

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ 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)

**Оборудование и технология для пайки**

(направленность (профиль))

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

на тему: «Исследование влияния параметров и условий сварки при импульсном управлении сварочной дугой на формирование сварного соединения»

Студент(ка)	<u>Степанов Н.О.</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Руководитель	<u>Шашкин О.В.</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Консультанты	_____	_____	(личная подпись)
	_____	_____	(личная подпись)
	_____	_____	(личная подпись)

Руководитель программы: к.т.н, доцент А.Ю. Краснопевцев  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) \_\_\_\_\_  
(личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ г.

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой д.т.н, профессор В.В. Ельцов  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) \_\_\_\_\_  
(личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ г.

Тольятти 2017

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА	
1.1 Надёжность магистральных трубопроводов	9
1.2 Дефекты при сварке магистральных трубопроводов	14
1.3 Повышение эффективности сварки при строительстве магистральных трубопроводов	
1.3.1 Общие сведения	19
1.3.2 Сварка модулированным током	21
1.3.3 Импульсно-дуговая сварка	23
1.3.4 Механизированная сварка короткой дугой с короткими замыканиями	24
1.4 Базовая технология сварки магистрального трубопровода с использованием сварки плавящимся электродом в защитных газах	
1.4.1 Свойства материала труб	26
1.4.2 Сварка корневого слоя шва	28
1.4.3 Сварка заполняющего и облицовочного слоёв шва	32
1.5 Задачи диссертационного исследования	36
2 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ	
2.1 Общие вопросы применения импульсного управления дугой	37
2.2 Отечественные разработки в области импульсного управления сварочной дугой	44
2.3 Исследование особенностей перехода капли электродного металла в ванну при орбитальной сварке	52
2.4 Предлагаемый способ импульсной сварки	57
2.5 Методика и результаты испытания сварных соединений	66

### 3 ПРОЕКТНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА

3.1 Подготовка кромок _____	76
3.2 Сборка под сварку _____	77
3.3 Предварительный подогрев _____	78
3.4 Сварка стыка _____	79
3.5 Сварочные материалы _____	80
3.6 Контроль качества сварки _____	80
ЗАКЛЮЧЕНИЕ _____	83
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК _____	85

## ВВЕДЕНИЕ

Магистральный трубопровод является сложным, высоконагруженным инженерно-техническим сооружением, подвергающимся в течение всего срока службы значительным напряжениям, которые близки к пределу прочности и пределу текучести металла. В этом случае самые незначительные отклонения состояния такой системы от проектного могут привести к аварии.

Из существующих видов транспорта углеводородов трубопроводные системы являются самым распространенным и обладают наибольшей экономической эффективностью. Объем транспортируемой по трубопроводам страны нефти составляет порядка 93 % от общего объема транспортировки, в то же время на остальные виды транспорта (танкерный и железнодорожный) приходится только 7 % объёма транспортировки. В настоящее время трубопроводный транспорт преобладает над существующими способами транспортировки углеводородов по объему грузовых потоков и по удельному весу. Следует отметить, что трубопроводы являются самым экологически чистым видом транспорта.

Достоинствами транспортировки по трубопроводу являются:

- возможность прокладки трубопровода в любом направлении и на любое расстояние;
- бесперебойность работы и связанная с этим гарантированное снабжение потребителей;
- самая высокая степень автоматизации;
- самая высокая эксплуатационная надежность.

Недостатками трубопроводного транспорта являются:

- существенные первоначальные затраты при строительстве магистральных трубопроводов;
- ограничения на количество сортов энергоносителей, транспортируемых по одному магистральному трубопроводу.

Сейчас дуговая сварка является основным технологическим процессом соединения отдельных труб и трубных секций в непрерывную нитку на трассе. Сварочные работы определяют общий темп строительства трубопровода, поэтому повышение эффективности сварочных процессов является существенным резервом повышения качества и производительности строительства магистральных трубопроводов, их эксплуатационной надежности [1, 2].

Проблеме управления качеством, в связи с обеспечением и повышением надежности эксплуатации магистральных трубопроводов, а также вопросам диагностики магистральных трубопроводов и его ремонтно-восстановительного обслуживания посвятили свои труды: Гумеров А.Г., Бородавкин П.П., Васильев Г.Г., Молдованов О.И., Иванцов О.М., Короленок А.М., Стеклов О.И., Макаров Г.И., Мустафин Ф.М., Сенцов С.И., Телегин Л.Г., Гаспарянц Р.С., Хариновский В.В., а также зарубежные ученые и специалисты: М. Кренинга, Т. Вихавиолас, Р. Фесслер, М. Майер, А. Хефлиц и другие авторы.

Рост масштабов строительства и ремонта магистральных трубопроводов и большая их протяженность, заставляют повышать темп прокладки при сооружении. Как показывает практика, в России и за рубежом практически исчерпаны ресурсы по повышению качества и производительности ручной дуговой сварки. Очевидно, что следующий этап развития сварочных технологий будет в своей основе иметь полную механизацию и автоматизацию сварки стыков труб. Главной проблемой в этом случае будет изменяющееся пространственное положение сварочной ванны [1].

В настоящий момент признанными критериями эффективности применяемых сварочных технологий являются: гарантия воспроизводимости качества сварных соединений; возможность реализации сварочных процессов в полевых условиях; высокая производительность; приемлемая стоимость оборудования и материалов; возможность соответствующего обучения и

аттестации персонала; экономическая целесообразность применения сварочных технологий [4].

Как показывает практика строительства и эксплуатации магистральных трубопроводов, главным фактором, который отвечает за повышение их надежности, является эффективность строительного контроля [5].

Важным элементом при обеспечении надёжности и долговечности соединения труб является качество сварки, подразумевающее отсутствующие дефекты и разупрочнение в зоне термического влияния, достаточное сопротивление при хрупком разрушении сварного соединения [7].

При обеспечении требуемого уровня качества при строительстве магистрального трубопровода большое внимание уделено интенсификации и совершенствованию методов контроля (то есть выявлению полученных при сварке отклонений от требований нормативной документации) и устранению выявленных дефектов. Поиск и устранение уже полученных дефектов обладает значительно большей трудоёмкостью и ресурсоёмкостью, чем предупреждение образования дефектов. Развитие систем менеджмента качества при строительстве магистральных трубопроводов должно происходить с анализом причин и механизмов развития дефектов, возможностей различных методов по их выявлению. Логичным представляется решать задачу повышения безаварийности магистральных трубопроводов путём комплексного подхода к управлению качеством, охватывающего все аспекты их строительства [6].

Как показал проведённый анализ отказов на магистральных трубопроводах России [5, 6], большое количество аварий возникает из-за брака строительного-монтажных работ: 25 % для нефтепроводов и 23 % для газопроводов.

Существенным резервом обеспечения стабильно высокого качества сварных соединений с одновременным повышением производительности труда является расширение объемов и областей применения механизированной сварки плавящимся электродом [2]. Такие тенденции

характерны для современного мирового сварочного производства, когда механизированная и автоматическая сварка постоянно вытесняют ручную дуговую сварку. При этом доля механизированной сварки в общем объеме сварочных работ превышает 50...55 %, а в базовых отраслях промышленности достигает 75...85 % [13].

Анализ проблем механизации сварочных работ показал, что основными препятствиями расширения областей применения механизированной сварки при строительстве и ремонте газопроводов являются дефекты формирования корневого слоя шва в потолочном положении и замыкания швов при заполнении разделки, грубая чешуйчатость и западание валиков швов при выполнении облицовочных проходов, повышенное разбрызгивание электродного металла, отсутствие высоконадежного сварочного оборудования. Поэтому обеспечение стабильного качества сварных соединений может быть достигнуто путём дальнейшего развития и совершенствования процессов механизированной сварки плавящимся электродом и оборудования для их реализации [14].

Одним из самых эффективных способов уменьшения разбрызгивания является нестационарное энергетическое воздействие на каплю электродного металла и сварочную ванну [15]. Систематическими исследованиями и разработкой методов управления каплепереносом в СССР начали заниматься в конце 60-х – начале 70-х годов прошлого века. Однако отсутствие на тот момент быстродействующих источников сварочного тока, последующая политико-экономическая перестройка общества не позволили завершить начатые работы, поэтому полуавтоматы с цифровым управлением и быстродействующими инверторными источниками сварочного тока начали применять только в последнее десятилетие. Подобное оборудование не требует применения специальной техники сварки при смене пространственного положения, изменении вылета электрода и других условий сварки, что позволяет сварщику сосредоточить своё внимание исключительно на процессе ведения горелки вдоль шва.

В настоящий момент создан необходимый технологический задел в виде исследования особенностей перехода капель расплавленного электродного металла в ванну в процессе сварки при различных пространственных положениях [4, 5], что позволяет разработать не только технологии сварки, устойчивые к возмущениям внешней среды, но и необходимое оборудование с использованием последних достижений в области системотехники и новых возможностей современной элементной базы.

Таким образом, следует заключить, что проблема повышения качества и производительности сварки при строительстве магистральных трубопроводов до конца не решена, а работы в этом направлении остаются актуальными.

Цель магистерской диссертации – повышение надёжности и качества механизированной сварки магистральных трубопроводов в защитных газах за счёт импульсного управления сварочной дугой.



# 1 ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

## 1.1 Надёжность магистральных трубопроводов

Следует признать, что абсолютная безопасность объекта, процесса, или явления является недостижимой. Никакие принятые меры и затраченные финансовые средства не позволяют получить нулевую вероятность возникновения чрезвычайных событий, которые способны привести к серьёзным негативным последствиям.

Безопасность необходимо рассматривать как свойство комплексного понятия «надёжность объекта (системы)» и определять как «свойство объекта не допускать опасных для людей и окружающей среды ситуаций». Главным и общепринятым показателем безопасности можно считать риск, при этом различают следующие виды риска: технический, индивидуальный, экологический, социальный и экономический.

Технический риск может быть characterized опасностью аварий на производственных объектах. В процессе проектирования и эксплуатации трубопроводов в первую очередь необходимо учитывать именно технические риски [20]. В настоящее время принятые меры, направленные на обеспечение безопасности трубопроводного транспорта, позволили уменьшить число аварий на магистральных газопроводах России [21] (рис. 1.1). Однако достижение таких показателей не может считаться приемлемыми, потому что, несмотря на уменьшение удельного числа аварий на 100 тыс. км, их общее количество не снижается из-за ежегодно увеличения суммарной длины трубопроводов.

Анализ причин отказов, произошедших на магистральных трубопроводах России (рис. 1.2), позволяет заключить, что большое их количество возникает из-за брака строительно-монтажных работ. Так, применительно к нефтепроводам – порядка 25 %, а к газопроводам – порядка 23 % отказов происходят по причине низкого качества строительства [5, 6].

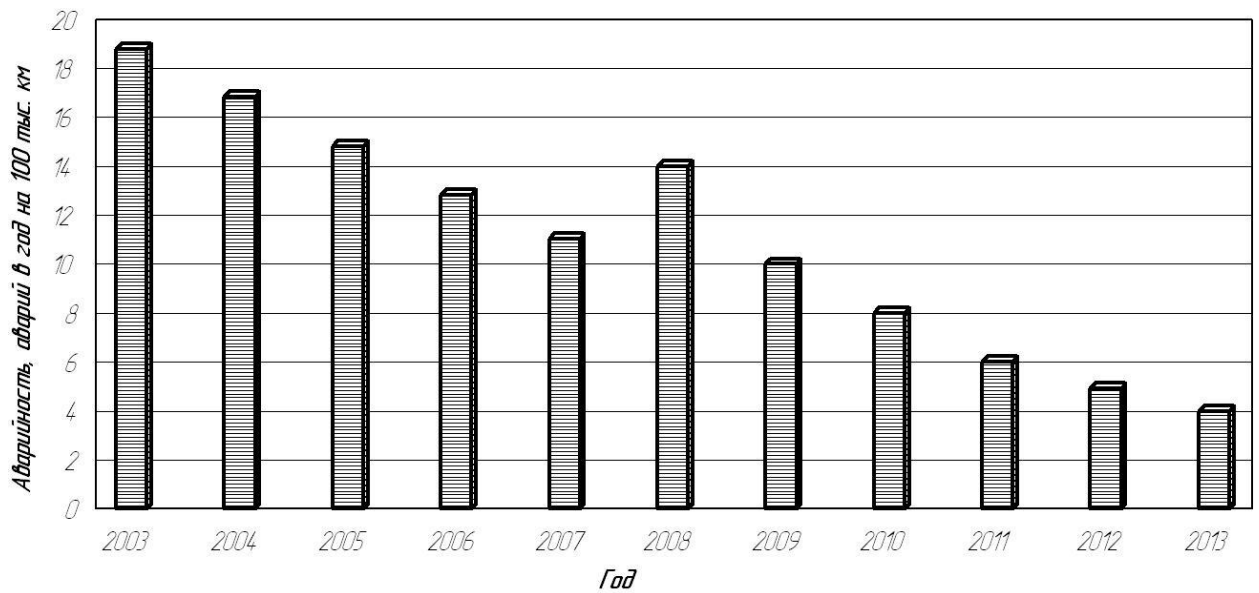
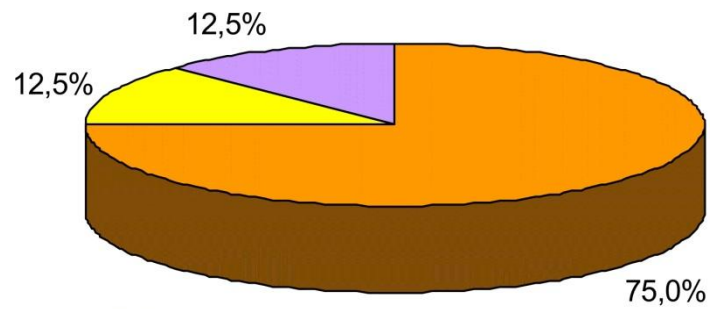
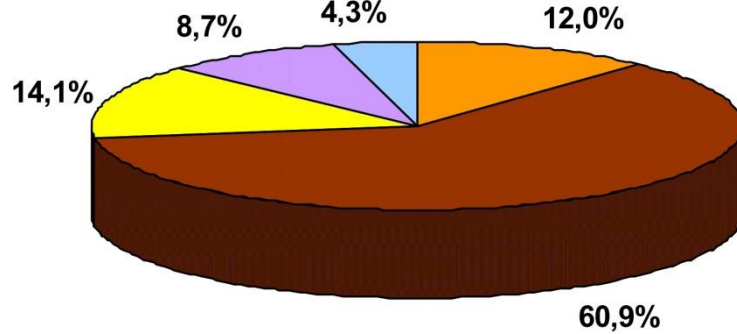


Рисунок 1.1 – Статистика по авариям на трубопроводах [21]

*Магистральные нефтепроводы России*



*Магистральные газопроводы России*



- Внешнее механическое воздействие
- Коррозионное разрушение
- Брак строительно-монтажных работ
- Заводской брак изделия
- Ошибки персонала

Рисунок 1.2 – Причины отказов в процессе эксплуатации магистральных трубопроводов России

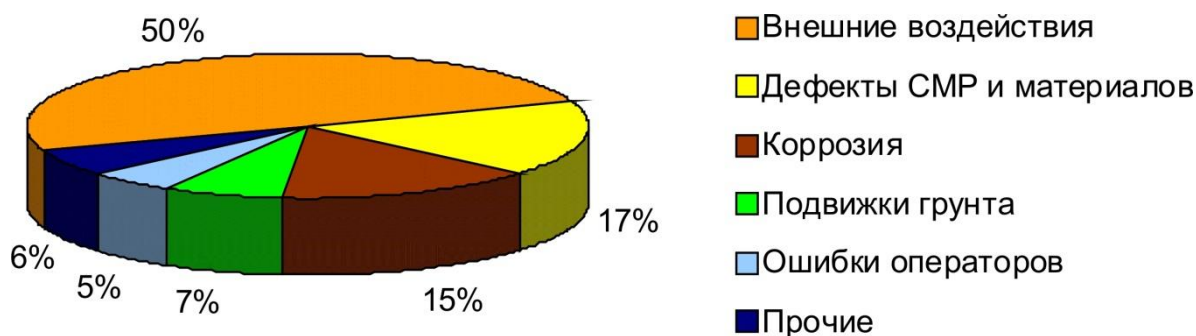


Рисунок 1.3 – Причины отказов в процессе эксплуатации магистральных трубопроводов Европы

В проведённых другими авторами исследования [6] сравнивались параметры отказов трубопроводных систем в России и за рубежом, установлено, что их величины примерно соразмерны друг другу (рис. 3).

Проведённый анализ данных Ростехнадзора по авариям на магистральных трубопроводах позволяет установить их частоту от срока эксплуатации конкретного трубопровода.

Если линеаризовать обобщенную зависимость интенсивности отказов, то будет получена некоторая сложная кривая, имеющая характерные интервалы (рис. 1.4):

- I – период, в котором происходит приработка элементов;
- II – период, в котором происходит нормальная эксплуатация трубопровода;
- III – период, в котором происходит естественное старение трубопровода.

Длительность периода I увеличивается или уменьшается в зависимости от качества выполненных в процессе строительства трубопровода работ. Интенсивность отказов в течение I периода также существенно зависит от качества проведённых строительно-монтажных работ.

В процессе эксплуатации трубопровода происходит быстрое проявление дефектных элементов, а через некоторое время в конструкции трубопровода все дефектные элементы заменяются на бездефектные элементы. Поэтому эксплуатация трубопровода на интервале II

сопровождается постоянными отказами с примерно постоянной интенсивностью.

На интервале III по причине естественного старения, изнашивания, коррозии и т.д., резко возрастает интенсивность отказов, увеличивается число деградационных отказов.

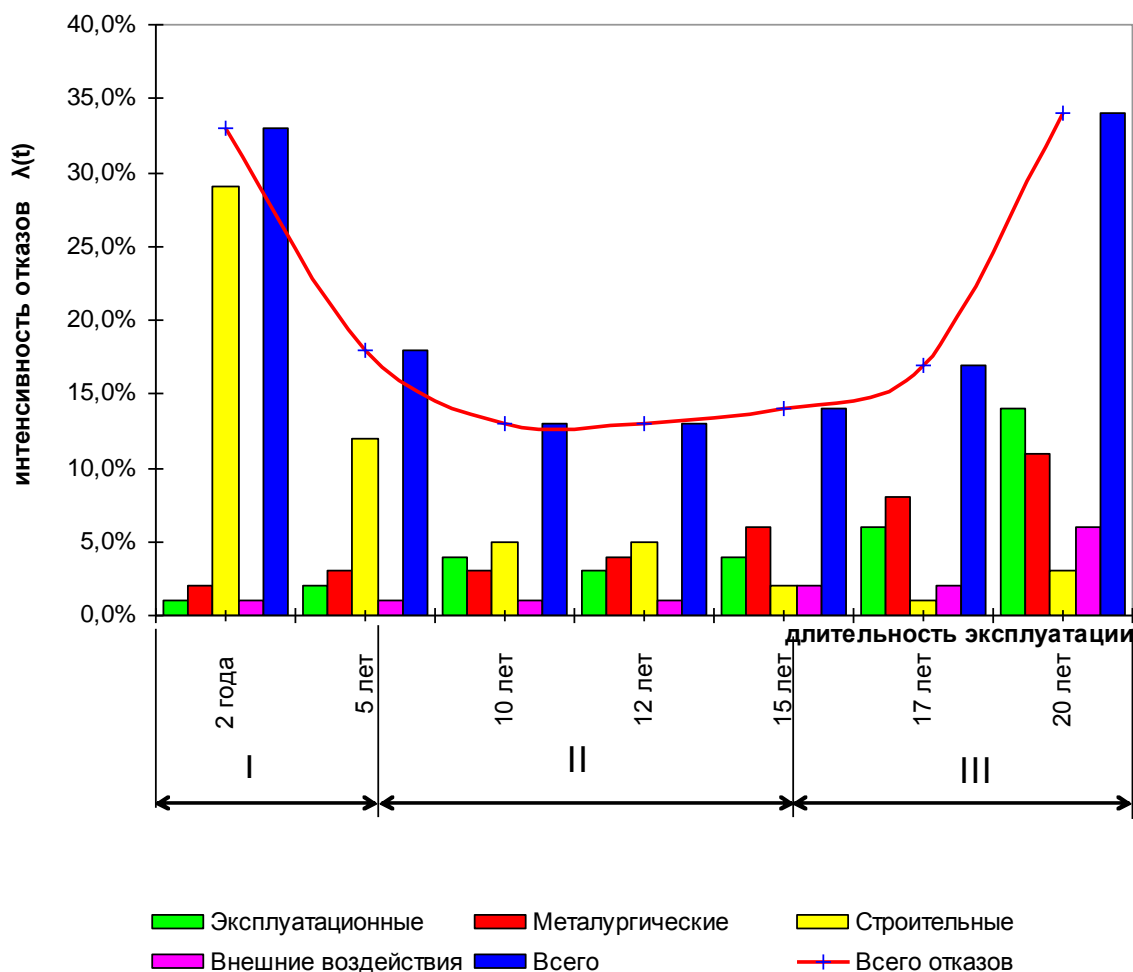


Рисунок 1.4 – Частота и причины аварий на магистральных газопроводах в зависимости от длительности их эксплуатации: I - приработка элементов; II – нормальная эксплуатация объектов; III – естественное старение объекта

В общем случае следует выделять такие причины, как технологическая, конструкционная и эксплуатационная [26], их отдельное и совокупное воздействие снижает прочностную надежность сварной конструкции.

Технологические причины повреждений возникают по причине нарушения технологии сварки и термической обработки. К ним можно

отнести: использование сварочных материалов, которые не соответствуют марочному составу и не отвечают требованиям качества; несоблюдение требований для получения оптимальных тепловых условий сварки и термообработки; нарушение регламентированной технологии сварки или ремонта швов.

Конструкционные причины повреждения возникают из-за зон высокой концентрации напряжений, которые определяются типоразмером сварных соединений, конструктивным оформлением, формой сварных швов и зон сопряжения соединяемых элементов.

Эксплуатационной причиной повреждения является возможная эксплуатация трубопровода с превышением фактических рабочих нагрузок по сравнению с расчетными. Экстремальные силовые нагрузки могут как из-за проектных ошибок, или по причине нарушения регламентируемой технологии эксплуатации ремонтным и эксплуатационным персоналом.

Разрушение сварного соединения при эксплуатации конструкции происходит по причине наличия концентраторов напряжений технологического и конструктивного характера. Эти концентраторы наиболее сильно проявляют себя в условиях циклических нагрузок, тогда даже относительно небольшой концентратор становится источником зарождения трещины. Статическая нагрузка в сочетании ее с собственными напряжениями, воздействием высоких температур и агрессивной среды также приводит к снижению надёжности сварного соединения до небезопасного уровня.

Как показывает практика, никакой метод и никакое средство неразрушающего контроля, которые используются при сварке магистральных трубопроводов, не могут считаться универсальным и не удовлетворяют в полном объеме требованиям. Выбор того или иного метода и прибора контроля для проведения дефектоскопии и технической диагностики определяется параметрами контролируемого объекта и условиями его обследования.

## 1.2 Дефекты при сварке магистральных трубопроводов

Сварка металла сопровождается необратимыми физико-химическими процессами, которые определяющим образом влияют на надежность сварной конструкции [25]. Сварка металла приводит к:

- изменению свойств металла, причинами которых являются плавление и кристаллизация в сварном шве, структурные и фазовые изменения и разупрочнение в зоне термического влияния;
- ухудшению напряженного состояния, причинами которого являются возникающие собственные, упругие (остаточные) напряжения и пластические деформации, а также геометрическая, технологическая и конструктивная неоднородность;
- концентрации в зоне сварного шва различных неоднородностей со значительным градиентом этих неоднородностей: химическая, структурная, фазовая; собственные напряжения и деформации; геометрическая, связанная с опасностью возникновения технологических концентраторов и наличием конструктивных концентраторов. Указанные неоднородности вызывают неоднородность механических свойств, электрохимических и физических свойств. Это приводит в свою очередь к повышенной чувствительности сварных соединений к воздействию эксплуатационных сред, что особенно сильно проявляется в условиях напряженного состояния.

Описание возникающих в сварных соединениях дефектов приведены в [7, 9, 10, 11]. К ним относятся следующие дефекты: трещины сварного соединения (продольные и поперечные, разветвлённые); микротрещины сварного соединения; усадочные раковины в сварном шве; вогнутость корня шва; свищи в сварном шве; одиночные поры и цепочки пор в сварном шве; непровары; прожоги; шлаковые включения; брызги металла; поверхностное окисление сварного соединения; подрезы зоны сплавления; наплывы на сварном соединении; смещение сваренных кромок.

