48–50.
39. Яковлев Д.С. Анализ различных типов сварочных проволок для сварки трубных сталей при толщинах стенки труб более 25 мм // Вестник ЮУрГУ. 2012. № 39. С. 157–159.
40. Dixon K. Shielding gas selection for GMAW of steels // Welding and Metal Fabrication. 1999. № 5. P. 8–13.
41. Lucas W. Choosing a shielding gas. Pt 2 // Welding and Metal Fabrication. 1992. № 6. P. 269–276.
42. Maksuti R., Mehmeti H., Imeri S. Correlation of microstructure and hardness of twopass submerged arc welds of line pipe steel X65 // International Journal of Microstructure and Materials Properties. 2010. Vol. 4. № 3. P. 347–355.

43. Wang, F., Hou W. K., Hu S. J. Modelling and analysis of metal transfer in gas metal arc welding // J. Phys. D: Applied Physics. 2003. vol. 36. P. 1–19.

44. Yamamoto T. Mathematical modeling of metal active gas arc welding // Sci. and Technology of Welding & Joining. 2002. № 4. P. 260–264.

45. Yamamoto H., Okazaki K., Harata S. The effect of short circuiting current control on the spatter generation in CO₂ arc welding // Intern. Inst. of Welding : Doc. 212-649–86. 1986. P. 1–17.