Для определения степени опасности дефекта следует учитывать напряженное состояние контролируемого участка, вид и размеры дефекта, его ориентацию относительно действующих напряжений. Основными факторами, которые определяют степень опасности дефекта, будут являться утонение стенки трубопровода и коэффициент концентрации механических напряжений (в трещинах - коэффициент интенсивности напряжений), показывающий, во сколько раз максимальные местные напряжения в зоне дефекта выше, чем в бездефектной зоне [12]. Виды допустимых дефектов и их величина приведены в нормативной документации [11].

Проведённое сопоставление частоты появления дефектов в очагах отказов (рис. 1.5) позволило определить вероятность бездефектности сварного соединения при использовании различных методов контроля (рис. 1.6). Вновь вводимые нормативные документы, регламентирующие контроль качества сварных соединений, предусматривают увеличение объемов контроля до 200...300 %. Следует отметить, что такой подход не является оптимальным средством повышения безотказности трубопроводов.

В ходе статистического анализа данных по выявляемости дефектов установлено, уровень выявления дефектов может быть повышен путём дифференцированного выбора методов контроля, что не требует увеличения объема контроля. Это позволяет повысить качество строительно-монтажных работ, а также снизить затраты на их контроль качества.

Определение компонентов проблемы, оказывающих наибольшее влияние на качество трубопроводного строительства, произведено с использованием графика Парето (рис. 1.7 и рис. 1.8). Построенные диаграммы позволили выделить приоритетные направления по совершенствованию процессов контроля и обеспечению контролепригодности различных технологических операций. Полученные статистические данные позволили произвести оценку влияния дефектов на разрушение трубопроводов. В частности, было установлено поры и непровары вносят наибольший вклад в отрицательную статистику [6].

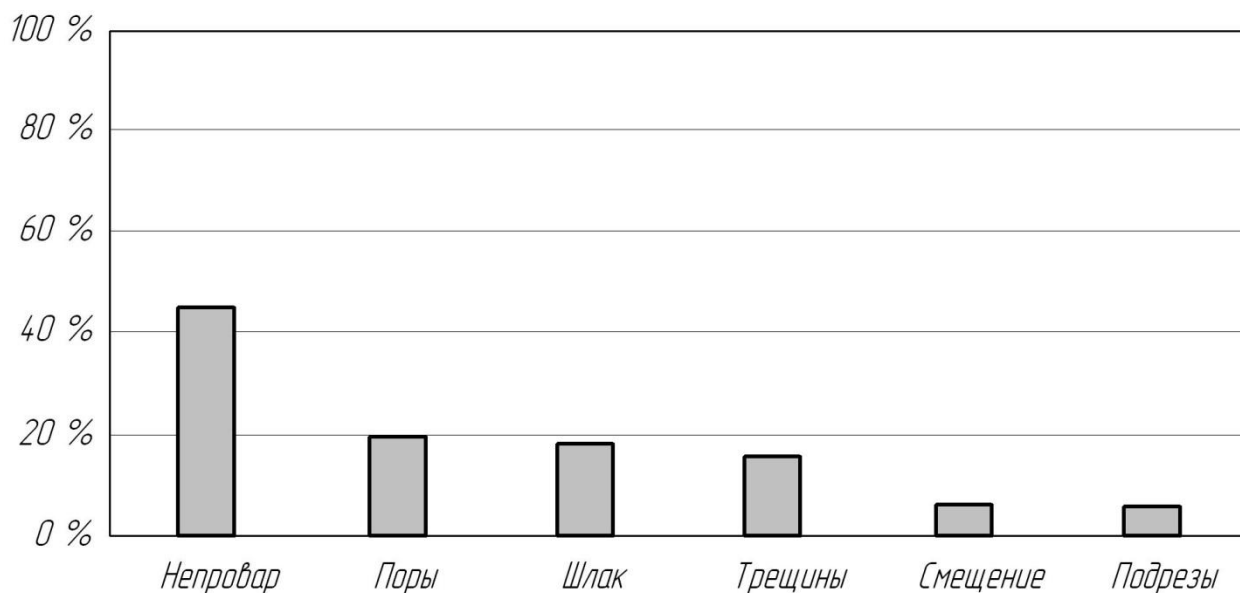


Рисунок 1.5 – Проявление дефектов сварки в очаге аварии трубопровода

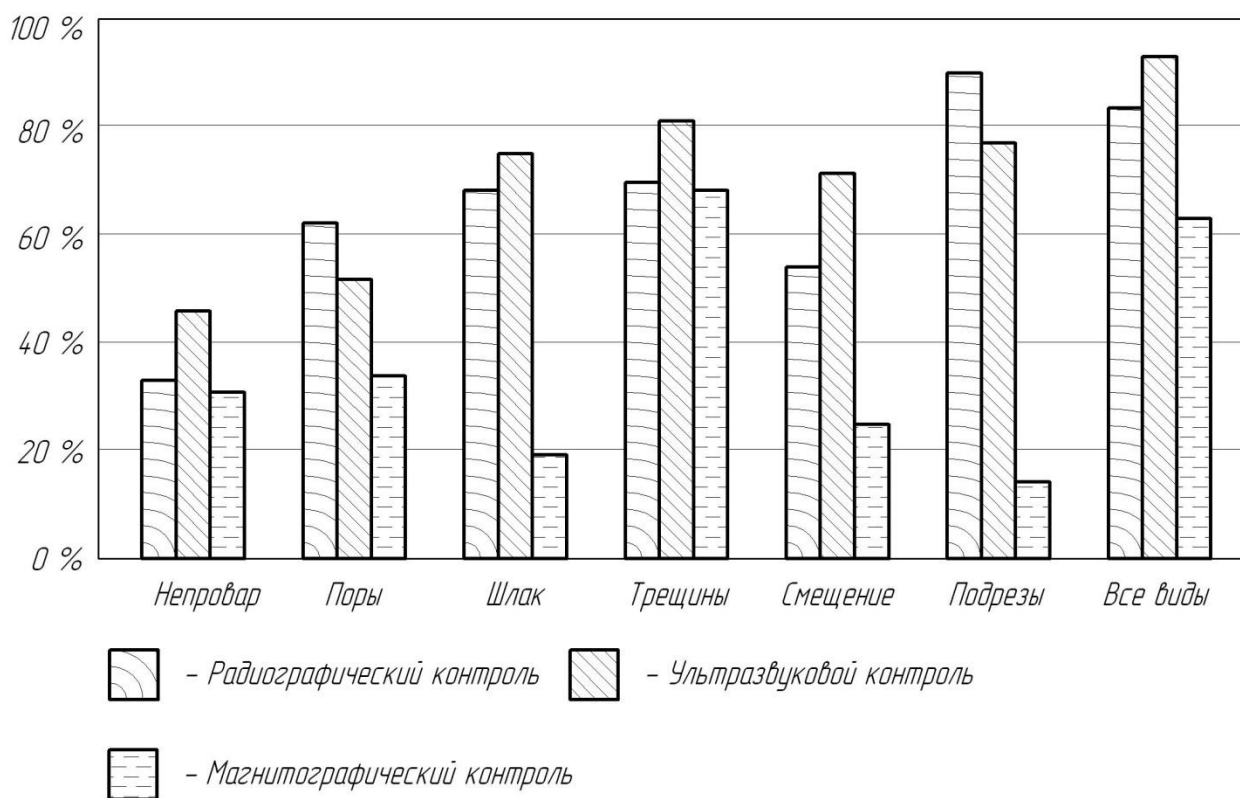


Рисунок 1.6 – Вероятность бездефектности сварного соединения при использовании различных методов контроля качества



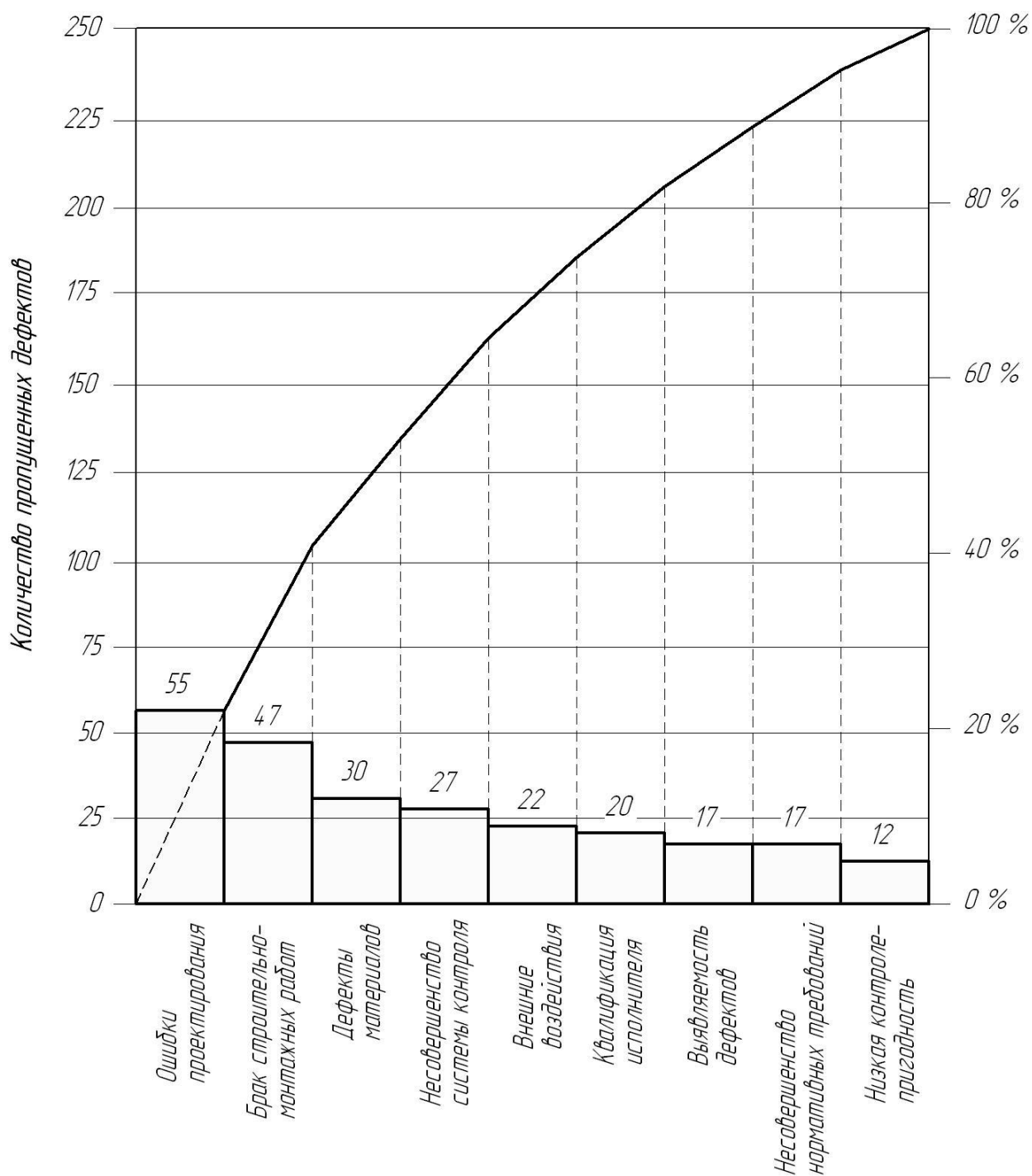


Рисунок 1.7 – Диаграмма Парето с возможными первопричинами образования дефектов в магистральном трубопроводе при его строительстве

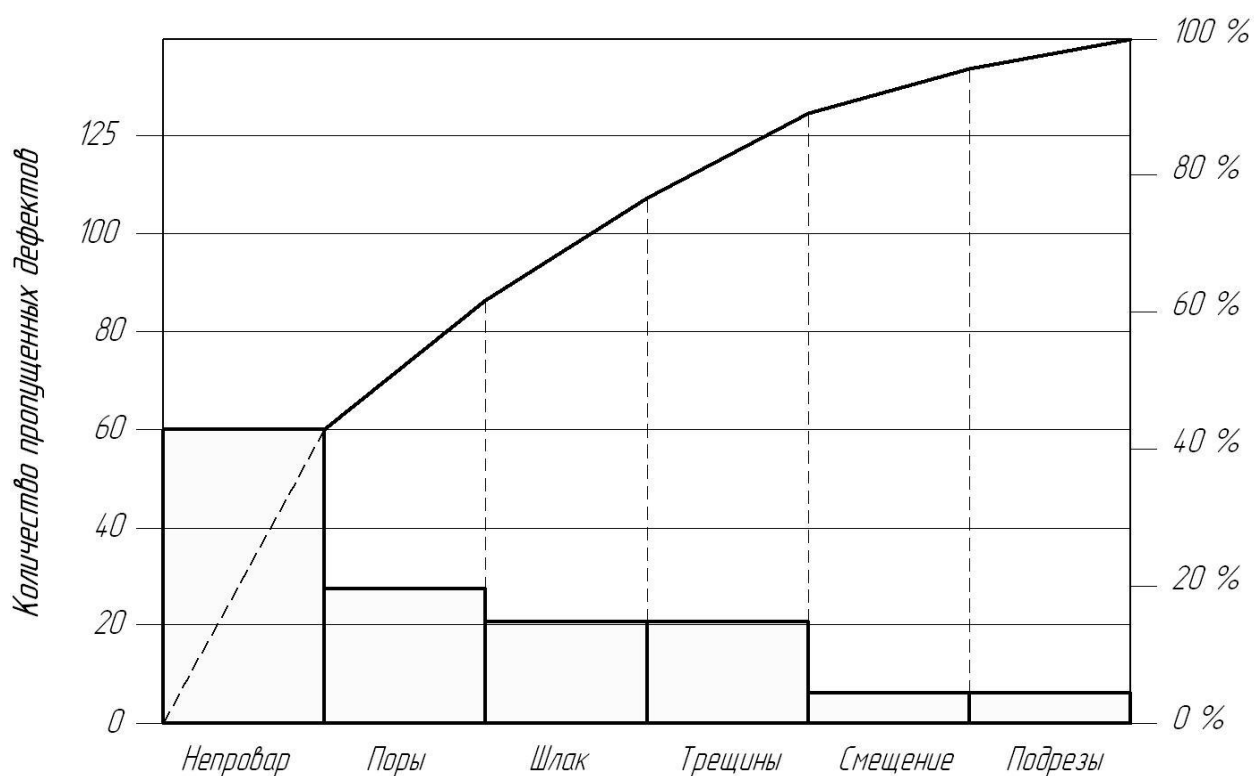


Рисунок 1.8 – Диаграмма Парето по видам остаточных дефектов в трубопроводе образовавшихся в процессе сварочно-монтажных работ

По данным работы [27] доля сварного оборудования оболочкового типа, к которым относят трубопроводы, составляет порядка 75 % массы всего оборудования в нефтегазохимической промышленности. При этом около 25% всех отказов приходится на начальную стадию его эксплуатации трубопровода, в этом случае источниками разрушения являются дефекты, получившиеся в процессе строительства или ремонта трубопровода, в частности дефекты сварных соединений.

## 1.3 Повышение эффективности сварки при строительстве магистральных трубопроводов

### 1.3.1 Общие сведения

Проведенный комплекс исследований [14] позволил рекомендовать комбинированную технологию механизированной орбитальной сварки трубопроводов, соответственно которой сварку корневого слоя шва выполняют сплошной проволокой за два полуоборота плавящимся электродом в  $\text{CO}_2$  или смеси газов с управляемым каплепереносом электродного металла (УКП), а сварку «горячего прохода», заполняющих, корректирующего и облицовочного слоев шва – порошковой проволокой.

Предусмотрен вариант технологии, при котором сварку корневого слоя шва выполняют ручной дуговой сваркой. В процессе сравнительной оценки производительности различных вариантов сварки установлено, что сварка с УКП, хотя и обеспечивает определенное снижение требований к качеству сборки кольцевых стыковых соединений при сварке корневого слоя шва, несколько уступает по производительности традиционной сварке плавящимся электродом при заполнении разделки. Установлено существенное повышение производительности процесса сварки в защитных газах при заполнении разделки с использованием порошковых проволок.

Для увеличения производительности наплавки, сокращения объемов поставки защитных газов, а следовательно, транспортных издержек во многих случаях заполнение разделки и сварку облицовочного слоя целесообразно выполнять самозащитной порошковой проволокой. При этом для обеспечения стабильно высокого качества сварных соединений необходимо учитывать ряд следующих технологических особенностей формирования швов.

Однако при механизированной сварке самозащитной порошковой проволокой неповоротных стыков труб в заузенную разделку возникает ряд

проблем, связанных с увеличенным размером вылета электрода при заполнении донной части разделки, блужданием дуги из-за остаточной деформации проволоки в вылете, вероятностью возникновения несплавлений по кромкам разделки, более проблематичным удалением шлака между «горячим проходом» и первым заполняющим слоем шва, а также необходимостью более жесткого контроля параметров сварки во избежание появления пор. Со схожими проблемами сталкиваются и за рубежом [18, 19].

Повысить эффективность дуговой сварки в защитных газах можно за счёт управления плавлением и переносом электродного металла путём введения в процесс сварки дополнительных электрических импульсов сварочного тока. Исследователями в области управления плавлением и переносом электродного металла при сварке в защитных газах являются Болдырев А.М., Дюргеров Н.Г., Заруба И.И., Князьков А.Ф., Ленивкин В.А., Сагиров Х.Н., Патон Б.Е., Потапьевский А.Г., Шейко П.П., Их работы позволили предложить различные способы, осуществляющие импульсное воздействие на процесс сварки. Известно, что получение управляемого переноса электродного металла, возможность управления геометрией шва и структурой металла шва при сварке в среде активных, инертных газов и их смесях, возможно при получении периодически изменяющейся формы тока дуги [40, 41].

Управление горением и свойствами сварочной дуги позволяет повысить стабильность горения дуги, получить направленный перенос электродного металла в сварочную ванну. Это особенно актуально при сварке в положениях, отличных от нижнего. А также позволяет воздействовать на протекающие в сварочной ванне и околошовной зоне процессы (управлять первичной кристаллизацией металла шва и термическим циклом в околошовной зоне) [32].

Импульсные процессы при сварке можно разделить на:

- сварку модулированным током;
- импульсно-дуговую сварку;

- сварка пульсирующей дугой;
- импульсная подача проволоки.

На российском рынке широко представлено импортное оборудование, которое позволяет выполнять как одностороннюю сварку (Serimax, Франция; Pipe Welding Technology, Италия), так и двухстороннюю сварку (фирма CRC Evans, США). Следует отметить, что оборудование фирмы Serimax позволяет производить сварку одновременно двумя дугами из одной общей горелки. В последнее время получили распространение различные способы управления переносом капли металла через дуговой промежуток: процесс STT фирмы Lincoln Electric (США), процесс FastROOT – сварка модифицированной короткой дугой фирмы KEMPPi (Финляндия), процесс «холодного» каплепереноса (Cold Metal Transfer) фирмы Fronius International GmbH (Австрия), процесс Force Arc фирмы EWM (Германия) и др.

### 1.3.2 Сварка модулированным током

Для удержания сварочной ванны в пространственных положениях, отличных от нижнего, необходимо снизить значение сварочного тока. В тоже время требуемые сварочно-технологические свойства электрода обеспечиваются при величинах сварочного тока, существенно выше, чем необходимо для удержания сварочной ванны. Решение этой задачи осуществляется сварщиком посредством различных манипуляций электродом, вплоть до обрыва дуги, а это сопровождается образованием дефектов, как в процессе выполнения корня шва, так и в процессе заполнения разделки.

Указанное противоречие в требованиях к сварочному току может быть разрешено с применением методов импульсной модуляции сварочного тока (рис. 1.9). Сварка модулированным током обладает рядом преимуществ перед сваркой стационарной дугой: улучшенное формирование шва при сварке во всех пространственных положениях, повышаются механические

свойства сварных соединений, улучшается дегазация сварочной ванны, снижаются сварочные деформации и др. [33].

Дополнительные импульсы, протекающие в интервале основной паузы, обеспечивают технологическую устойчивость процесса сварки модулированным током. Их длительность и частота влияют на равномерность плавления покрытого электрода и отсутствие «козырька», а также при сварке корня шва и изделий малой толщины – на поддержание существования «замочной скважины» [35].

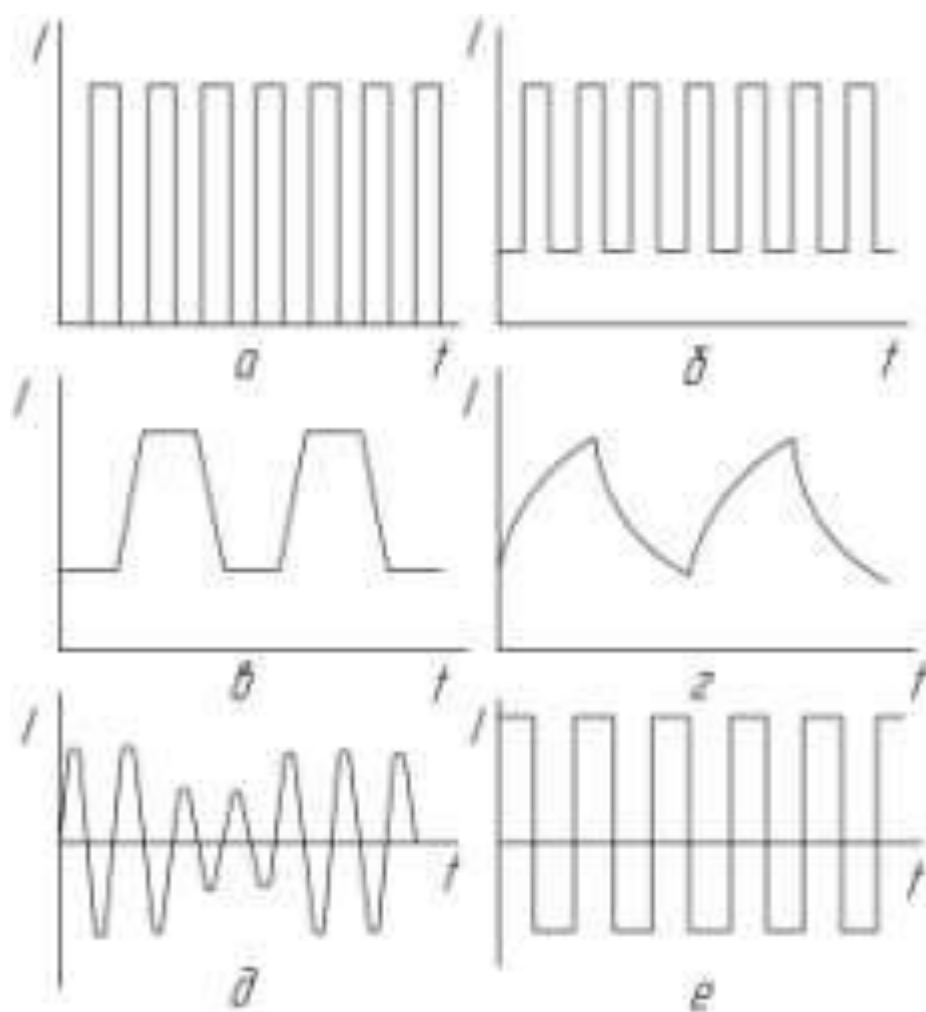


Рисунок 1.9 – Циклограммы процессов сварки модулированным током [34]:

- а, б, в, г) низкая частота следования импульсов с изменением скорости подачи;
- д) изменение амплитуды при модулировании переменного тока;
- е) сварка разнополярными импульсами

### 1.3.3 Импульсно-дуговая сварка

В настоящее время способы импульсно-дуговой сварки продолжают развиваться. Можно отметить такие новые способы, как двухдуговая импульсная сварка, импульсно-дуговая сварка с подогревом электродной проволоки, импульсная сварка с увеличенным вылетом электродной проволоки, технологии STT, ForceArc, ColdArc, SpeedPulse.

Путём объединения положительных свойств импульсной дуги (высокое качество) и струйной дуги (высокая производительность сварки) была получена технология SpeedPulse. Такая технология обеспечивает уменьшенное тепловложение, улучшает провар и формирование шва. В отличие от традиционного импульсного процесса, во время пауз между импульсами на весьма малое время (доли миллисекунды) включается струйный процесс сварки. Это приводит к тому, что перенос электродного металла начинает дополнительно происходить и между импульсами [36].

Сварка по технологии SpeedPulse проводится при дистанции порядка 65...70 мм, при этом длина дуги составляет всего 3...4 мм. Увеличение дистанции работ приводит к тому, что процесс горения дуги переходит в нестабильную фазу, повышается разбрызгивание; дугу как-бы «затягивает» внутрь металла. Процесс сварки по SpeedPulse характеризуется высокой производительностью (увеличение до 40...45%) и резким снижением удельного тепловложения.

Своё название сварочный процесс STT получил от сокращения английского термина «Surface Tension Transfer» – «перенос за счет сил поверхностного натяжения». Этот процесс предложен компанией «LincolnElectric» по результатам исследований в области управления переносом металла при сварке. Процесс STT является преемником обычного сварочного процесса MIG/MAG с переносом металла короткими замыканиями, однако имеет возможность прямого управления условиями переноса в сварочную ванну наплавляемого металла [37].

### 1.3.4 Механизированная сварка короткой дугой с короткими замыканиями

В настоящее время многие производители сварочного оборудования предлагают оборудование с поддержанием процесса сварки сжатой, короткой дугой. Сварка на форсированной дуге обладает рядом преимуществ перед сваркой со струйным переносом металла:

- увеличивается проплавление вследствие увеличения давления дуги на ванну жидкого металла;
- устраняются подрезы благодаря сварке на короткой дуге;
- повышается производительность, что обусловлено более высокой скоростью процесса сварки и увеличением коэффициента наплавки (уменьшается число проходов);
- появляется возможность уменьшения ширины разделки.

Процесс SpeedArc позволяет повысить качество соединений при сварке деталей из толстолистового металла, позволяет обеспечить гарантированное проплавление в корне шва, а также позволяет осуществлять сварку в узкую разделку. В отличие от сварки со стандартным струйным переносом, сварка по технологии SpeedArc позволяет поддерживать уверенный струйный перенос металла при более короткой дуге. Дуга при этом становится более сфокусированной, обладает высокой устойчивостью. Высокое давление в дуге позволяет получить более глубокое проплавление. При этом уменьшается вложение тепла в основной металл и снижается вероятность возникновения подрезов [38].

Был произведён сравнительный анализ осциллограмм процесса SpeedArc, предлагаемого компанией Lorch, и осциллограммам процесса RapidArc, предлагаемого компанией LincolnElectric [39] (рис. 1.10). Представленные осциллограммы по напряжению позволяют судить, что сварку в обоих случаях ведут короткими замыканиями. В момент короткого замыкания ток снижается до базового значения. Это позволяет получить



перенос металла без разбрызгивания, которое наблюдалось бы в процессе сварки на стационарной дуге из-за «взрыва» перемычки в связи с увеличением силы тока.

Макрошлифы сварных соединений (рис. 1.11) свидетельствуют в обоих случаях о возможности получения глубокого и достаточно узкого проплавления, подрезы отсутствуют. Процесс короткой сфокусированной дугой с короткими замыканиями позволяет снизить разбрызгивание, получить глубокое проплавление и увеличить производительность сварки без потери качества.

Областью применения процесса сварки короткой дугой с короткими замыканиями является:

- сварка металла больших толщин;
- сварка корневого слоя шва;
- сварка в узкую разделку;
- сварка легированных сталей и сплавов.

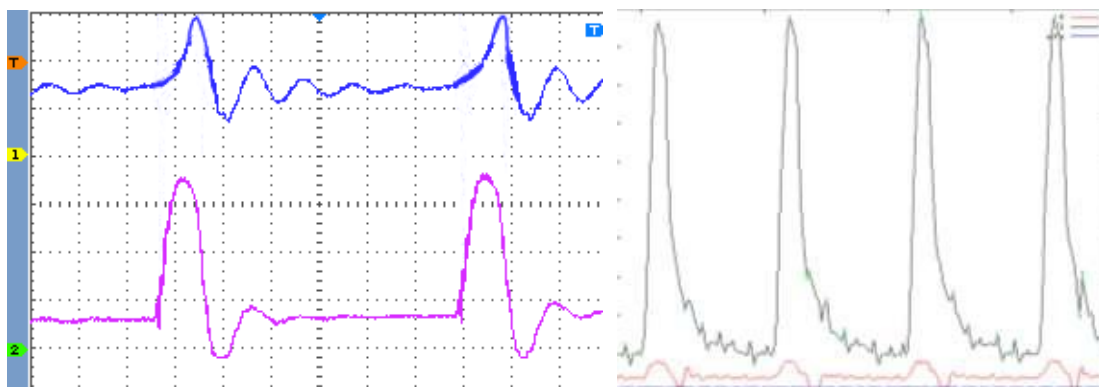


Рисунок 1.10 – Осциллограммы по току и напряжению процессов SpeedArc (слева) и RapidArc (справа)

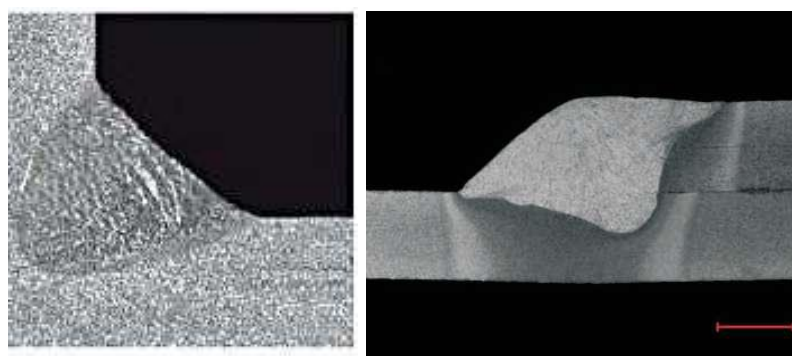


Рисунок 1.11 – Макрошлифы процесса SpeedArc (справа) и RapidArc (слева)

## 1.4 Базовая технология сварки магистрального трубопровода с использованием сварки плавящимся электродом в защитных газах

### 1.4.1 Свойства материала труб

Для строительства магистрального нефтепровода применяются трубы из бейнитной, феррито-бейнитной стали с классом прочности K65 (L555, X80). За счёт использования внешнего полимерного покрытия достигается предотвращение коррозионного разрушения труб. Внутренняя поверхность труб покрывается эпоксидным слоем.

Таблица 1.1 – Физико-механические свойства труб

Предел текучести,	Ударная вязкость основного металла при t не выше -40°,	Временное сопротивление, не менее,	Ударная вязкость основного металла при t не выше -20°,	Ударная вязкость металла шва зоны термического влияния при t не выше -40°,	Относительное удлинение,	Отношение предела текучести к временному сопротивлению в поперечном и продольном направлении, не более
$\sigma_T$	KCV <sup>-40</sup>	$\sigma_B$	KCV <sup>-20</sup>	KCV <sup>-40</sup>	$\delta_5$	$\sigma_T/\sigma_B$
555-675 МПа	70 Дж/см <sup>2</sup>	645 (615) МПа	250 (238) Дж/см <sup>2</sup>	50 Дж/см <sup>2</sup>	18 %	0,92

Таблица 1.2 – Хим. состав и механические свойства сталей, применяемых для изготовления труб и строительства магистральных трубопроводов

	Марка материала		
	E550	APIX80	APIX100
Углерод	0,096	0,07	0,07
Марганец	1,94	1,86	1,90
Кремний	0,40	0,27	0,20
Сера	0,001	0,001	0,001
Фосфор	0,018	0,015	0,015
Молибден	0,01	0,15	0,30
Алюминий	0,038	0,036	0,00
Ниобий	0,043	0,04	0,05
Ванадий	0,00	0,00	0,00
Азот	0,004	0,0057	0,00
Титан	0,017	0,023	0,015
Медь	0,00	0,00	0,20
Никель	0,00	0,00	0,20
Предел прочности, МПа	730±19	685	795
Предел текучести, МПа	612±18	559	740
Ударная вязкость, КСv,	187±40	224	235
Относительное удлинение %	22±1	20	18,5

Стали с маркой прочности К 65 обладают отличной свариваемостью. Применение в качестве легирующего элемента ниобия вместо титана позволяет получить достаточно высокие характеристики свариваемости материала при дуговой сварке и при контактной сварке. Под действием термического цикла в процессе сварки металл в зоне термического воздействия охрупчивается, происходит снижение его ударной вязкости. Следует отметить, что этот негативный эффект лишь незначительно влияет на эксплуатационные показатели трубопровода, при этом надежность получаемых сварных соединений практически не снижается.

В Российской Федерации проводятся работы по расширению производства труб для строительства магистральных трубопроводов с классом прочности X80. В этих работах принимают участие трубные заводы в городах Выксск, Волжский и Колпино. В изучении вопроса производства труб класса X80 принимали участие трубный завод Украины (г. Харцызск) и институт сварки им. Бориса Евгеньевича Патона.

#### 1.4.2 Сварка корневого слоя шва

Корневой слой сварного шва выполняем с использованием механизированной сварки проволокой сплошного сечения, применяя технологию STT. При сварке труб процессом STT используют стандартную разделку кромок. Процесс сварки обладает меньшей чувствительностью к плохой сборке, по сравнению с обычными методами сварки.

Для сварки корневого слоя шва используем сварочную проволоку марки L-56 диаметром 1,14 мм (производитель – Lincoln Electric, США) или аттестованные аналоги этой проволоки.

Проволока SuperArc L-56 (рис. 1.12) специально разработана для сварки металлических конструкций, покрытых слоем окалины (средней или значительной толщины). Максимальное качество сварки достигается при её использовании по чистым поверхностям, не содержащим следов смазки и ржавчины.

В состав проволоки входит значительное количество кремния и марганца, которые используются в качестве раскислителей. При использовании проволоки и соблюдении требований технологии получаются сварные швы, внешний вид которых и смачивающие свойства даже выше, чем требуемые по классификации ER70S-3 и ER70S-4. Сварщики-профессионалы отдают предпочтение проволоке SuperArc L-56 за «мягкость» горения дуги и простоту подачи проволоки.

Таблица 1.2 – Химический состав проволоки SuperArc L-56

C	Mn	Si	S	P	Cu
0,05...0,15 %	1,40...1,85 %	0,80...1,15 %	< 0,035 %	< 0,025 %	до 0,50 %

Таблица 1.3 – Механические свойства наплавленного металла

Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относит. удли., %	Ударная вязкость при -29 °С, Дж
564	468	29	54



Рисунок 1.12 – Проволока SuperArc L-56

4) Параметры режима сварки следует выбирать по рекомендациям фирмы Lincoln Electric (табл. 1.4). Вылет электрода принят 9,5...15,9 мм. Типовой ошибкой при сварке с применением технологии STT является чрезмерный вылет проволоки. В целях улучшения контроля за вылетом электрода необходимо следить, чтобы отступ контактного наконечника от торца сопла сварочной горелки составлял 6,4 мм.

Таблица 1.4 – Параметры режима сварки при выполнении корня шва с применением технологии STT, проволока SuperArc L-56, диаметр 1,14 мм

Скор. подачи пров., дюйм./мин	Величина пикового тока, А	Величина сварочного тока, А	Величина базового тока, А	Расход защитного газа, л/мин	Вылет сварочной проволоки, мм
90...170	400...420	150...170	35...55	10...12	10...16

5) Полуавтоматическую сварку корня шва неповоротных стыков труб по технологии STT следует вести на спуск (рис. 1.13). Сварку следует начинать в верхней части трубы (положение 12-ти часов). Дугу возбуждают на одной из кромок деталей. Затем дугу переводят на противоположную кромку, при этом формируется сварочная ванна. На этом участке трубы сварку осуществляют с приложением дугообразных колебаний небольшой

амплитуды. Дугу располагают внутри сварочной ванны в первой четверти или трети от ее переднего фронта. Следует избегать расположения дуги на передней кромке сварочной ванны. В позиции от 12-ти часов до 2-х часов сварку следует производить углом назад. При этом угол наклона электрода необходимо поддерживать 45 градусов. При осуществлении дугообразных колебаний, следует не задерживаться на кромках трубы. Прямолинейные колебания «с кромки на кромку» увеличивают проплавление. Большой глубины проплавления можно достигнуть, если поддерживать горение дуги внутри сварочной ванны.

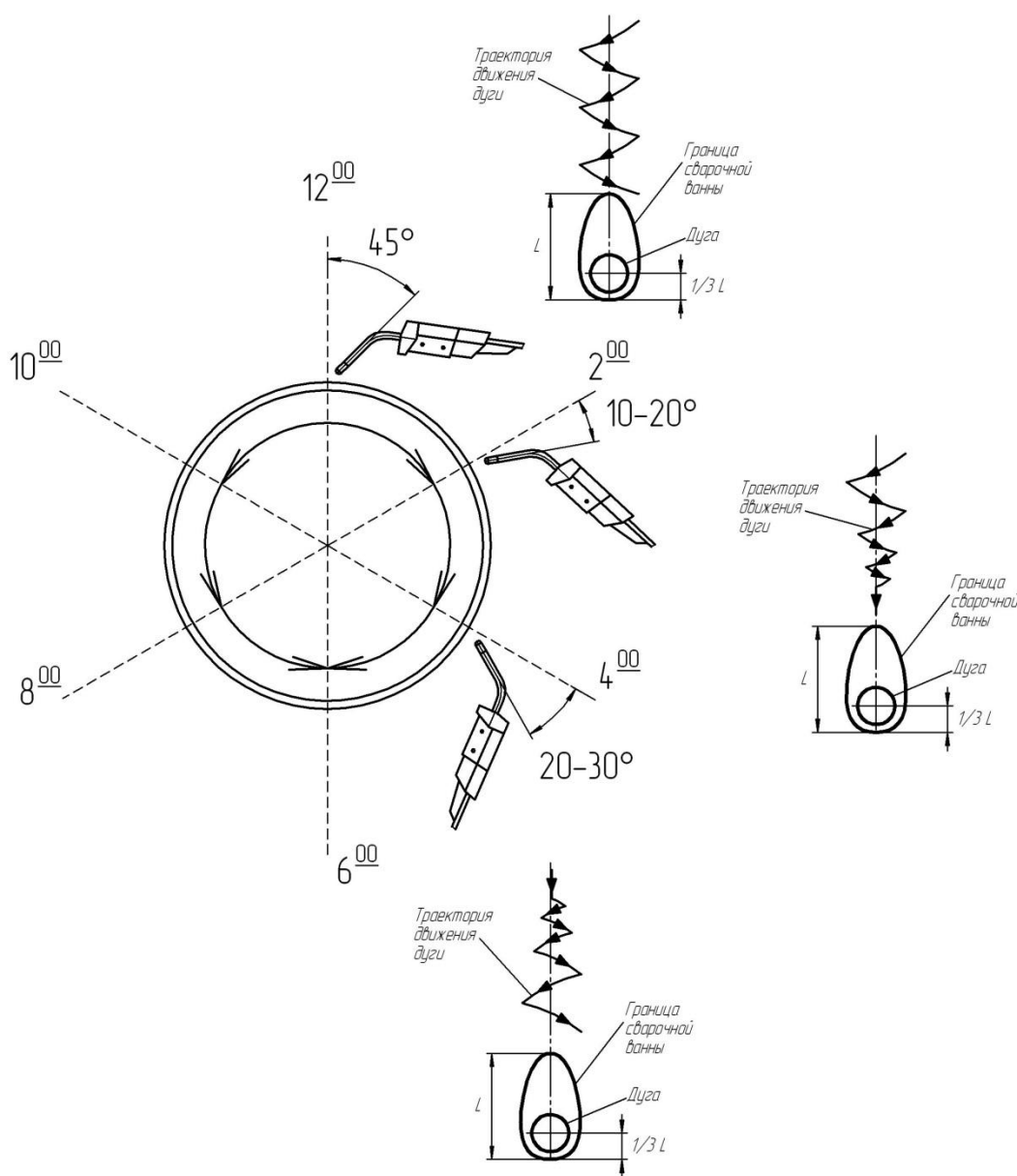


Рисунок 1.13 – Техника сварки корневого слоя по технологии STT

В положении с 2-х часов до 4-х часов амплитуду колебаний следует уменьшать и совсем прекратить колебания. При этом продолжают двигаться вдоль стыка и располагают дугу внутри сварочной ванны в первой трети от ее переднего фронта. На этом участке угол наклона электрода следует уменьшить до 10...20 градусов.

В позиции от 4-х до 6-и часов колебания электрода можно возобновить, также следует увеличить угол наклона электрода до 20...30 градусов. В случае прекращения сварки прерывать дугу необходимо на одной из кромок деталей. Внешний вид наплавленного валика позволяет судить о необходимости корректировки параметров сварки.

б) Сварку корневого слоя шва ведут с использованием аппарата Invertec STT-II (рис. 1.14), который является сварочным источником, реализующим процесс STT (Surface Tension Transfer) – «перенос силами поверхностного натяжения».

Преимущества аппарата Invertec STT-II:

- возможность управления проплавлением и тепловложением, что идеально применительно к сварке соединений с открытым корнем шва.
- уменьшенное разбрызгивание металла и выброс сварочных газов, что осуществляется автоматической регулировкой сварочного тока и оптимизацией процесса переноса металла.
- возможность применения при сварке различных защитных газов и смесей - технология STT II позволяет применение различных типов защитных газов и их смесей (аргон с гелием или 100% CO<sub>2</sub> для проволоки большого диаметра).
- хороший вид сварного шва и высокая производительность сварки, достигаемая без ущерба качеству и внешнему виду – процесс STT II в ряде случаев является альтернативой традиционному способу аргоно-дуговой сварки TIG.
- возможность регулирования таких параметров, как базовый ток и время спада заднего фронта импульса позволяет с высокой точностью

устанавливать величину тепловложения, устранить вероятность прожога и задать необходимое проплавление металла.

- яркий и информативный цифровой дисплей вольтметра и амперметра.



Рисунок 1.14 – Источник питания сварочной дуги Invertec STT-II, оснащённый механизмом подачи проволоки LF-33

#### 1.4.3 Сварка заполняющего и облицовочного слоёв шва

Между окончанием сварки внутреннего (корневого) слоя и началом заполняющего слоя должно проходить не более 10 мин. Если этот интервал времени был превышен, необходимо выполнение подогрева сварного соединения до температур  $+100...130$  °С.

Заполнение разделки производят с использованием наружных однодуговых сварочных головок П-600 (P-600) (рис. 1.15). Сварочную дугу питают от аппарата DC-400 (рис. 1.16).



При сварке необходимо соблюдать значение межслойной температуры, которая должна сохраняться в пределах  $+50...250\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Если межслойная температура вышла за указанные пределы, необходимо произвести подогрев соединения с использованием кольцевых газовых горелок до температур  $60...90\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Рисунок 1.15 – Сварка с использованием двухдуговой головки Р-600



Рисунок 1.16 – Источник питания сварочной дуги DC-400

При сварке используются следующие материалы: в качестве проволоки сплошного сечения использована проволока Union K-Nova Ni диаметром 1,0 мм типа ER80S-G по AWS A5.28, смесь защитных газов – 80%Ar + 20%CO<sub>2</sub>.

Заполняющие и облицовочный слои шва сваривают «на спуск», прикладывая поперечные колебания к электродной проволоке. Сварку ведут с применением одновременно двух наружных сварочных головок, в этом случае каждая половина стыка сваривается своим автоматом. Количество заполняющих слоев (рис. 1.17) – 10. Амплитуда колебаний при сварке облицовочного слоя выбирается из расчета, чтобы обеспечить перекрытие швом разделки кромок на ширину 1,0...2,0 мм в каждую сторону. Усиление шва изнутри и снаружи трубы должно составлять 1...3 мм.

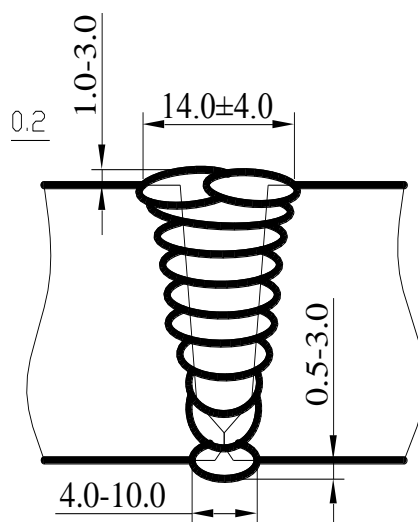


Рисунок 1.17 – Сварной шов труб

Необходимо обеспечить смещение замков смежных слоев шва на расстояние не менее 100 мм. Необходимо проводить зачистку поверхности шва от брызг и шлака по окончании сварки каждого слоя, при этом используются металлические щетки или абразивные круги.

Места обрыва дуги, «замки» швов, необходимо обрабатывать с применением механических способов шлифмашинкой.

После выполнения сварки необходимо выполнение зачистки механическим способом и шлифмашинками на участках облицовочного слоя шва, с грубой чешуйчатостью. Для чешуйчатости шва превышение гребня

над впадиной должно составлять не более 1,0 мм, превышение усиления шва не должно составлять более 3,0 мм. Необходимо добиваться получения плавного перехода от усиления к основному металлу.

В процессе сварки необходимо осуществление пооперационного внешнего осмотра, проверка качества при выполнении каждого слоя шва. Все видимые поверхностные дефекты, в том числе трещины в кратерах, необходимо устранять по мере их обнаружения. Пооперационный внешний осмотр необходимо проводить с участием непосредственного руководителя сварочных работ (мастер, прораб), который должен являться специалистом сварочного производства не ниже Второго уровня профессиональной подготовки в соответствии с требованиями ПБ 03-273-99.

Выполняют зачистку механическим способом поверхностей труб, при этом применяют шлифмашинки с дисковой проволочной щеткой. От шлака и брызг металла зачищаются поверхности труб, которые прилегают к облицовочному слою на расстоянии не менее 10 мм..

Таблица 1.14 – Параметры режима сварки

Параметры	Заполняющие	Наименование слоя шва	
		Облицовочный	Последующие заполняющие
Скорость подачи электродной проволоки, см/мин	1000 -1150* 690-910**	800-1000* 600-750**	1000-1150* 600-1000**
Сила тока, А	190-220* 140-180**	190-220* 140-180**	190-220* 140-180**
Напряжение на дуге, В	21-24	21-23	21-24
Вылет электродной проволоки, мм	13,0	9,5	13,0
Скорость сварки, см/мин	43 -51* 25 -40**	43 -51* 25 -40**	43 -51* 25 -40**
Расход газа, л/мин	19 -32		
Угол наклона электродной проволоки (вперёд)	0°-7°		
Частота колебаний электродной проволоки, мин <sup>-1</sup>	140-190	110-160	140-190
Амплитуда колебаний	Регулируется по ширине разделки		
Защитный газ	80%Ar+20%CO <sub>2</sub>	80%Ar+20%CO <sub>2</sub>	80%Ar+20%CO <sub>2</sub>
* - в пространственном положении от 0 <sup>00</sup> до 4 <sup>00</sup> часов и от 12 <sup>00</sup> до 8 <sup>00</sup> часов. ** - в пространственном положении от 4 <sup>00</sup> до 6 <sup>00</sup> часов и от 8 <sup>00</sup> до 6 <sup>00</sup> часов.			

## 1.5 Задачи диссертационного исследования

На основании проведённого литературного обзора можно сделать вывод, что обеспечение качества сварки магистральных трубопроводов является актуальной задачей. Существенного повышения производительности сварки можно достичь путём применения механизированной сварки, стабильность качества при сварке трубопроводов должна обеспечиваться за счёт управления горением дуги.

Все рассмотренные способы повышения эффективности дуговой сварки имеют достаточно узкую область применения. Существенным недостатком является, в первую очередь, высокая стоимость источников питания.

Проведенный анализ состояния вопроса показал, что для разработки технологий и создания конкурентного, полностью отечественного, оборудования для сварки плавящимся электродом магистральных трубопроводов необходимо исследовать особенности перехода капли электродного металла в ванну при сварке в различных пространственных положениях.

Таким образом, достижение поставленной цели возможно при условии решения следующих задач:

- 1) исследовать влияние параметров и различных условий на формирование сварного соединения при импульсном управлении сварочной дугой;
- 2) исследовать эффективность импульсного управления сварочной дугой и предложить способ импульсного управления сварочной дугой на базе отечественных источников питания;
- 3) предложить технологические мероприятия для внедрения результатов диссертации в производство.

## 2 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ

### 2.1 Общие вопросы применения импульсного управления дугой

Сварка с импульсным управлением дугой позволяют решать следующие технологические проблемы:

- получение управляемого и направленного переноса электродного металла;
- обеспечение возможности проведения сварки при всех пространственных положениях;
- снижение потерь на угар и разбрызгивание.

Создание устройств, осуществляющих импульсное управление процессом сварки и повышающих эффективность сварки, очень перспективно.

Сварка в защитных газах сопровождается сложными динамическими явлениями:

- формирование капель металла на конце электродной проволоки и переход этих капель в сварочную ванну;
- установление новых значений напряжения дуги и силы тока сварки после изменения напряжения холостого хода источника питания или скорости подачи электродной проволоки;
- восстановление первоначальной длины дуги после ее удлинения или сокращения (принцип саморегулирования длины дуги).

Характер и протекание процесса сварки в защитных газах плавящимся электродом определяется главным образом типом переноса электродного металла через в сварочную ванну через дугу. Перенос металла происходит каплями расплавленного электродного металла, которые формируются на торце электродной проволоки. Размер этих капель и частота их перехода в сварочную ванну определяются материалом и диаметром электродной проволоки, типом защитного газа, полярностью и значением силы тока

сварки, напряжением дуги, давлением окружающей среды и другими факторами.

Типы переноса электродного металла и действующие в дуге на капли расплавленного металла силы, достаточно полно описаны в работах [8, 9, 10]. Каждый тип переноса металла имеет свои преимущества и недостатки. Типа переноса металла определяет многие технологические характеристики сварочного процесса, например диапазон свариваемых толщин, величину разделки кромок, производительность сварки.

Каждый тип переноса металла электрода характеризуется своим диапазоном значений сварочного тока и напряжения на дуге (рис. 2.1).

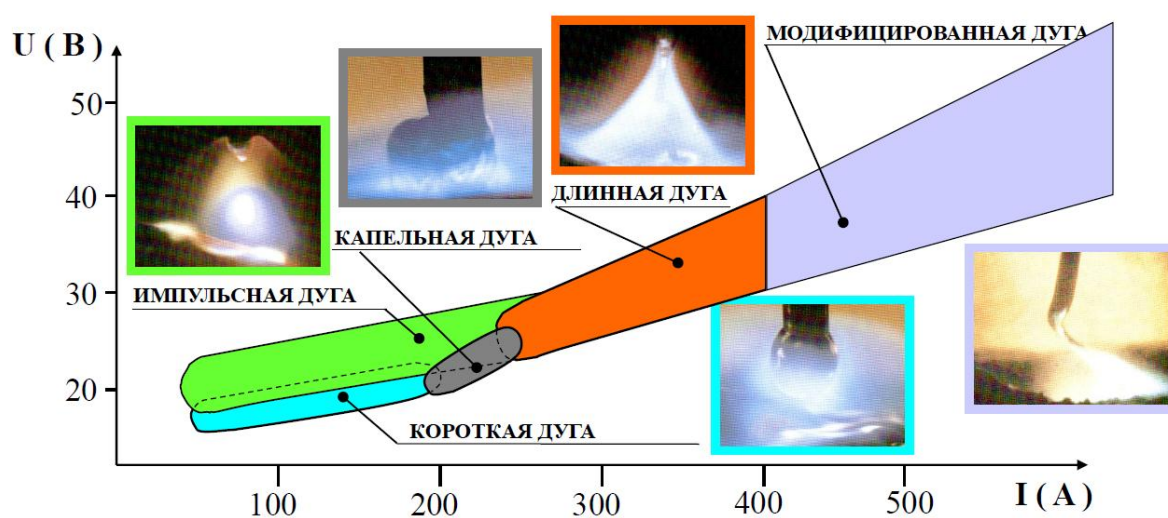


Рисунок 2.1 – Разновидности сварочных дуг при сварке плавящимся электродом в защитных газах в зависимости от типа переноса металла

Появление на рынке силовых транзисторов с высоким быстродействием открыло возможность управления переносом электродного металла, удовлетворяющего как требованиям уменьшения разбрызгивания, так и устойчивости горения дуги.

На стадии дугового разряда сбоку от оси электрода происходит образование крупной капли, в тоже время происходит оттеснение из-под электрода ванны под действием давления дуги. В конце этой стадии следует предусмотреть снижение тока на время паузы, равное  $t_{\text{п}}=3...4$  мс. Это

приводит к снижению реактивного давления паров на каплю расплавленного металла, при этом происходит сближение капли и сварочной ванны. В начале короткого замыкания в течение времени  $t_{к1}$ , равного приблизительно 1 мс, ток резко снижают, это гарантирует слияние капли с ванной, затем напряжение источника питания восстанавливают, что сопровождается нарастанием тока короткого замыкания в течение времени  $t_{к2} = 2...4$  мс и перетеканием капли в сварочную ванну. В конце стадии короткого замыкания в течение времени  $t_{к3} = 1$  мс ток снова снижают, что позволяет устранить газодинамический удар при разрыве перемычки между каплей и электродом. Далее напряжение источника восстанавливают и кратковременно повышают, что обеспечивает надежное повторное зажигание дуги. Такое управление переносом металла при сварке в среде углекислого газа существенно снижает разбрызгивание и повышает устойчивость процесса.

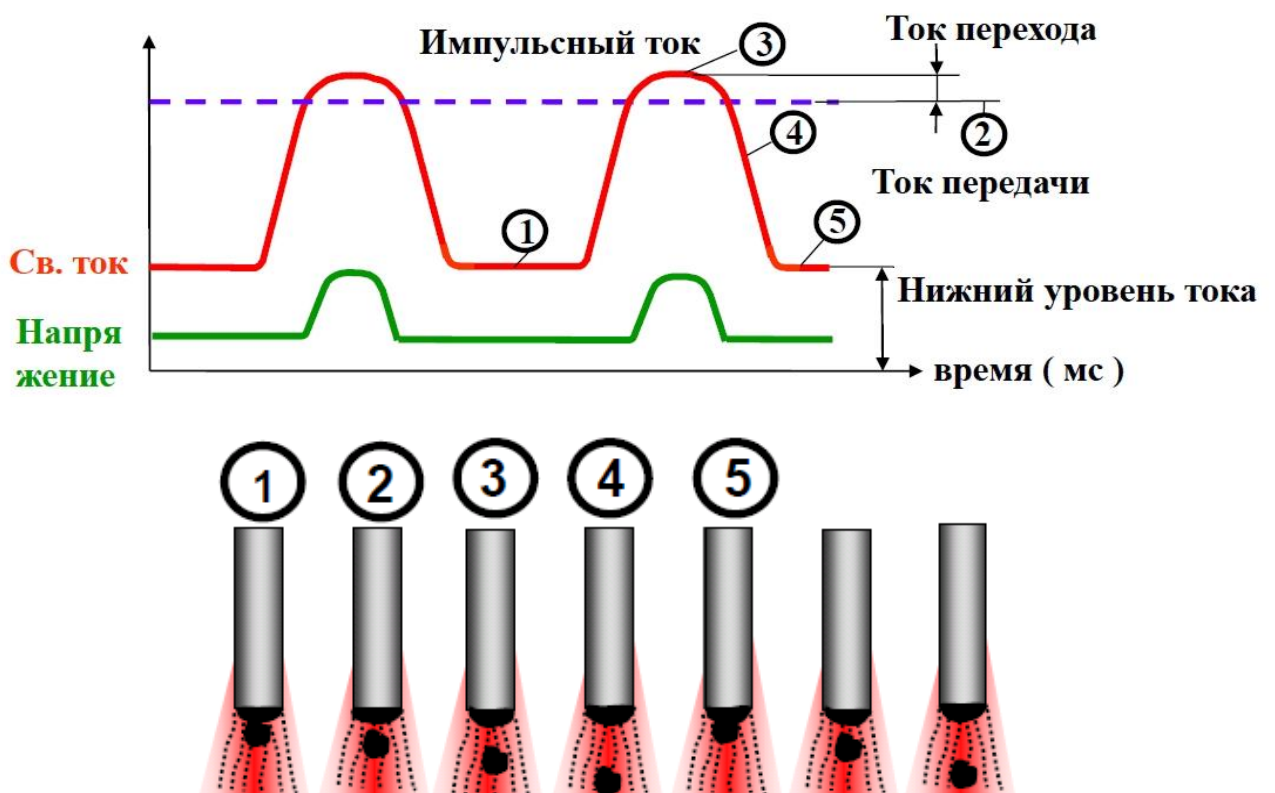


Рисунок 2.2 – Принцип импульсной сварки



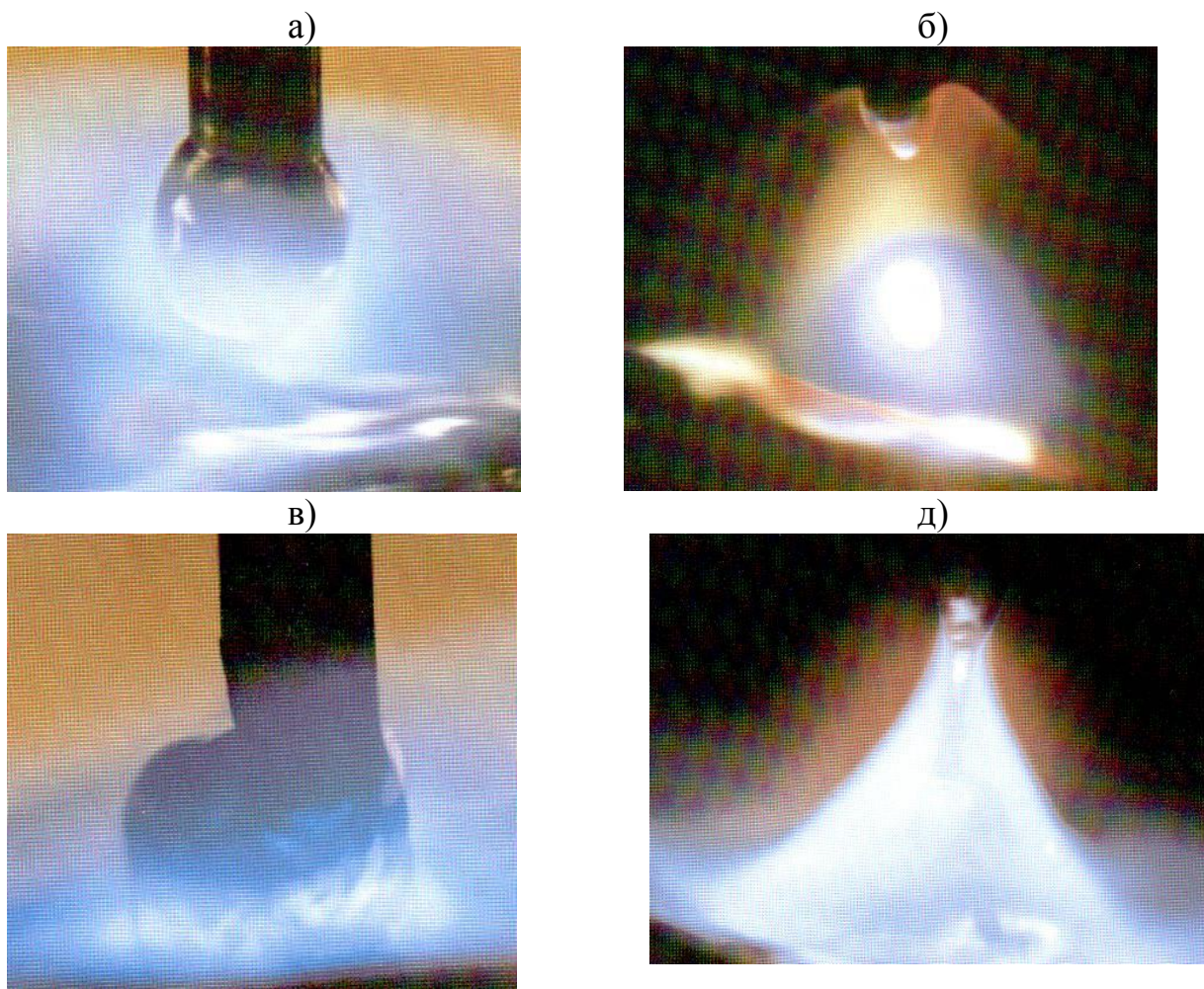


Рисунок 2.3 – Сварочная дуга при различных типах переноса металла:

а) сварка с использованием короткой дуги; б) сварка с использованием импульсной дуги; в) сварка с крупнокапельным переносом; г) сварка с использованием длинной дуги

В качестве особенностей импульсной сварки следует выделить следующее:

- рост тока дуги в течение импульса до величины области длинной дуги;
- переход металла в сварочную ванну происходит по одной капле за импульс;
- следование импульсов происходит с заданной частотой (порядка 30...330 Гц), которая зависит от скорости подачи проволоки;
- протекание нижнего тока поддерживает горение дуги, которая горит и производит очистку поверхности свариваемых деталей;
- реакция импульсного тока и напряжения приводит к стабилизации горения сварочной дуги.



Как показывает практика, применение импульсных режимов сварки существенно повышает качество, производительность и улучшает внешний вид соединений [42] (рис. 2.4).

Осциллограммы процесса сварки с применением импульсного управления дугой содержат несколько характерных точек (рис. 2.5):

$t1$  – характеризует окончание паузы, протекание тока дежурной дуги, занятие каплей соосного с электродом положения;

$t2$  – характеризует момент включения тока импульса;

$t3$  – характеризует перенос капли расплавленного металла, этот же момент может быть зафиксирован по наблюдению всплеска на осциллограмме напряжения дуги;

$t4$  – тока импульса перестаёт протекать, завершается расплавление следующей капли, большое давление дуги приводит к отжатию капли, и её переходу на боковую поверхность электрода;

$t5$  – характеризует протекание тока дежурной дуги, при этом и капля занимает соосное с электродом положение [3].

Кинограмма (рис. 2.5) и схематичное представление стадий процесса сварки с использованием импульсного управления дугой подтверждают протекание переноса расплавленного электродного металла в период короткого замыкания без разбрызгивания. Завершение периода короткого замыкания и возбуждение дуги приводит к повышению эффективности нагрева основного металла.

Импульсный характер переноса металла при дуговой сварке позволяет получить следующие положительные эффекты:

- уменьшение зоны термического влияния;
- значительное сокращение разбрызгивания электродного металла;
- уменьшение количества дефектов типа подрезов, непроваров, несплавлений, пор;

- значительное повышение стабильности качества выполняемых швов, получение гарантированного проплавления и обратного валика необходимых размеров.

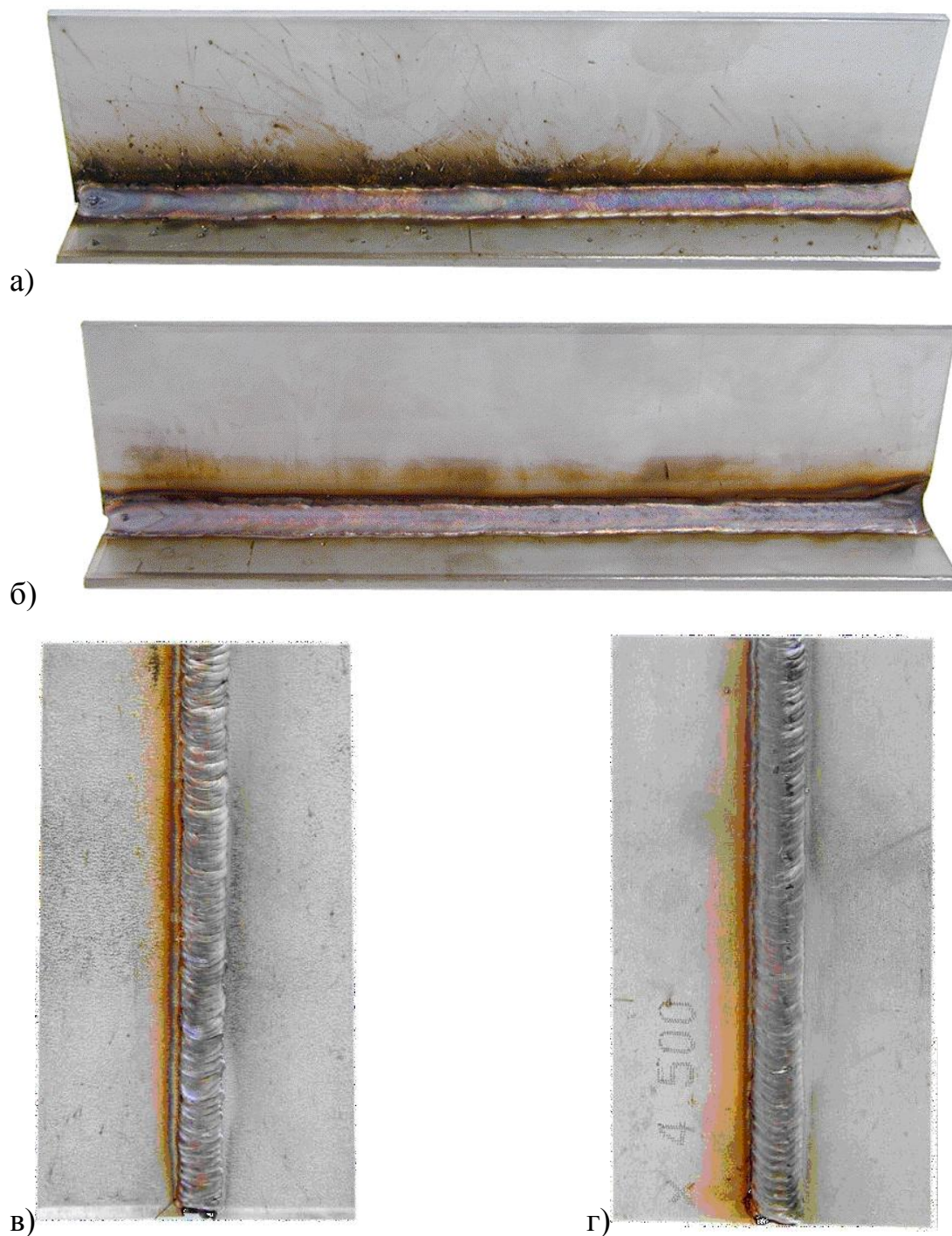


Рисунок 2.4 – Внешний вид швов, сваренных проволокой  $\varnothing 1$  мм классической MIG сваркой (а, в) и импульсной дугой (б, г): а) тавровое соединение, толщина 4 мм, скорость сварки 0,3 м/мин; б) то же, скорость сварки 60 м/мин; в), г) вертикальный шов, V-разделка, толщина 10 мм

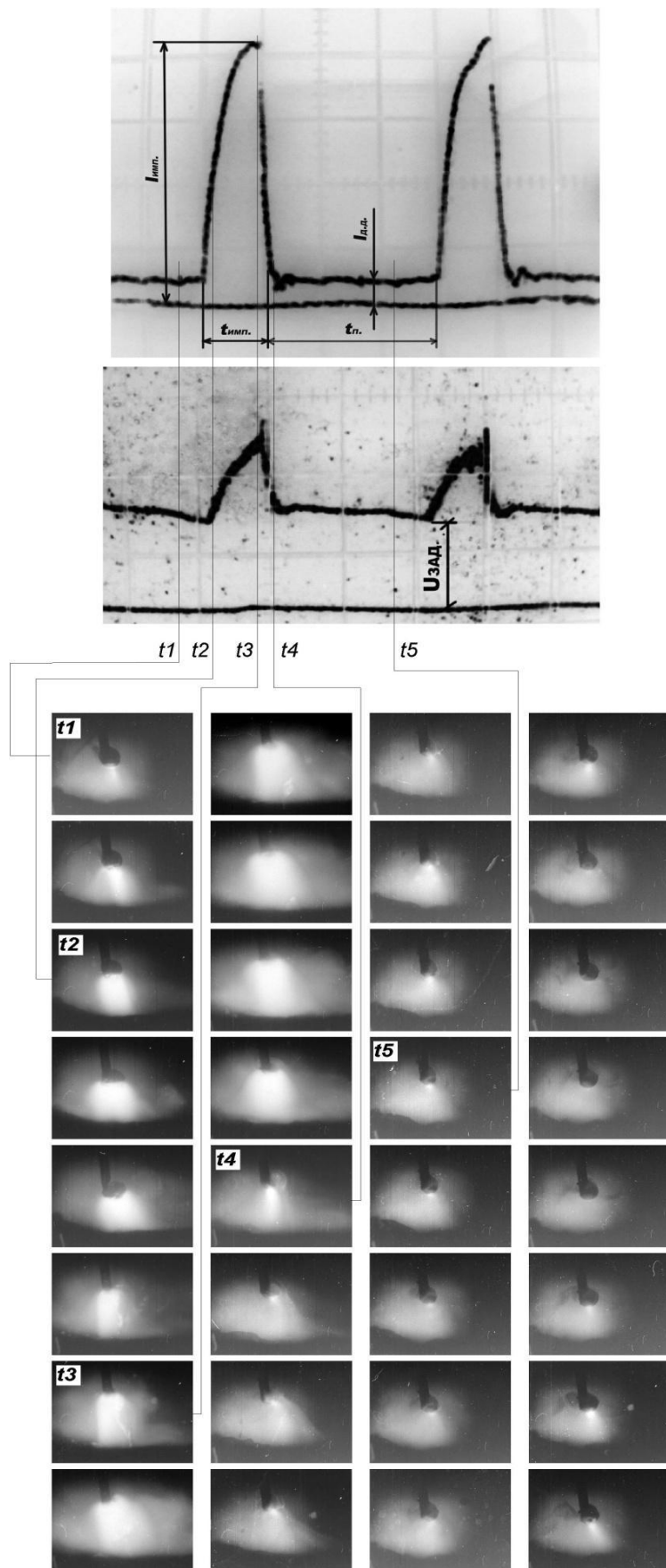


Рисунок 2.5 – Совмещённые осциллограммы сварки и кинокадры процесса при сварке с использованием импульсной дуги [3]

## 2.2 Отечественные разработки в области импульсного управления сварочной дугой

С сожалением следует отметить, что отечественные сварочные школы утратили свои лидирующие позиции в вопросах разработки высокотехнологичных процессов сварки, способных конкурировать с иностранными аналогами. Отечественные потребители применяют при проведении сварочных операций технику и технологии западного производства. Следует отметить, что эти самые западные технологии практически всегда основываются на наработках российских учёных 70...80 годов прошлого столетия. Эти наработки не получили своевременной реализации в промышленности по причине недостаточной аппаратной реализации. Отечественное оборудование полностью или частично состоит из компонентов западных фирм: источников питания, сварочных головок, систем управления. Именно поэтому разработка новых образцов отечественного сварочного оборудования для строительства магистральных трубопроводов не только приведёт к повышению производительности и качества сварки, но и восстановит престиж российской сварочной науки [46].

Одним из самых эффективных способов уменьшения разбрызгивания является нестационарное энергетическое воздействие на каплю электродного металла и сварочную ванну [47]. Систематическими исследованиями и разработкой методов управления каплепереносом в СССР начали заниматься в конце 60-х – начале 70-х годов прошлого века. Однако отсутствие на тот момент быстродействующих источников сварочного тока, последующая политико-экономическая перестройка общества не позволили завершить начатые работы, поэтому полуавтоматы с цифровым управлением и быстродействующими инверторными источниками сварочного тока начали применять только в последнее десятилетие. Подобное оборудование не требует применения специальной техники сварки при смене пространственного положения, изменении вылета электрода и других

условий сварки, что позволяет сварщику сосредоточиться исключительно на ведении горелки вдоль шва. Однако из-за данных проблем в настоящее время на отечественном рынке представлено в основном импортное цифровое оборудование для механизированной сварки. К изготовлению оборудования с цифровым управлением ряд отечественных предприятий только приступил [46].

Следует отметить, что в настоящее время создан необходимый технологический задел в виде исследования особенностей перехода капли электродного металла в ванну при сварке в различных пространственных положениях [16, 17], что позволяет разработать не только технологии сварки, устойчивые к возмущениям внешней среды, но и необходимое оборудование с использованием последних достижений в области системотехники и новых возможностей современной элементной базы.

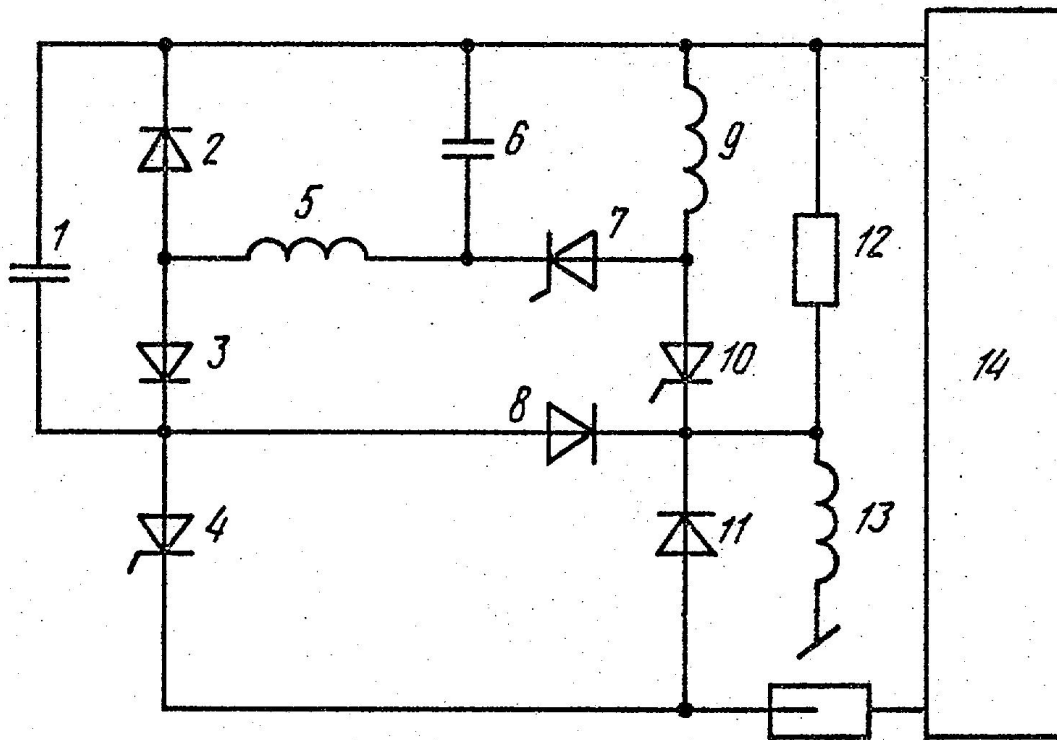
#### Устройство для сварки [43]

Предлагаемое устройство для сварки модулированным током (рис. 2.6) включает в себя следующие элементы: фильтрующий конденсатор 1; зарядный полупроводник 2; разрядный полупроводник 3; зарядный тиристор 4; зарядный дроссель 5; коммутирующий конденсатор 6; вспомогательный тиристор 7; вспомогательный полупроводник 8; коммутирующий дроссель 9; силовой тиристор 10; перезарядный полупроводник 11; резистор 12; сварочный дроссель 13; источник постоянного тока 14.

К плюсовому выводу источника постоянного тока 14 присоединяют цепь, состоящую из следующих элементов: обкладки фильтрующего конденсатора 1, коммутирующего дросселя 9 и силового тиристора 10 (включение которых произведено последовательно и с шунтированием через резистор 12), дросселя 13 и полупроводника 11, которые все включены в сварочную цепь. При этом параллельно коммутирующему дросселю 9 производят включение последовательно соединенных вспомогательного

тиристора 7 и коммутирующего конденсатора 6, соединенного параллельно с цепью (зарядный дроссель 5 и полупроводник 2) и последовательно с тем же зарядным дросселем 5, полупроводником 3 и зарядным тиристором 4, а также полупроводника 8, анод которого подключен к катоду полупроводника 3, другой обкладке фильтрующего конденсатора 1 и аноду зарядного тиристора 4, а катод - к катоду силового тиристора 10.

В режиме холостого хода происходит подготовка схемы к отключению тока нагрузки. Для этого коммутирующий конденсатор 6 за несколько циклов заряжается до необходимого напряжения. При включении зарядного тиристора 4 происходит заряд коммутирующего конденсатора 6 по цепи, представленной: плюсом источника 14 питания - коммутирующим конденсатором 6 - зарядным дросселем 5 - полупроводником 3 — зарядным тиристором 4 - минусом источника 14 питания. При включении вспомогательного тиристора 7 происходит разряд коммутирующего конденсатора 6 на коммутирующий дроссель 9. При переходе тока через ноль вспомогательный тиристор 7 закрывается, при этом коммутирующий конденсатор 6 заряжен с полярностью, обратной до момента включения вспомогательного тиристора 7, т.е. на нижней обкладке у него положительный потенциал. После разряда коммутирующего конденсатора 6 на коммутирующий дроссель 9 начинается его перезаряд по цепи, представленной: коммутирующим конденсатором 6 - зарядным дросселем 5 - полупроводником 2 - коммутирующим конденсатором 6. И по цепи, представленной: плюсом источника 14 питания - коммутирующим конденсатором 6 - зарядным дросселем 5 - полупроводником 3 - зарядным тиристором 4 - минусом источника 14. Регулирование момента включения зарядного тиристора 4, позволяет производить автоматическое регулирование поступления энергии от источника питания и поддерживать напряжение на коммутирующем конденсаторе 6, которое необходимо для отключения тока в процессе возбуждения дуги. В режиме горения дуги автоматически перестаёт подаваться сигнал на включение зарядного тиристора 4.



- 1 - источник постоянного тока; 2 - зарядный диод; 3 - разрядный диод;  
 4 - зарядный тиристор; 5 - зарядный дроссель; 6 - коммутирующий конденсатор; 7 - вспомогательный тиристор; 8 - вспомогательный диод;  
 9 - коммутирующий дроссель; 10 - силовой тиристор;  
 11 - перезарядный диод; 12 - резистор; 13 - сварочный дроссель;  
 14 - фильтрующий конденсатор

Рисунок 2.6 – Установка для сварки [43]

В качестве **недостатка** устройства следует отметить непрерывность процесса перезаряда коммутирующего конденсатора, который протекает через цепь, состоящую из вспомогательного тиристора и коммутирующего дросселя. За этим процессом следует заряд коммутирующего конденсатора через дуговой промежуток, который не может быть управляем (не изменяется ток заряда).

## Устройство для сварки [44]

Устройство для сварки модулированным током состоит из источника постоянного тока 1, фильтрующего конденсатора 2, блокирующего полупроводника 3, силового тиристора 4, сглаживающего дросселя 5, коммутирующего контура (включает в себя коммутирующий конденсатор 6, вспомогательный тиристор 7, коммутирующий дроссель 8), цепь заряда (включает в себя блокирующий полупроводник 9 и зарядный дроссель 10).

При включении источника 1 питания, начинается зарядка фильтрующего конденсатора 2, током по «цепи блокирующий полупроводник 3 - сглаживающий дроссель 5», конденсатор 2 заряжается до напряжения источника 1 питания. Одновременно происходит зарядка и коммутирующего конденсатора 6 током по цепи «блокирующий полупроводник 9 – зарядный дроссель 10».

Начало циклов коммутация в коммутирующем контуре (включение вспомогательного тиристора 7) приводит к раскачке напряжения на коммутирующем конденсаторе 6 до значения, которое определяется добротностью коммутирующего контура.

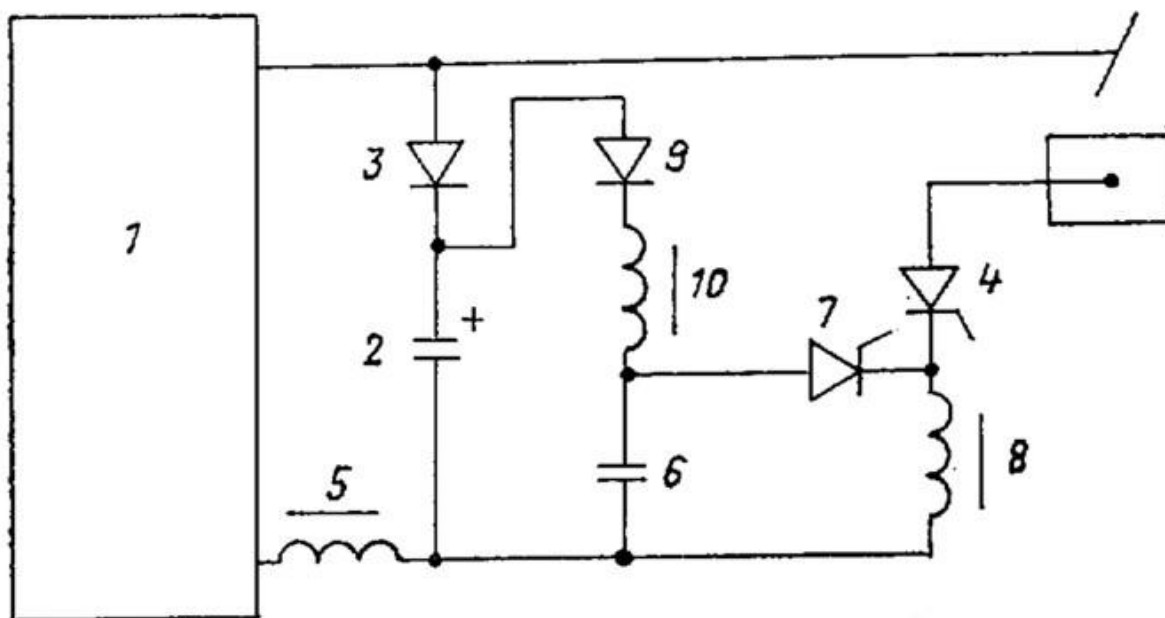
При включении силового тиристора 4 сварочный ток начинает протекать по цепи, которая состоит из: положительного полюса источника 1 питания, сварочной дуги, силового тиристора 4, коммутирующего дросселя 8, сглаживающего дросселя 5, отрицательного полюса источника 1 питания.

При включении вспомогательного тиристора 7 происходит выключение силового тиристора 4, и сварочного тока, через силовой тиристор 4 по цепи, которая состоит из: плюсового полюса коммутирующего конденсатора 6, вспомогательного тиристора 7, силового тиристора 4, сварочной дуги, блокирующего полупроводника 3, фильтрующего конденсатора 2, минусового полюса коммутирующего конденсатора 6.

Включение вспомогательного тиристора 7 происходит в момент приложения к нему обратной полуволны напряжения в коммутирующем контуре.



**Недостатком** устройства является влияние зарядного контура на устойчивость горения дуги, т.к. зарядный контур подключен параллельно источнику питания и дуге. Кроме того, подключение зарядного контура параллельно дуге не позволяет использовать токи зарядного контура для управления процессом сварки.



- 1 - источник постоянного тока; 2 - фильтрующий конденсатор;  
 3 - блокирующий диод; 4 - силовой тиристор; 5 - сглаживающий дроссель;  
 6 - коммутирующий конденсатор; 7 - вспомогательный тиристор;  
 8 - коммутирующий дроссель; 9 - блокирующий диод; 10 - зарядный дроссель

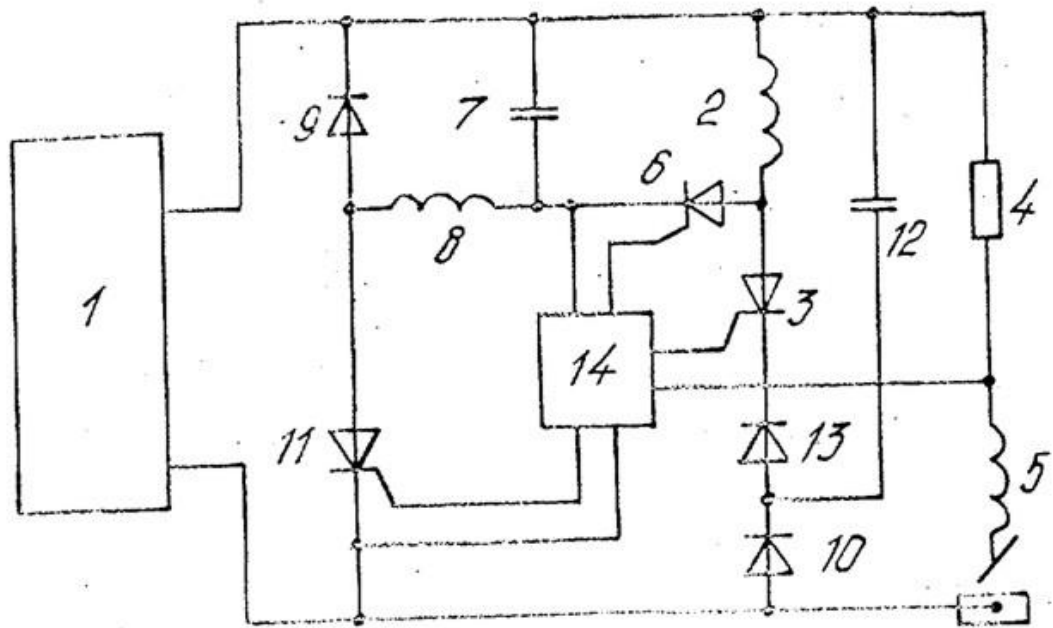
Рисунок 2.7 – Устройство для сварки [44]

#### Устройство для сварки [45]

Устройство для сварки (рис. 2.8) состоит из источника 1 постоянного тока; коммутирующего дросселя 2; силового тиристора 3; резистора 4; сварочного дросселя 5; вспомогательного тиристора 6; коммутирующего конденсатора 7; зарядного дросселя 8; первого полупроводника 9; второго полупроводника 10; зарядного тиристора 11; фильтрующего конденсатора 12; третьего полупроводника 13.

К положительному выводу источника питания 1 производят подключение последовательно: коммутирующего дросселя 2, силового тиристора 3 (зашунтированы через резистор 4), и сварочного дросселя 5. При этом параллельно коммутирующему дросселю 2 производят подключение последовательно соединенных вспомогательного тиристора 6 и коммутирующего конденсатора 7. Конденсатор 7 соединён параллельно с цепью, включающей зарядный дроссель 8 и первый полупроводник 9. Анод первого полупроводника 9 через зарядный тиристор 11 присоединяют к аноду второго полупроводника 10. Катод второго полупроводника 10 присоединяют к аноду третьего полупроводника 13, катод которого имеет соединение с катодом силового тиристора 3. Первую обкладку фильтрующего конденсатора 12 подключают к положительному выводу источника 1; вторую обкладку фильтрующего конденсатора 12 подключают к точке, в которой соединены катод второго полупроводника 10 и анод третьего полупроводника 13. Точка соединения анода второго полупроводника 10 и катода зарядного тиристора 11 имеет подключение к отрицательному выводу источника 1. Управление устройством производится с использованием схемы 14 управления.

В исходном положении тиристоры 3, 6 и 11 закрыты, конденсатор 7 предварительно заряжен - верхней его обкладке положительная полярность. Ток паузы протекает по цепи, состоящей из резистора 4, сварочного дросселя 5 и сварочной дуги. Фильтрующий конденсатор 12 включен параллельно резистору 4 и через полупроводник 13 заряжается до напряжения, соответствующего падению напряжения на резисторе 4.



1 - источник постоянного тока; 2 - коммутирующий дроссель; 3 - силовой тиристор; 4 - резистор; 5 - сварочный дроссель; 6 - вспомогательный тиристор; 7 - коммутирующий конденсатор; 8 - зарядный дроссель; 9 - первый диод; 10 - второй диод; 11 - зарядный тиристор; 12 - фильтрующий конденсатор; 13 - третий диод

Рисунок 2.8 – Устройство для сварки [45]

Включение силового тиристора 3 заставляет ток импульса протекать по цепи, состоящей из плюса источника 1 постоянного тока, коммутирующего дросселя 2, силового тиристора 3, сварочного дросселя 5, сварочной дуги, минуса источника 1. При открытии силового тиристора 3 происходит разрядка предварительно заряженного фильтрующего конденсатора 12 через цепь, состоящую из дросселя 2, тиристора 3, дросселя 5, сварочной дуги, полупроводника 13. При этом через дугу протекает дополнительный ток, стабилизирующий ее горение.

**Недостатком** устройства является то, что процесс перезаряда коммутирующего конденсатора невозможно использовать для управления процессом сварки, так как процесс перезаряда начинается практически сразу же после выключения силового тиристора.

### 2.3 Исследование особенностей перехода капли электродного металла в ванну при орбитальной сварке

Известно [40, 48], что управление энергетическими характеристиками дуги с целью обеспечения гарантированного переноса капли, наиболее просто реализуется с использованием информации о моменте ее касании поверхности сварочной ванны при сварке с короткими замыканиями. Управляемый каплеперенос для каждой капли электродного металла проходит повторяющимися циклами. Каждый такой цикл перехода капель в сварочную ванну включает в себя следующие микроциклы: касание капель электродного металла поверхности ванны и снижение в этот момент тока; задержка протекания тока на некоторое время при разрыве перемычки; увеличения тока [17].

Эксперимент проводился с использованием системы импульсной стабилизации при сварке в среде углекислого газа в нижнем положении образцов ВСтЗпс толщиной 10 мм проволокой Св-08Г2С диаметром 0,8...1,2 мм при питании дуги от сварочного выпрямителя ВС-300. Для подачи сварочной проволоки использовался автомат с независимой подачей проволоки марки ГСП-2.

Регистрацию сварочного тока и напряжения по дуге осуществляли шлейфовым осциллографом Н-117, а также приборами магнитно-электрической системы. Перенос электродного металла изучали с помощью скоростной камеры СКС-1М.

На рис. 2.9 представлены осциллограммы и кинограммы процесса сварки при работе от системы импульсной стабилизации. Выключение тока перед коротким замыканием значительно снижает силы, препятствующие переносу электродного металла (рис.1 кадр 1). Капля электродного металла стремится занять соосное расположение с электродом. В результате встречного движения электрода с каплей на торце и металла сварочной ванны происходит короткое замыкание (кадр 2), а затем полное слияние

капли и ванны (кадр 3). Под действием силы поверхностного натяжения и электродинамической силы происходит образование жидкой перемычки между электродом и сварочной ванной (кадр 4). К моменту разрыва перемычки кратковременно снижают ток, в результате разрушения ее происходит при минимально токе (кадр 5), что значительно снижает разбрызгивание металла в момент возбуждения дуги (кадр 6). Поддержание постоянной длительности горения дуги для каждого конкретного режима сварки обеспечило высокую стабильность процесса сварки.

Для оценки участия ванны и капли в образовании короткого замыкания, были проведены многократные измерения изменения длины дуги по кадрам скоростной киносъемки за цикл каплеобразования. Схема по которой производилось измерение представлено на рис. 2.10. Результаты представлены на рис. 2.11.

Измерения производились следующим образом. Отснятая кинограмма просматривалась и отбирались сварочные циклы не содержащие сбоев и близкие по количеству кадров. Причем отбор производился начиная с конца пленки так как первые три четверти длины пленки кинокамера набирает скорость вращения. В зависимости от количества кадров в цикле производили измерения через три или пять кадров. По результатам измерений построены графики.

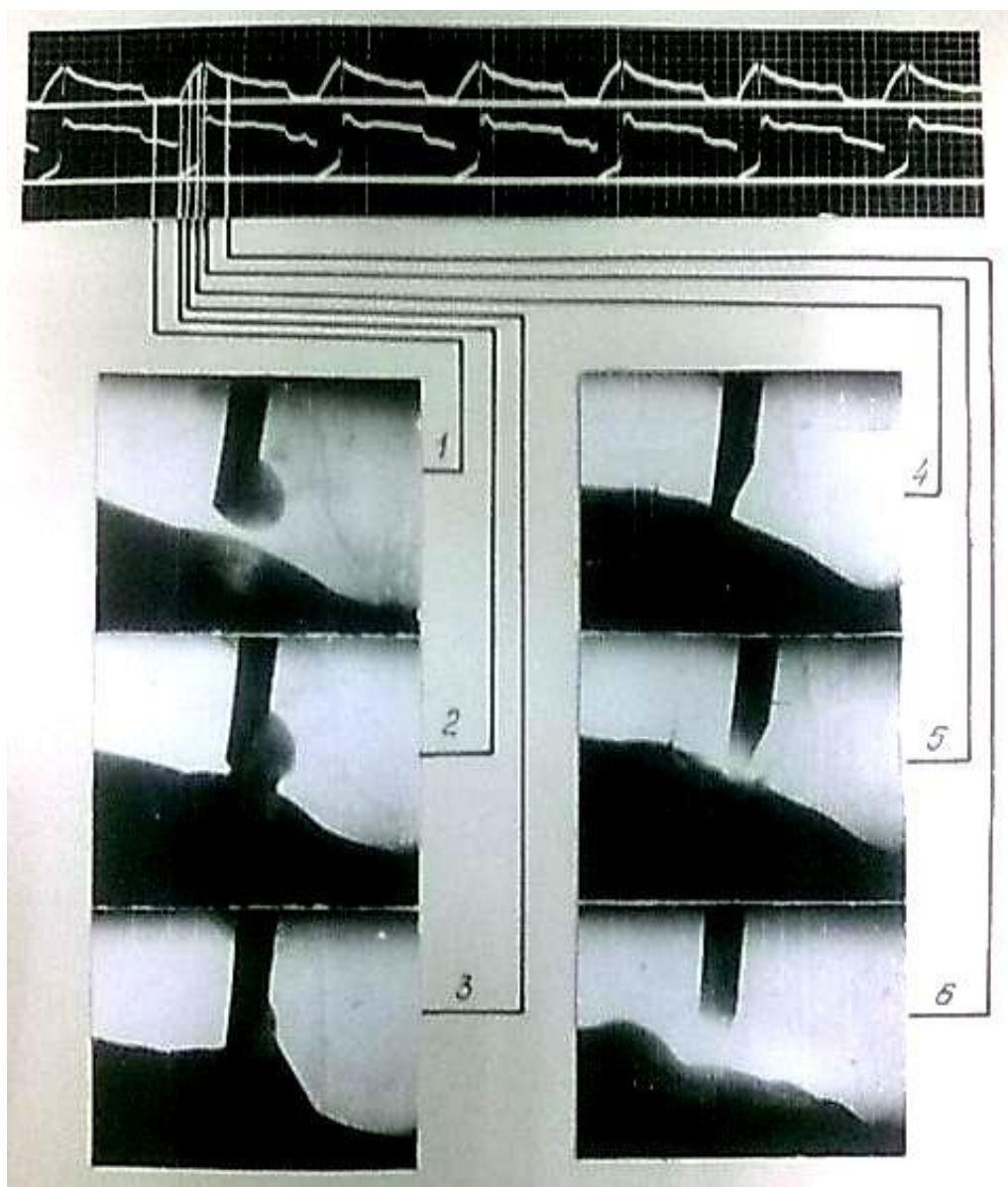


Рисунок 2.9 - Осциллограмма и кинограммы процесса сварки при питании сварочной дуги от системы импульсной стабилизации

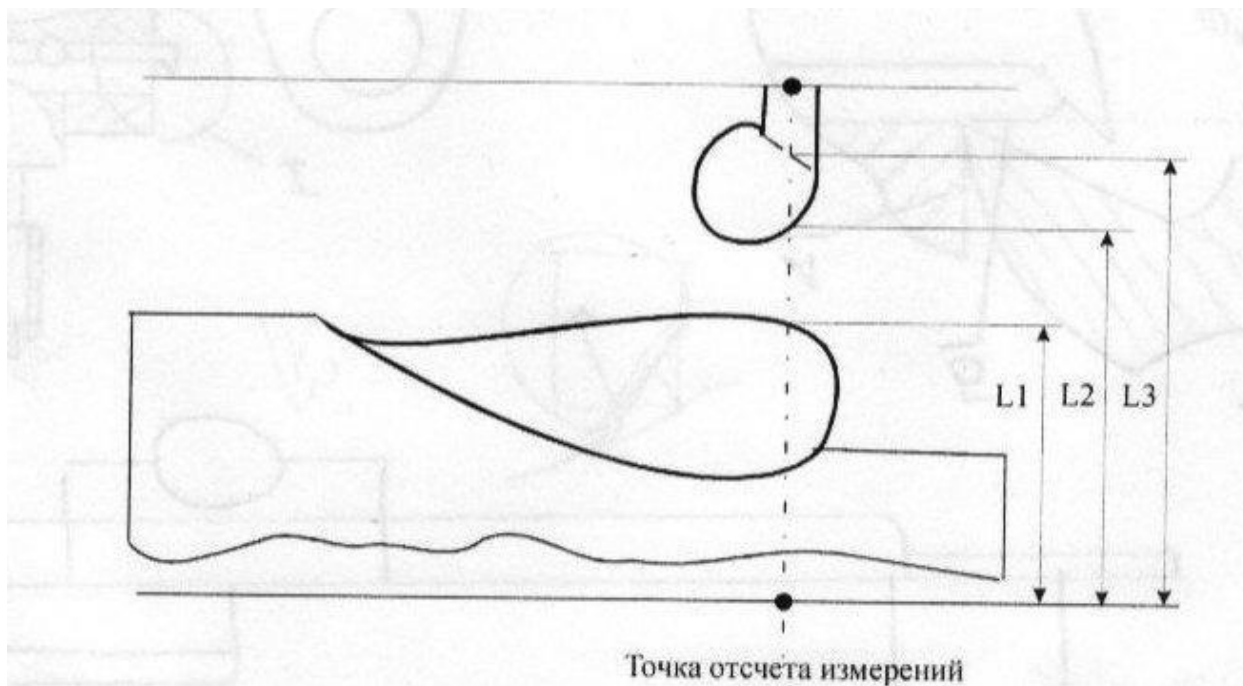


Рисунок 2.10 – Схема измерений: L1 - расстояние от базы до пересечения поверхности сварочной ванны с осью электрода; L2 - расстояние от базы до пересечения нижней поверхности капли электродного металла с осью электрода; L3 – расстояние от базы до пересечения фронта плавления с осью электрода

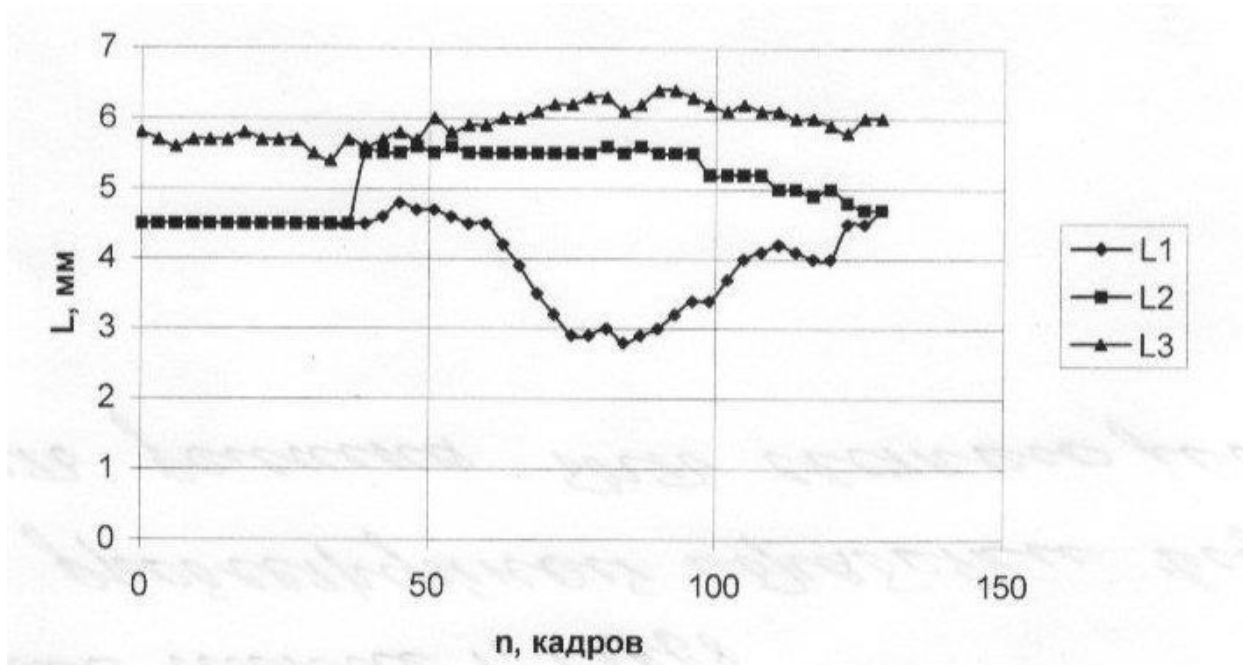


Рисунок 2.11 – Экспериментальные графики движения фронта плавления капли (1), электрода (1) и сварочной ванны (2)

Измерения производились с момента короткого замыкания и до момента короткого замыкания. На рис. 2.11 четко виден момент разрыва перемычки когда взрывообразно зажигается сварочная дуга, мгновенно возрастает давление сварочной дуги (газодинамический удар) сварочная ванна отбрасывается от электрода на максимальное расстояние, максимальная длина дуги. Сварочная ванна в силу своей инертности с небольшим запозданием начинает влиять на увеличение длины дуги. К тому же на графиках отмечается влияние волны расплавленного металла, поднимающейся на боковой поверхности сварочной ванны в начальной стадии горения дуги.

В процессе горения дуги давление дуги снижается, растет капля электродного металла, сварочная ванна подтекает под дугу, стекая по поверхности кристаллизации под действием гидростатического давления, все это несколько уменьшает длину дуги.

После резкого снижения сварочного тока до дежурного капля электродного металла стремится занять соосное с электродом положение, стремясь навстречу сварочной ванне, которая в свою очередь начинает подниматься к электроду. Это движение происходит несколько медленнее из-за того, что сварочная ванна обладает большим весом по сравнению с каплей металла и ванне необходимо некоторое время чтобы стечь с поверхности кристаллизации в кратер и заполнить его, а затем по переднему фронту за счет набранной потенциальной энергии она начинает подниматься к электроду и происходит короткое замыкание.

Согласно полученным данным при управлении процессом сварки в среде углекислого газа путем изменения энергетических параметров дуги сварочная ванна принимает непосредственное участие в образовании короткого замыкания наравне с каплей электродного металла.



## 2.4 Предлагаемый способ импульсной сварки

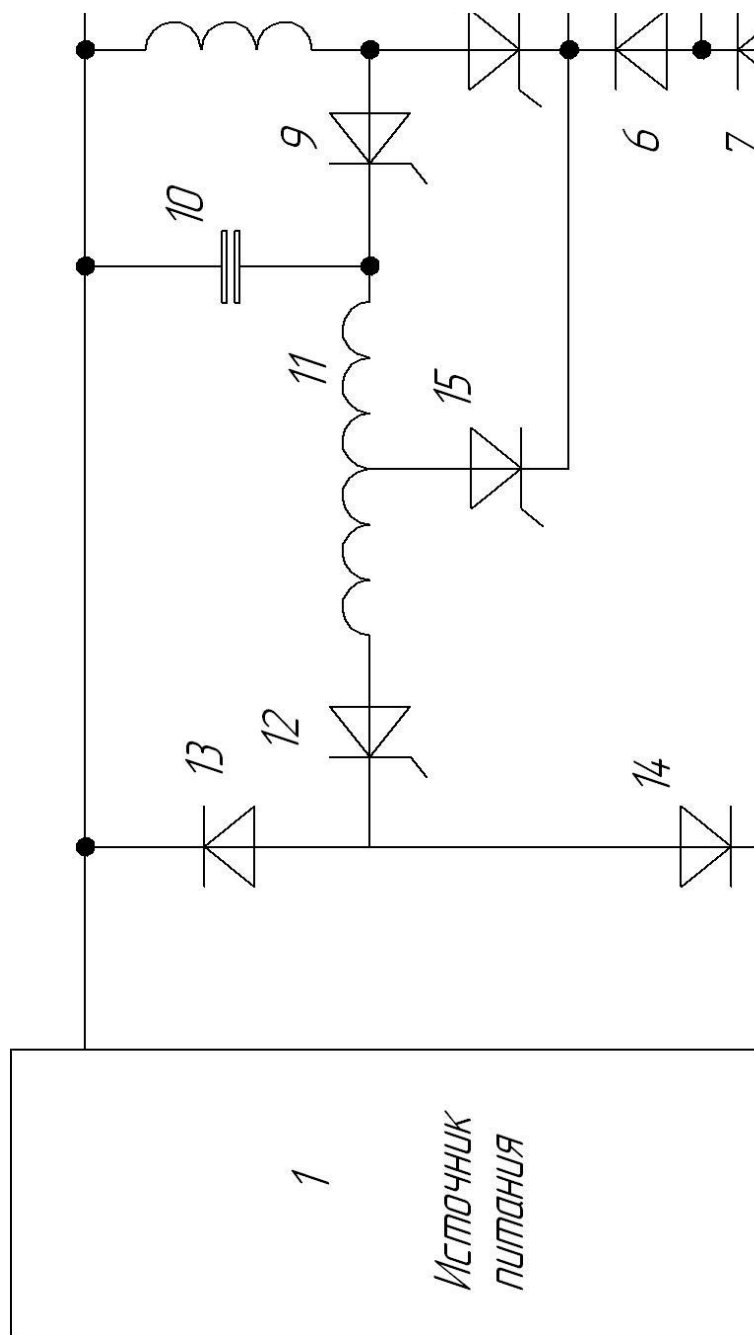
Устройство (рис. 2.12) состоит из источника постоянного тока 1, дросселя 2, силового тиристора 3, шунтирующего резистора 4, и сварочного дросселя 5. Последовательно к положительному выводу источника 1 производят подключение коммутирующего дросселя 2 и силового тиристора 3 через шунтирующий резистор 4. К отрицательному выводу источника 1 через общую точку соединения, через цепочку диодов 6 и 7 подключают силовой тиристор 3 и сварочный дроссель 5. К общей точке соединения диодов 6 и 7 производят подключение обкладки фильтрующего конденсатора 8, подключение другой обкладки конденсатора производят к положительному выводу источника 1. Подключение вспомогательного тиристора 9 и коммутирующего конденсатора 10 производят параллельно коммутирующему дросселю 2, который, в свою очередь подключают параллельно с цепью (включает в себя секционированный зарядный дроссель 11, зарядный тиристор 12 и перезарядный полупроводник 13), и последовательно с цепью (зарядный дроссель 11, первый зарядный тиристор 12 и блокирующий полупроводник 14, катод которого подключен к отрицательному выводу источника 1). К одному из выводов секционированного зарядного дросселя 11 производят подключение анода дополнительного зарядного тиристора 15, а катод его соединяют с катодом силового тиристора 3.

Работа устройства в режиме **«холостого хода»** происходит следующим образом. Коммутирующий конденсатор 10 предварительно заряжается до напряжения, которое обеспечивает отключение силового тиристора 3 при достижении максимального тока дугового промежутка. Началом зарядки коммутирующего конденсатора 10 управляет зарядный тиристор 12 открытие которого пропускает ток по зарядной цепи. Зарядная цепь состоит из: «плюс» источника питания 1, коммутирующего конденсатора 10, зарядного дросселя 11, зарядного тиристора 12, полупроводника 14 –« минус» источник

питания 1. По окончании заряда на верхней обкладке конденсатора 10 напряжение имеет положительный потенциал.

Работа устройства в режиме **горения дежурной дуги** осуществляется следующим образом. Происходит протекание тока паузы через резистор 4, сварочный дроссель 5 и дуговой промежуток. Тиристоры 3, 9 и 12 закрыты, конденсатор 10 имеет предварительный заряд с положительной полярностью на верхней обкладке. Конденсатор фильтра 8 включен через полупроводник 6 параллельно резистору 4 и заряжен до напряжения, равного падению напряжения на резисторе 4. После включения силового тиристора 3 начинается протекание ток импульса по цепи, которая состоит из: «минус» источник питания 1, дугового промежутка, сварочного дросселя 5, силового тиристора 3, коммутирующего дросселя 2, «плюс» источник питания 1. При открытии силового тиристора 3 происходит разрядка предварительно заряженного конденсатора фильтра 8 по цепи, которая состоит из коммутирующего дросселя 2, силового тиристора 3, сварочного дросселя 5, дугового промежутка, полупроводника 7. При этом через дуговой промежуток протекает кратковременный импульс тока, который стабилизирует горение дуги.

Работа устройства в режиме **горения дуги** осуществляется следующим образом. Начало зарядки источником питания 1 коммутирующего конденсатора 10 совпадает по времени с импульсом тока через дуговой промежуток. Дополнительный зарядный тиристор 15 отвечает за протекание тока перезаряда. Перезаряд происходит по цепи, которая состоит из: «плюс» источника питания 1, коммутирующего конденсатора 10, секции зарядного дросселя 11, дополнительного зарядного тиристора 15, сварочного дросселя 5, дугового промежутка, «минус» источника питания 1. Момент включения тиристора 15 определяется схемой управления из технологических условий.



- 1 - источник постоянного тока; 2 - коммутирующий дроссель; 3 - силовой тиристор; 4 - шунтирующий резистор; 5 - сварочный дроссель; 6,7 - цепочка диодов; 8 - фильтрующий конденсатор; 9 - вспомогательный тиристор; 10 - коммутирующий конденсатор; 11 - зарядный дроссель; 12 - зарядный тиристор; 13 - перезарядный диод; 14 - блокирующий диод; 15 - параллельный зарядный тиристор

На рис. 2.13 изображены осциллограммы тока и напряжения дуги, горячей с использованием предлагаемого устройства, при сварке в среде  $\text{CO}_2$  плавящимся электродом и осуществлением технологии управления механизмом коротких замыканий.

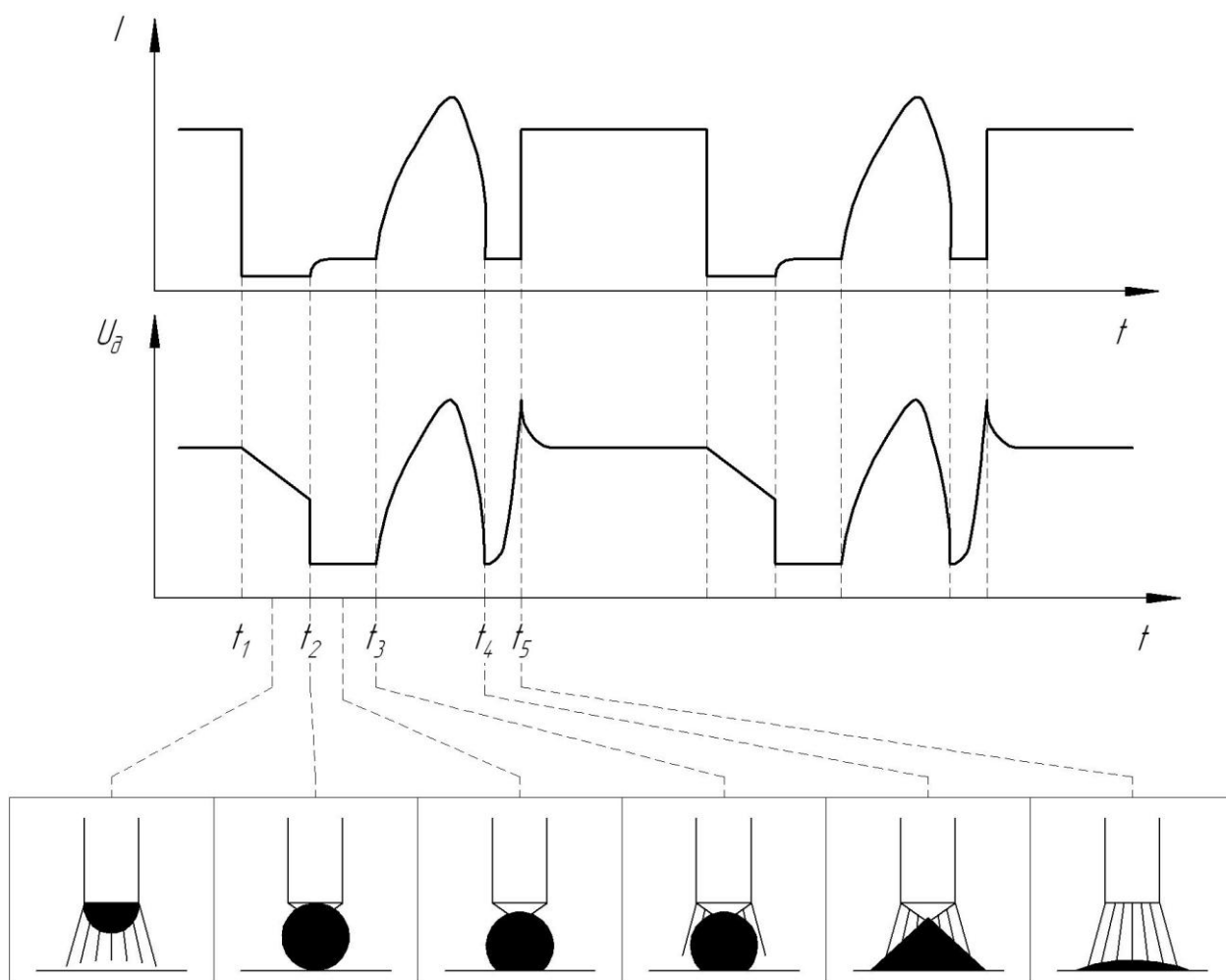
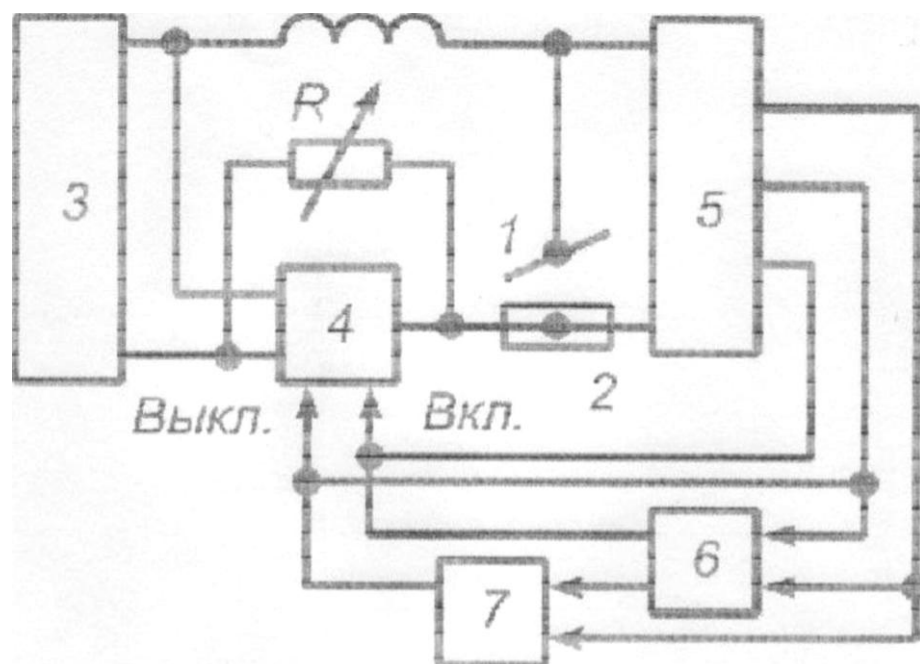


Рисунок 2.13 – Диаграммы тока и напряжения при сварке

В момент времени  $t_1$  резко уменьшают сварочный ток, для чего включают силовой тиристор 3 (осуществляется при помощи включения вспомогательного тиристора 9). На интервале времени  $t_1-t_3$  величину тока, который протекает через дуговой промежуток, задают резистором 4. Из-за снижения тока проходит гарантированное короткое замыкание (в момент времени  $t_2$ ). В течение интервала времени  $t_2-t_3$  начинается необратимый процесс слияния ванны и капли, потом включается дополнительный зарядный тиристор 15. В течение интервала времени  $t_3-t_4$  через дуговой промежуток протекает импульс зарядного тока, который резко ускоряет переход капли в сварочную ванну за счет электродинамических сил. Импульс зарядного тока заканчивается до окончания короткого замыкания, и на интервале времени  $t_4-t_5$  ток дугового промежутка задаётся резистором 4 (разрыв перемычки происходит при небольшом токе паузы). После окончания короткого замыкания (разрыв перемычки) включается силовой тиристор 3 (момент времени  $t_5$ ), начинает протекать сварочный ток, и далее процесс повторяется.

Блок-схема установки (рис. 2.14) включает в себя: 1-сварочная головка; 2 - изделие; 3 - источник питания; 4 - тиристорный ключ с принудительной коммутацией; 5 - датчик начала и конца коротких замыканий; 6-линия задержки, определяющая длительность паузы в протекании сварочного тока после окончания короткого замыкания; 7 - линия задержки, дозирующая энергию, идущую на расплавление электродного металла.

Устройство работает следующим образом. В процессе сварки, в начале короткого замыкания, датчик начала и конца коротких замыканий 5 выдает импульс на включение тиристорного ключа с принудительной коммутацией 4 (фаза а, рис. 2.15 а). При этом в сварочной цепи протекает ток короткого замыкания.



1 – сварочная головка; 2 – изделие; 3 – источник питания; 4 – тиристорный;  
5 – датчик начала и конца коротких замыканий; 6 и 7 – линии задержки

Рисунок 2.14 - Блок схема устройства:

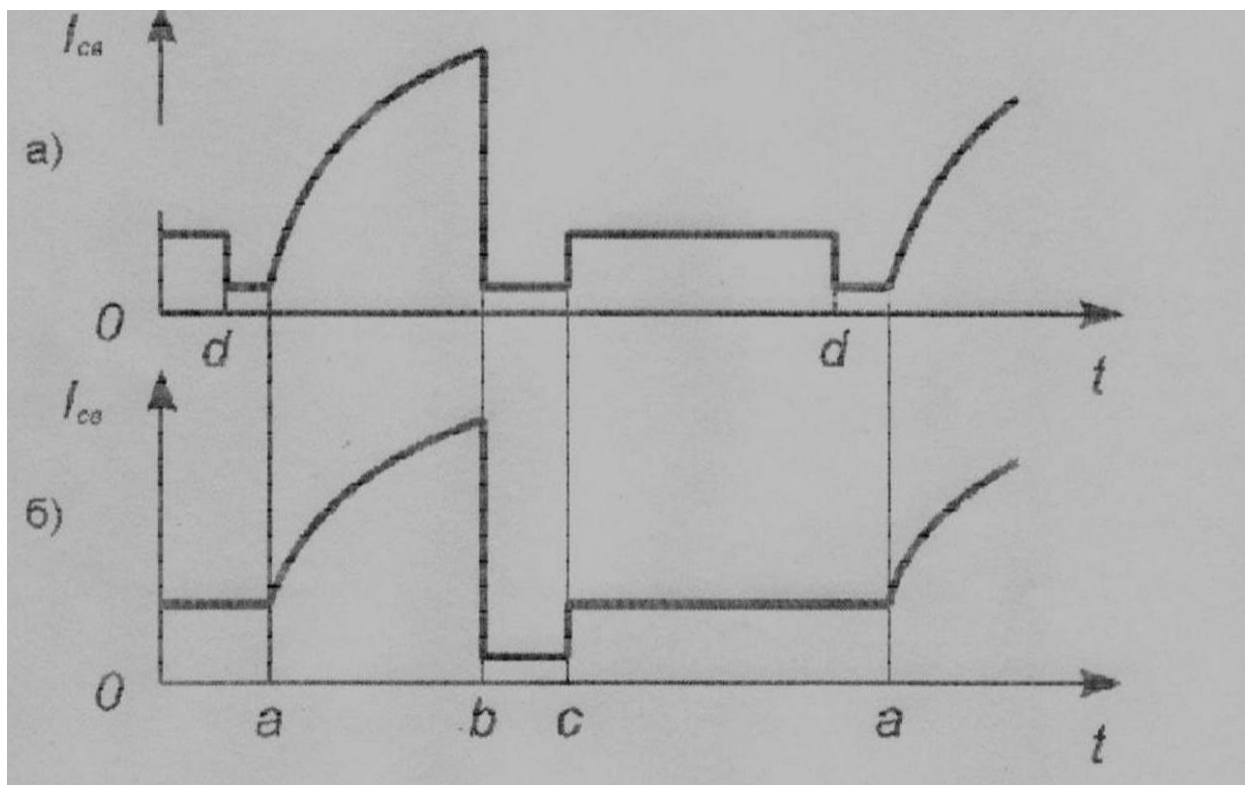


Рисунок 2.15 – Эпюры сварочного тока: а) при сварке с использованием предлагаемого устройства; б) при сварке с использованием устройства только ограничивающего ток при разрыве перемычки

В момент разрыва перемычки между каплей и ванной (фаза b, рис. 2.15 а) датчик 5 выдает импульсы на выключение тиристорного ключа 4 и на запуск линии задержки 6, которая определяет длительность паузы в протекании сварочного тока после окончания короткого замыкания. Скорость спада тока от своего максимального значения до минимального определяется величиной активного сопротивления  $R_i$  выбирается из условия возможности горения дуги в течении паузы. После окончания работы линии задержки 6 с выходных каналов ее снимаются импульсы, поступающие на включение тиристорного ключа 4 и на запуск линии задержки 7 (фаза с, рис. 2.12 а), которая определяет длительность времени, дозирующего энергию, идущую на расплавление электродного металла.

После окончания работы линия задержки 7 с выходного канала ее снимается импульс, поступающий на выключение тиристорного ключа 4 (фаза d, рис. 2.15 а). При этом сварочный ток снижается до минимального и вследствие встречного движения электрода с расплавленной каплей, находящейся на его торце, и ванны, происходит принудительное короткое замыкание. Далее процесс повторяется.

В случае случайного короткого замыкания во время работы линии задержки 6 или 7 по третьему выходному каналу датчика 5 осуществляется возврат линии задержки 6 и 7 в исходное состояние, что значительно повышает устойчивость работы устройств подобного типа.

Поскольку процесс коротких замыканий носит случайный характер (зависит от положения капли на торце электрода к моменту начала короткого замыкания, от объема расплавленного металла и т.д.), то их длительность будет различна, поэтому длина дуги в момент повторного возбуждения дуги будет различной, при этом на торце электрода будет оставаться разное количество расплавленного электродного металла. Следовательно, начальные условия дозирования энергии, идущей на расплавление электродного металла будут также различны, а это приводит к расплавлению разного количества электродного металла, а значит и к неодинаковому расположению капли

расплавленного металла перед коротким замыканием. Все это приводит к повышению неустойчивости процесса и увеличению разбрызгивания из-за случайных коротких замыканий. Может иметь место такой момент, когда короткое замыкание наступит на интервале дозирования. При этом будет иметь место повышенное разбрызгивание электродного металла в первой фазе короткого замыкания. Поэтому при параметрическом дозировании энергии, идущей на расплавление электродного металла, необходимо учитывать состояние дугового промежутка в момент повторного возбуждения дуги и начинать дозирование необходимо при постоянных начальных условиях (например, постоянной длине дуги). При этом условия дозирования энергии на расплавление, будут почти постоянны, а следовательно, отклонение длительностей коротких замыканий от своих средних величин будут минимальные.

Согласно представленного материала наиболее перспективным направлением по снижению разбрызгивания является стабилизация периода каплеобразования с управлением по мгновенным значениям параметров режима.

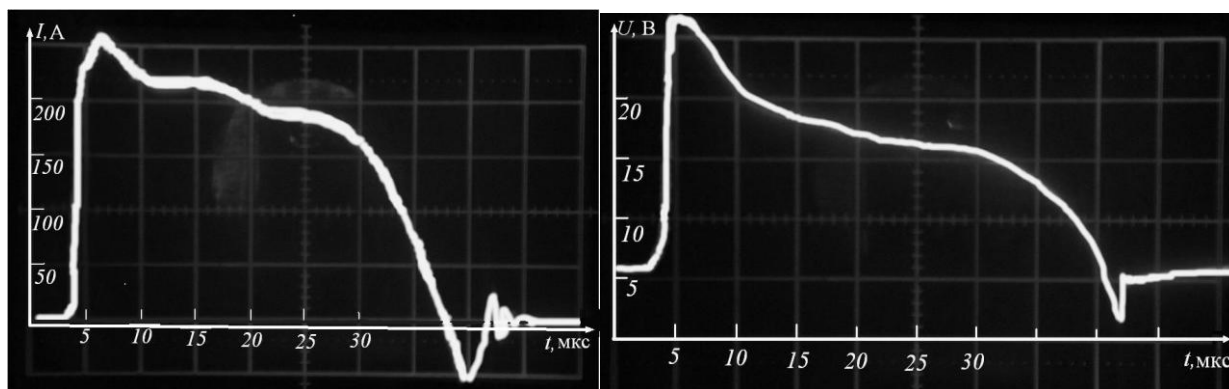


Рисунок 2.16 – Осциллограммы импульсов тока и напряжения

При импульсном питании сварочной дуги с плавящимся электродом в  $\text{CO}_2$  по напряжению дугового промежутка можно получить больше информации, чем по изменению сварочного тока. В частности, четко фиксируется по всплеску напряжения отрыв капли от электрода (см. рис. 2.17, кадр 7), после которого можно дозировать количество энергии на



расплавление последующей капли. На интервале паузы между импульсами сварочного тока можно четко фиксировать моменты, когда снижающееся напряжение дугового промежутка станет равным заданному напряжению (см. рис. 2.17, кадр 1), и в этот момент включать импульс сварочного тока, что обеспечивает постоянство начальных условий при включении каждого импульса сварочного тока и, благодаря этому, постоянство амплитудного значения импульсов сварочного тока .

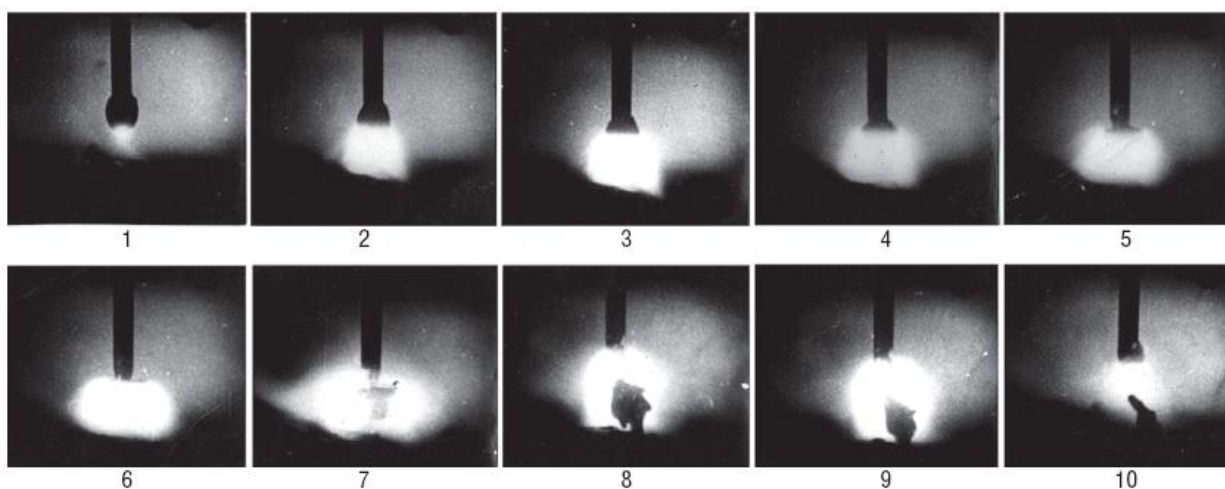
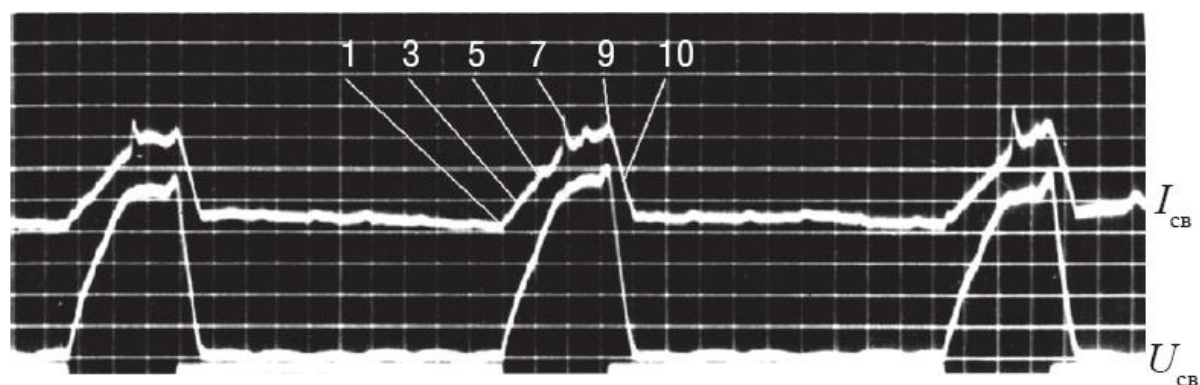


Рисунок 2.17 - Осциллограммы тока  $I_{св}$  и напряжения  $U_{св}$  дугового промежутка при сварке в  $CO_2$  проволокой Св-08Г2С диаметром 1 мм (масштаб по напряжению 7 В/дел., по току 100 А / дел., по времени 2 мс/дел.; кинокадры сняты синхронно с осциллографированием – 3000 кадр./с)

## 2.5 Методика и результаты испытания сварных соединений

Плоские образцы сварного соединения подвергали растяжению до разрушения (рис. 2.18). Одноосное нагружение получило широкое применение при механических испытаниях в процессе изучения прочностных свойств различных элементов конструкций [28]. При этом получают величину растягивающих напряжений, которая в дальнейшем используется при оценке сложного напряженного состояния конструкций, характеризуемого некоторым эквивалентным напряжением. Эквивалентное напряжение – это такое напряжение, которое необходимо создать в растянутом образце, чтобы его состояние стало равноопасно напряженному состоянию конструкции [29].

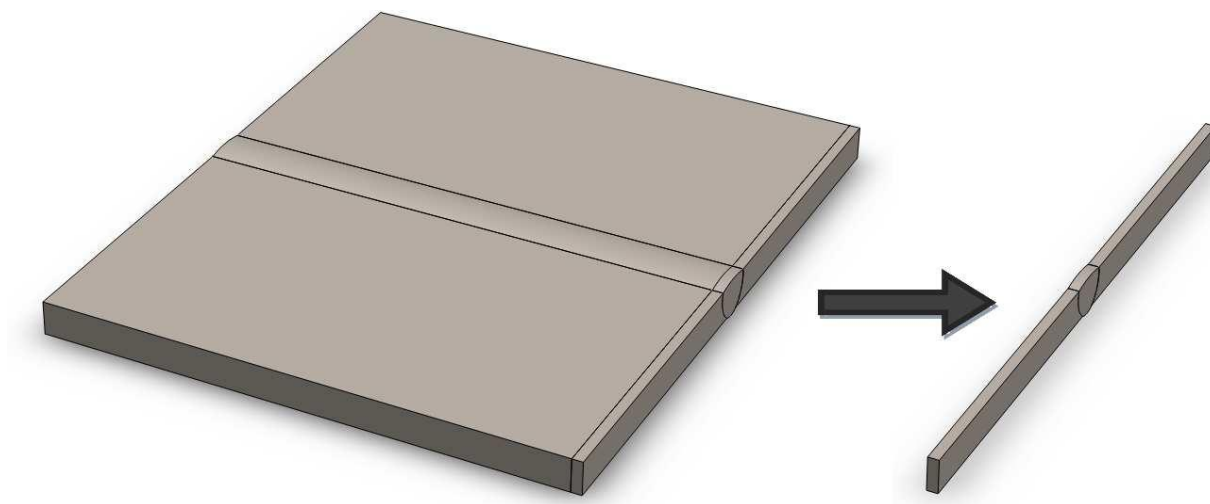


Рисунок 2.18 – Изготовление плоских образцов стыкового соединения

Растяжение до разрушения образцов осуществляли с применением разрывной машины FP-100/1 (максимально возможная прикладываемая нагрузка 10 тонн) (рис. 2.19). В процессе испытания определяли величину предельной нагрузки, выдерживаемой образцом. Также имел значение характер разрушения образца.

Придерживались следующего порядка проведения испытаний для каждого плоского образца:

- 1) устанавливали образец в захваты разрывной машины;

- 2) включали видеокамеры на запись процесса испытания образца;
- 3) запускали разрывную машину (начало растяжения);
- 4) останавливали разрывную машину, когда произошёл разрыв образца на две части;
- 5) останавливали видеозапись;
- 6) возвращали подвижный захват машины в исходное положение.

Растяжение проводили на скорости перемещения подвижного захвата 11 мм/с. Такая величина скорости нагружения позволяет существенно сократить общее время при испытаниях больших партий образцов и сохранить статический характер приложения внешней нагрузки.



Рисунок 2.19 - Разрывная машина FP-100/1

Для изготовления образцов брался прокатный лист из стали 09Г2С-15 размером 8000×2000×16 мм. С использованием гильотинных ножниц вырезались четыре прямоугольные пластины размером 500×150×16 мм. При этом сохраняли одинаковым направление прокатки в полученных пластинах.

Потом каждая пластина подготовилась под сварку приданием длинной кромке требуемой геометрии. Обработка кромок производилась на строгальном станке.

Пластины были сварены между собой попарно с использованием поста для механизированной сварки в среде защитных газов с импульсным управлением тока и напряжения (Lorch S серии) (рис. 2.20).

При подготовке сварочный пост к работе подключали осциллограф в соответствии с предложенной схемой (рис. 2.21).



Рисунок 2.20 – Внешний вид панели управления ИП Lorch S-серии

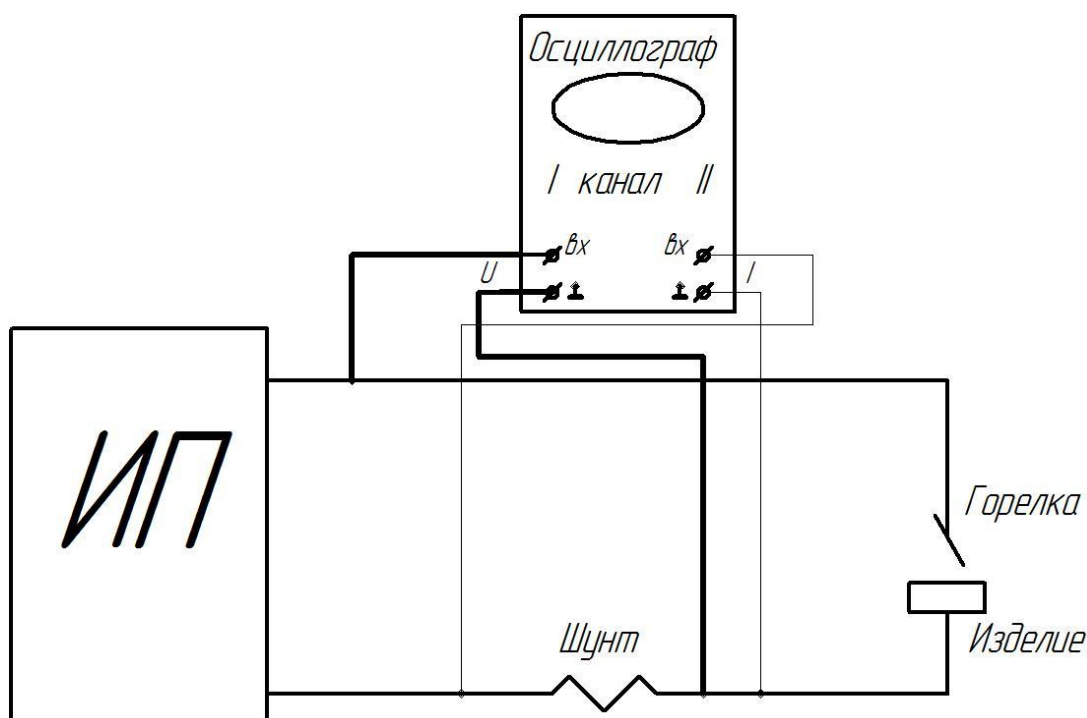


Рисунок 2.21 – Схема подключения осциллографа для снятия силы тока (А) и напряжения (V)

Порядок работы с использованием поста следующий. Настроить источник питания для сварки на обычном режиме (рис. 2.20). Для этого кнопкой 1 выбрать режим 5 под названием “СТАНДАРТ”. Кнопкой 2 задать свариваемый металл на дисплее 6, кнопкой 3 задать толщину сварочной проволоки на дисплее 9, кнопкой 4 задать состав газовой смеси на дисплее 8, кнопкой 12 выбрать настройку, исходя из толщины свариваемого металла (должен загореться индикатор 13), и ручкой 10 задать толщину свариваемого металла на дисплее 11. Средняя сила тока и напряжение отобразятся на дисплеях 15 и 14 соответственно. Произвести сварку стыкового шва. Измерить время сварки. Визуально оценить набрызгивание и формирование шва.

Настроить источник питания на режим SpeedArc (RapidArc), для этого кнопкой 1 выбрать режим SpeedArc на дисплее 5. Задать требуемые параметры в зависимости от свариваемого изделия и применяемых материалов. Произвести сварку стыкового шва. Измерить время сварки.

Снять полученные осциллограммы. Визуально оценить набрызгивание и формирование шва. Сравнить результаты с обычным режимом.

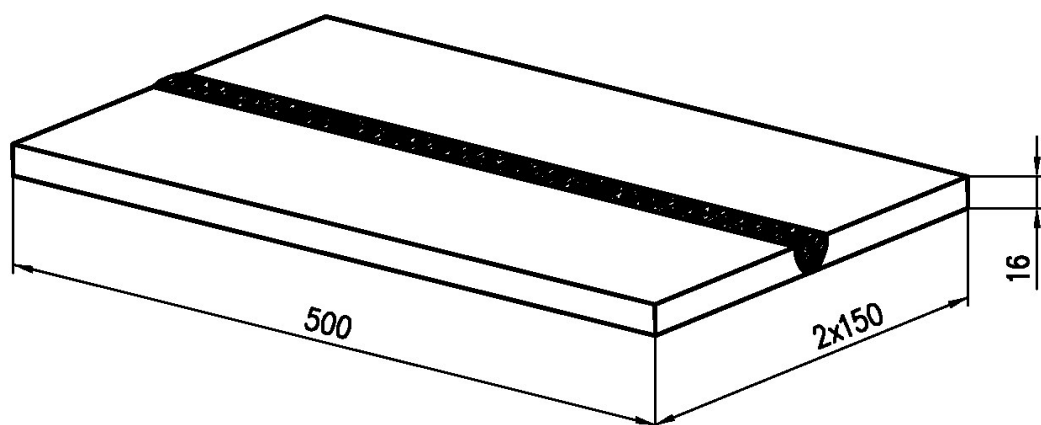


Рисунок 2.22 – Эскиз сваренных деталей

В результате сварки получено два исходных сварных соединения (ИСС), которые различаются способом сварки и качеством сварного шва:

ИСС-1 – сварка пластин осуществлялась без импульсного управления сварочной дугой;

ИСС-2 – сварка пластин осуществлялась с импульсным управлением сварочной дугой.

Для проведения эксперимента на фрезерном станке вырезались образцы, при этом были приняты меры во избежание перегрева и поверхностного упрочнения металла. На рис. 2.23 представлена схема вырезки образцов и соответствующие размеры.

При изготовлении экспериментальных образцов учитывались требования нормативной документации [50], которые предъявляются к заготовкам, предназначенным для получения образцов для проведения механических испытаний сварного соединения.

Толщина вырезаемых сварных образцов принята, чтобы обеспечивалось выполнение условия по соотношению между толщиной и шириной не менее  $1/5$ . Это позволяет устранить стесненность деформаций при осуществлении статического растяжения и получить одноосное напряженное состояние [51].

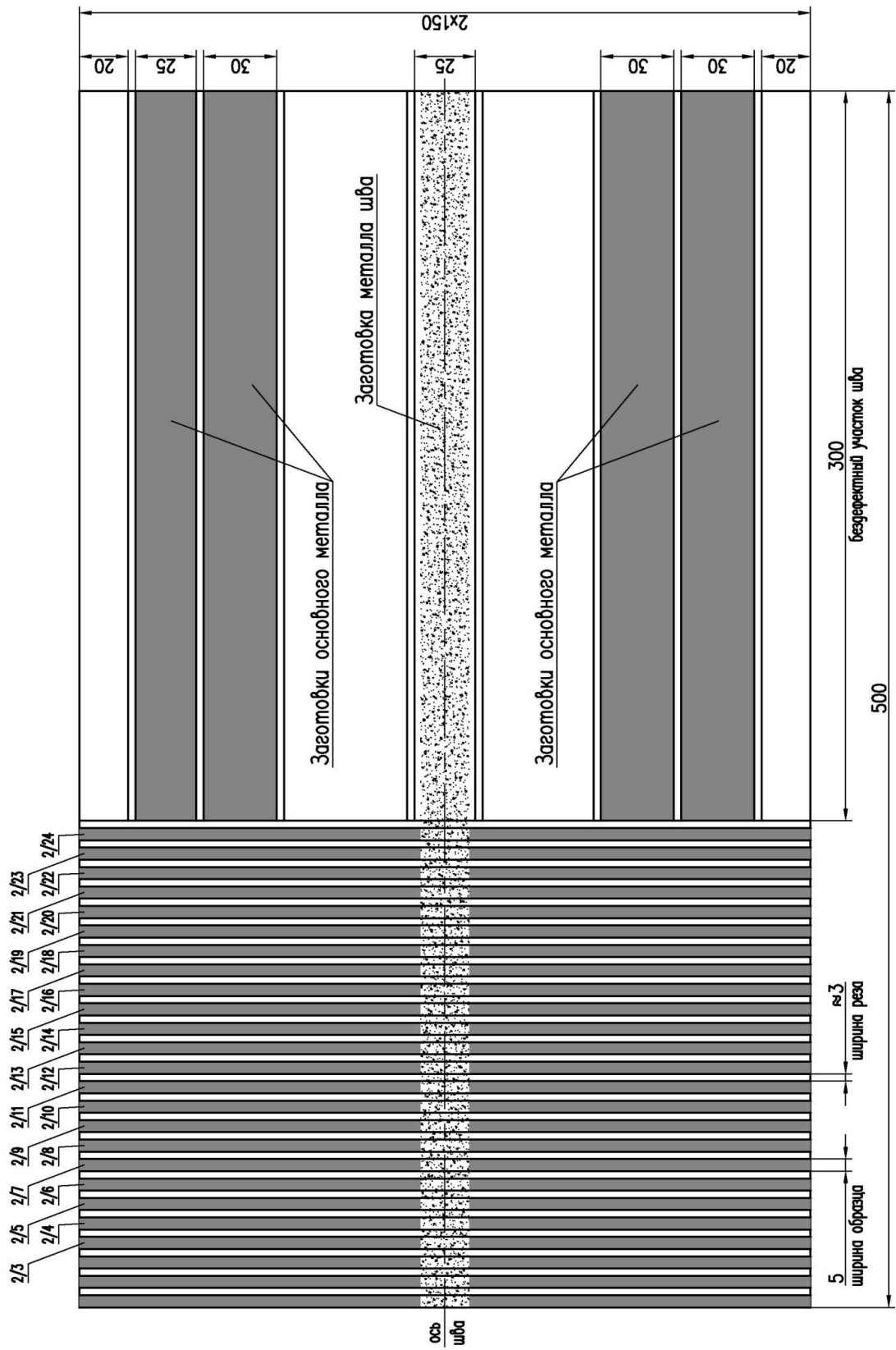


Рисунок 2.23 – Схема вырезки образцов



Образцы основного металла (ОМ) были вырезаны из прямоугольных заготовок металла (рис. 2.20). При этом необходимо уточнить, что эти заготовки были расположены на необходимом удалении от зоны сварки и от краёв реза пластин. Это позволило получить отсутствие влияния последствий термического цикла при сварке и наклепа при механической обработке на механические свойства металла образцов.

Для получения цилиндрических образцов металла сварного шва (МШ) использовались заготовки участка шва без дефектов (рис. 2.24) согласно схеме, представленной на рис. 2.25.

Геометрия цилиндрических образцов принята по типу стандартного в соответствии с ГОСТ 1497-84 (образец номер 7 IV типа) [52]. На рис. 2.23 представлена фотография полученных цилиндрических образцов. Испытания на растяжение проводились на высокоточной разрывной машине марки «SHIMADZU» модель E200kN (рис. 2.24)



Рисунок 2.24 – Заготовка для изготовления образцов металла сварного шва

В процессе растяжения образцов, производилась автоматическая фиксация числовых значений нагрузки и перемещения подвижного захвата, которая осуществлялась при помощи сопряженного компьютера с частотой 100 точек измерения в секунду. На основе полученных данных для образцов были построены усредненные диаграммы растяжения в координатах « $\sigma$ - $\delta$ » (рис. 2.28) для основного металла (ОМ), металла шва из ИСС-1 (МШ-1) и металла шва из ИСС-2 (МШ-2).



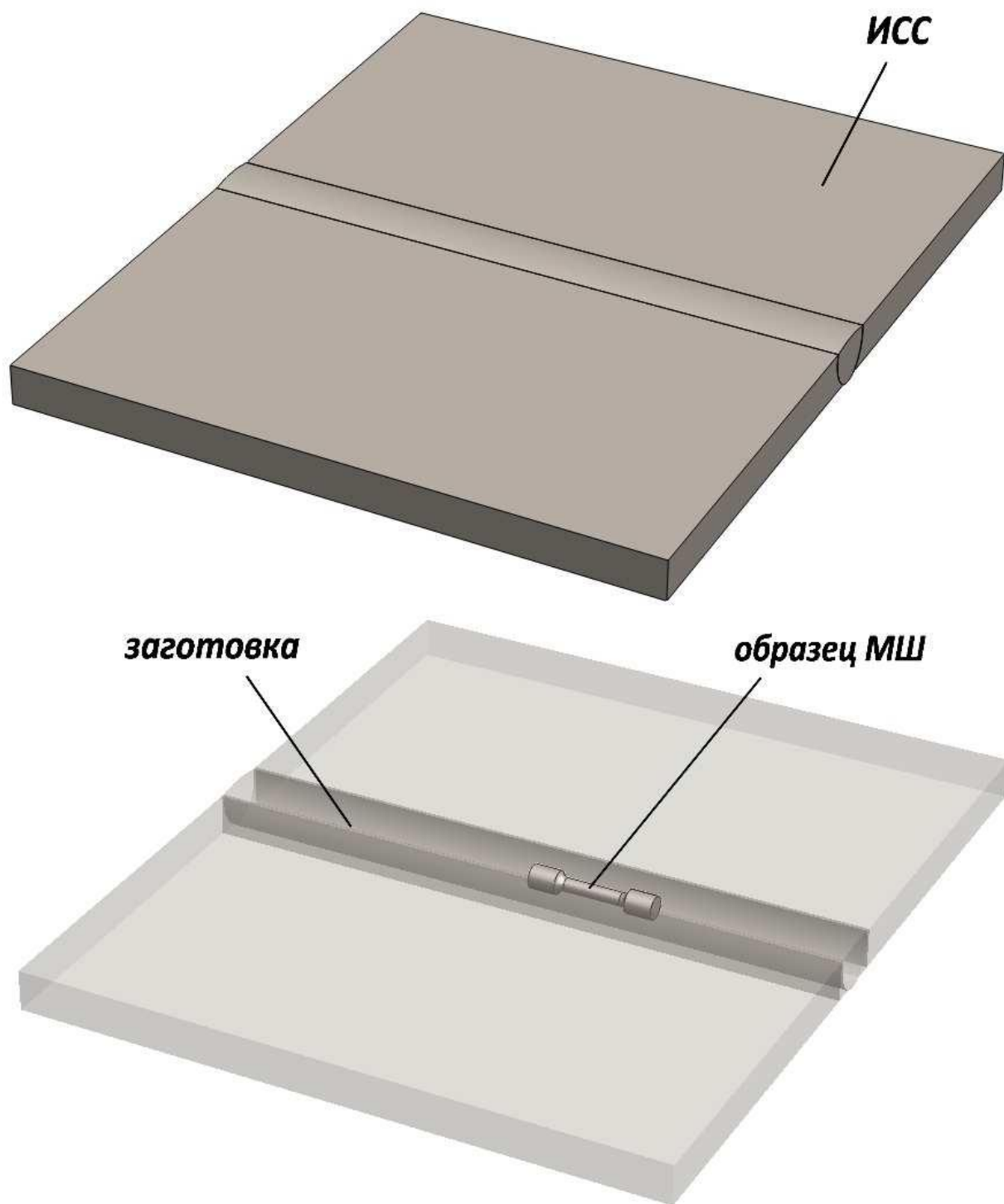


Рисунок 2.25 - Получение цилиндрических образцов из сварного шва на исходном сварном соединении (ИСС)

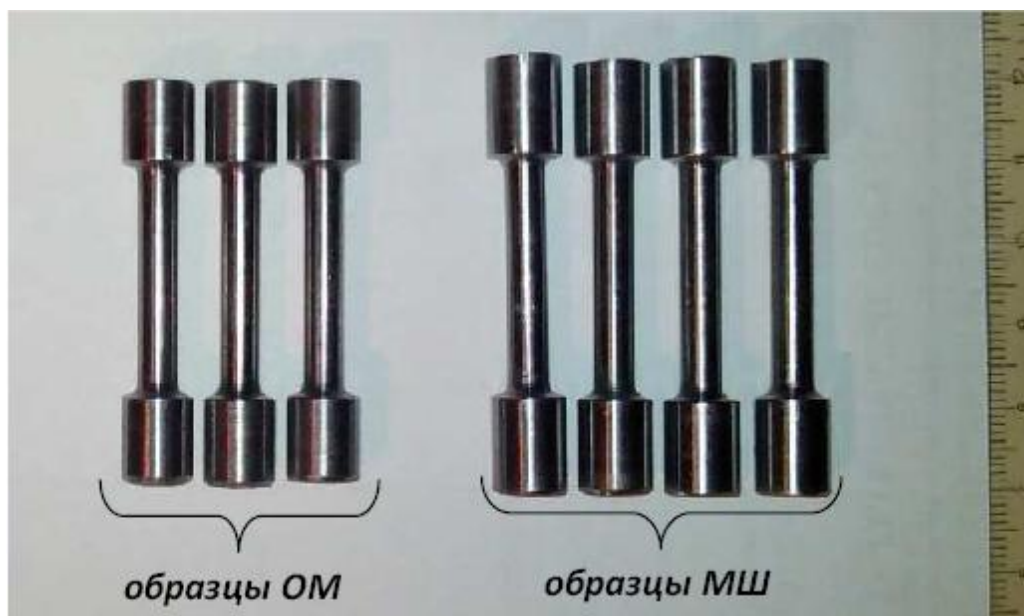


Рисунок 2.26 – Цилиндрические образцы основного металла и металла сварного шва



Рисунок 2.27 – Универсальная машина для осуществления статических и динамических испытаний

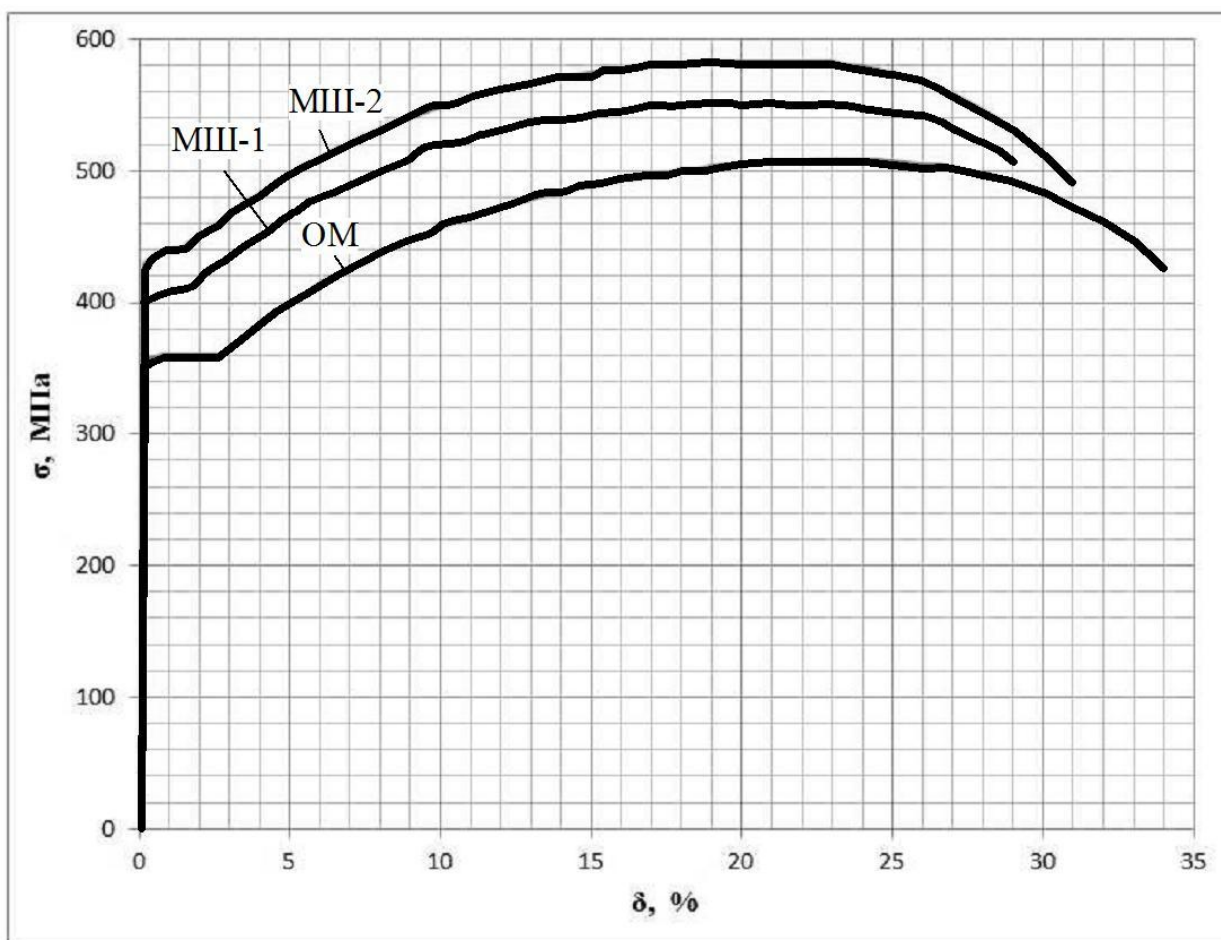


Рисунок 2.28 – Усредненные диаграммы растяжения цилиндрических образцов

Полученная информация о механических свойства основного металла хорошо согласуется с данными сопроводительного сертификата, который был представлен на поставляемую продукцию сталепрокатным заводом. Согласно этому сертификату, листовая сталь 09Г2С, применяемая для изготовления образцов, обладает следующими характеристиками:  $\delta=35\%$ ,  $\sigma_B=510$  МПа,  $\sigma_T=350$  МПа.

Результаты испытаний образцов металла шва показывают, что прочность металла шва в сварном соединении превышает прочность основного металла на 10...15%. При этом прочность металла шва, в образце сваренном с применением импульсного управления дугой (МШ-2) оказалась выше, чем прочность металла шва в образце, сваренном без импульсного управления (МШ-1).

## 3 ПРОЕКТНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА

### 3.1 Подготовка кромок

Предварительно необходимо произвести осмотр кромок труб, а также наружных и внутренних поверхностей торцов труб.

Шлифованием на неизолированной поверхности концов труб на расстоянии не менее 40 мм от их торцов производят устранение наружных дефектов (царапин, рисок, задиров), которые имеют глубину более 0,4 мм и протяжённость более 150 мм, а также глубину более 0,2 мм любой протяжённости. Толщина стенки на концах трубы после механической обработки не должна быть менее допустимого значения (минимальная толщина стенки концов труб 26,7 мм).

Если концы труб имеют забоины, задиры фасок, а так же поверхностные дефекты (царапины, риски, задиры) глубиной, превышающей минусовой допуски на толщину стенки трубы, любые вмятины, закаты и расслоения на расстоянии менее 40 мм от торцов, то такие дефекты исправлению не подлежат. Поврежденный участок трубы обрезают механизированной орбитальной газовой резкой, далее осуществляют разделку кромок специализированным станком типа СПК. В этом случае металл резанных кромок удаляют на глубину не менее 1,0 мм.

Запрещено производить ремонт сваркой любых повреждений поверхности труб, забоин, задиров, а также правка вмятин на концах труб.

После проведения вырезки дефектных участков на конце трубы, а также после резки труб, необходимо выявить возможные расслоения путём проведения ультразвукового контроля по всему периметру участка трубы на ширине не менее 40 мм от резаного торца. Если обнаружены расслоения, торец трубы необходимо отрезать на расстоянии не менее 300 мм и произвести повторный ультразвуковой контроль.

Механическую обработку торцов труб производят с использованием станков для подготовки кромок типа СПК, входящими в состав оборудования фирмы CRC-Evans.

Производят сошлифовывание усиления заводского шва снаружи трубы до значений 0,5...1,0 мм на расстоянии порядка 10...15 мм от торца трубы.

Производят зачистку свариваемых кромок труб и прилегающей к ним внутренней и наружной поверхности по ширине не менее 15 мм до чистого металла механическим способом. При этом используют шлифмашинку и дисковую проволочную щетку. Следует остерегаться нарушения внутреннего гладкостного покрытия.

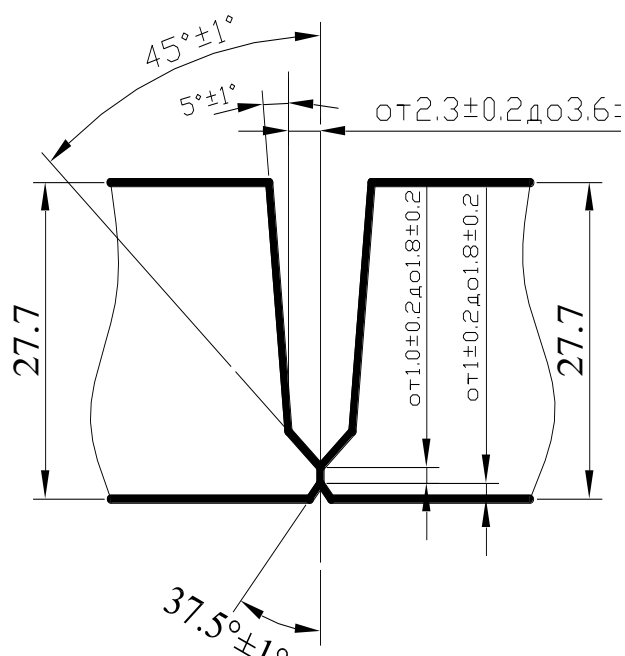


Рисунок 3.1 – Подготовка кромок труб под сварку

### 3.2 Сборка под сварку

Сборку труб производят с применением на внутреннего пневматического центриатора фирмы CRC-Evans. Сборку осуществляют без прихваток.

При сборке необходимо следить, чтобы расстояние между заводскими швами стыкуемых труб было не менее 100 мм (рекомендованное значение – 250 мм). Заводские швы желательно расположить в верхней половине

периметра стыка.

Стыковое соединение собирают без зазора. Допускается наличие локального зазора в собранном стыке, которые составляет не более 0,5 мм на участках соединения длиной не более 100 мм.

Далее выполнять контроль смещения кромок сварного соединения труб. Смещения кромок должны равномерно распределяться по периметру соединения. Максимально допустимая величина наружного смещения кромок составляет 2,0 мм. Допустимы локальные смещения кромок до 3,0 мм, при условии, что их суммарная протяженность не превышает 743 мм.

При устранении зазоров и смещения кромок не допускается применение ударного инструмента.

### 3.3 Предварительный подогрев

Предварительный подогрев свариваемых кромок осуществляют при помощи установки индукционного нагрева. Температура предварительного нагрева  $+100^{+30}$  °С.

Подогрев кромок свариваемых соединений регулируется с помощью термопары, устанавливаемой в зените на расстоянии не более 25 мм от края предполагаемого сварного шва. Подогрев должен быть равномерным по толщине стенки и периметру стыка в зоне шириной не менее 150 мм (не менее 75 мм в каждую сторону от свариваемых кромок).

Допустимо применение кольцевых газопламенных горелок заводского изготовления случае прекращения энергоснабжения или если вышла из строя установка индукционного нагрева.

Температуру подогрева замеряют на наружной поверхности в местах, которые равномерно расположены в каждой четверти трубы по периметру на расстоянии 10...15 мм и 60...75 мм в обе стороны от свариваемых кромок. Перед контролем температуры подогрева должен быть выдержан временной интервал не менее 2,2 мин.

### 3.4 Сварка стыка

Внутренний (корневой) шов проваривают изнутри трубы многоголовочным автоматом, который располагают между жимками внутреннего центратора, последовательно. Сначала производят сварку тремя головками правого, а затем сварку тремя другими головками левого полупериметра стыка труб.

Первый наружный шов – «горячий проход» сваривают с использованием наружного сварочного автомата П-600 (Р-600).

Временной интервал между сваркой внутреннего (корневого) слоя и началом сварки «горячего прохода» должен составлять не более 10 минут. В случае превышения этого интервала времени необходимо проведение подогрева сварного соединения до температуры  $+100\dots 130$  °С.

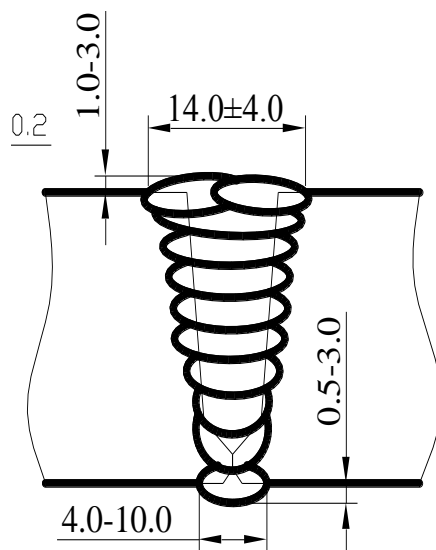


Рисунок 3.2 – Сварной шов труб: Минимальное количество слоев – 10, количество проходов – 11

Межслойная температура должна составлять не менее  $+50$ °С и не более  $+250$ °С. Если межслойная температура снизилась ниже  $+50$ °С, необходимо выполнить подогрев соединения при помощи кольцевых газовых горелок до температуры  $60\dots 90$  °С.

После окончания сварки «горячего прохода» необходимо освободить жимки центратора и с использованием механизма самохода переместить центратор внутрь трубопровода. Недопустимо освобождение жимков центратора до завершения сварки «горячего прохода».

### 3.5 Сварочные материалы

При сварке применяется проволока сплошного сечения:

- для сварки внутреннего (корневого) слоя шва и «горячего прохода» – проволока марки TS-6 (Thyssen K-Nova) Ø 0.9 мм типа ER70-G по AWS A5.18
- при сварке заполняющих и облицовочных слоёв шва – проволока марки Union K-Nova Ni Ø 1.0 мм типа ER80S-G по AWS A5.28

При сварке применяются защитные газы:

- для сварки внутреннего (корневого), заполняющих и облицовочного слоёв шва – 80%Ar-20%CO<sub>2</sub>
- для сварки «горячего прохода» – 100%CO<sub>2</sub>.

### 3.6 Контроль качества сварки

1) Для обеспечения требуемого уровня качества необходимо проведение:

- а) проверки квалификации сварщиков;
- б) контроля исходных материалов, труб и трубных заготовок (входной контроль);
- в) систематического операционного (технологического) контроля, осуществляемого в процессе сборки и сварки;
- г) визуального контроля (внешний осмотр) и обмера готовых сварных соединений;
- д) проверки сварных швов с применением неразрушающих методов контроля;
- е) механических испытаний сварных соединений.



## 2) Операционный контроль

Операционный контроль осуществляется мастером и производителем работ. Проверяют правильность и необходимую последовательность выполнения технологических операций сборки и сварки трубопровода в соответствии с требованиями нормативной документации и действующих операционных технологических карт.

В процессе сборки соединений под сварку проверяется:

- чистота полости труб, качество зачистки кромок и прилегающих к ним поверхностей;
- разностенность свариваемых элементов не должна превышать допустимой величины;
- смещение наружных кромок свариваемых элементов не должно превышать допустимой величины;
- технологические зазоры в стыках не должны превышать допустимой величины.

При просушке свариваемых кромок или предварительном подогреве, контролируют температуру подогрева.

При операционном контроле в процессе сварки контролируют соблюдение режимов сварки (используются контрольно-измерительная аппаратура, установленная на сварочных агрегатах, постах, машинах и т.п.), порядок наложения слоев и их количество, применяемые материалы для сварки корневого и заполняющих слоев, время перерывов между сваркой корневого шва и «горячего прохода», соблюдение других требований технологических карт.

## 3) Проведение визуального контроля и обмера сварных соединений

Необходимо провести 100% очистку сварных соединений труб, устранив шлак, грязь, брызги металла. Далее сварные соединения подвергаются визуальному контролю и обмеру.

Внешний осмотр сварного соединения позволяет установить:

- факт наличия на каждом стыке клейма сварщика, который выполнял сварку. В случае выполнения сварки одного стыка несколькими сварщиками, на каждом стыке проставляют клеймо каждого сварщика или одно клеймо, присвоенное всей бригаде;
- выявить в соединении наружные трещины, незаплавленные кратеры и выходящие на поверхность поры.

#### 4) Проведение радиографического контроля.

При проведении радиографического контроля применяются отечественные плёнки для радиографического контроля типа РТ-5 или их иностранные аналоги.

Просвечивание осуществляют при помощи внутритрубной самоходной установки «Кроулер» С-300 (рис. 3.3).

Швы, которые подлежат контролю, необходимо разметить на отдельные участки. Длина этих участков зависит от формата радиографической пленки. Затем участки контроля маркируют при помощи несмываемой краски, которая обеспечивает сохранность маркировки до начала операции изоляции трубопровода.



Рисунок 3.3 – Применение установки «Кроулер» С-300

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации была поставлена цель - повышение надёжности и качества механизированной сварки магистральных трубопроводов в защитных газах за счёт импульсного управления сварочной дугой.

Проведённый анализ работы магистрального трубопровода как металлоконструкции и его надёжности позволил установить, что обеспечение качества сварки магистральных трубопроводов является актуальной задачей. Существенного повышения производительности сварки можно достичь путём применения механизированной сварки, стабильность качества при сварке трубопроводов должна обеспечиваться за счёт управления горением дуги.

Анализ существующих способов повышения эффективности дуговой сварки за счёт импульсного управления сварочной дугой выявил достаточно узкую область применения этих способов. Существенным недостатком является, в первую очередь, высокая стоимость источников питания. Для разработки технологий и создания конкурентного, полностью отечественного, оборудования для сварки плавящимся электродом магистральных трубопроводов необходимо исследовать особенности перехода капли электродного металла в ванну при сварке в различных пространственных положениях.

Экспериментально установлено, что при управлении процессом сварки в среде углекислого газа путем изменения энергетических параметров дуги сварочная ванна принимает непосредственное участие в образовании короткого замыкания наравне с каплей электродного металла.

Обзор отечественных разработок в области импульсного управления сварочной дугой позволил предложить схему импульсного управления сварочной дугой,

Установлена перспективность использования для снижения разбрызгивания стабилизации периода каплеобразования с управлением по

мгновенным значениям параметров режима. При этом напряжению дугового промежутка можно получить больше информации, чем по изменению сварочного тока. На интервале паузы между импульсами сварочного тока можно четко фиксировать моменты, когда снижающееся напряжение дугового промежутка станет равным заданному напряжению, и в этот момент включать импульс сварочного тока, что обеспечивает постоянство начальных условий при включении каждого импульса сварочного тока и, благодаря этому, постоянство амплитудного значения импульсов сварочного тока.

Результаты испытаний образцов металла шва позволяют сделать вывод о том, что прочность металла шва в полученном сварном соединении выше прочности основного металла на 10...15%. При этом прочность металла шва, в образце сваренном с применением импульсного управления дугой оказалась выше, чем прочность металла шва в образце, сваренном без импульсного управления.

Предложена проектная технология сварки с применением импульсного управления сварочной дугой, которая предусматривает использование стандартного оборудования для автоматической орбитальной сварки, источника питания и формирователя импульсов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мазур, И. И. Безопасность трубопроводных систем / И. И. Мазур, О. М. Иванцов. – М.: Изд-во «Елима», 2004. – 104 с.
2. Вышемирский Е. М. Состояние и основные направления развития сварочного производства ОАО «Газпром» / Е. М. Вышемирский // Сварка и Диагностика. – 2009. – № 1. – С. 16–19.
3. Верёвкин, А. В. Повышение эффективности сварки в  $\text{CO}_2$  неповоротных стыков магистральных трубопроводов за счет применения импульсного питания сварочной дуги : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.10 / Алексей Валерьевич Верёвкин ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Барнаул, 2010. – 143 с.
4. Вышемирский, Е. М. Новые технологии сварки при строительстве и ремонте газопроводов / Е. М. Вышемирский, А. В. Шипилов, В. И. Беспалов, Д. Г. Будревич // Наука и техника в газовой промышленности. – 2006. – № 2. – С. 27–34.
5. Ланге, Б.С. Разработка методологии комплексной оценки качества магистральных трубопроводов в процессе строительного контроля: Дис. ... канд. техн. наук : 25.00.19 / Борис Степанович Ланге ; Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина. – Москва, 2012. – 201 с.
6. Сенцов, С. И. Влияние системы менеджмента качества строительства на безотказность работы магистральных трубопроводов: дис. ... докт. техн. наук : 25.00.19 / Сергей Иванович Сенцов ; Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина. – Москва, 2009. – 325 с.
7. Иванов, А. Ю. Обеспечение комплекса механических свойств зоны термического влияния сварных соединений труб классов прочности X80, X90 на основе исследования фазовых превращений и структуры: дисс. ... канд. техн. наук : 05.16.01, 05.02.10 / Александр Юрьевич Иванов ; Центральный

научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей». – Санкт-Петербург, 2011. – 209 с.

8. Калиниченко, Н. П. Атлас дефектов сварных соединений и основного металла: учебно-методическое пособие / Н. П. Калиниченко, М. А. Васильева. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2006. – 55 с.

9. ГОСТ 2601-84 Сварка металлов. Термины и определения основных понятий. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – С. 57.

10. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. Ред. В.В. Клюева. Т.1: В 2 кн.: Кн. 1: Визуальный и измерительный контроль. Кн. 2: Радиационный контроль. – М.: Машиностроение, 2003. – С. 560.

11. СТО Газпром 2-2.4-083-2006 Инструкция по неразрушающим методам контроля качества сварных соединений при строительстве и ремонте промысловых и магистральных газопроводов: Утв. ОАО «Газпром» 30.10.06., Москва, 2007. – С. 108.

12. Ремизов, А. Е. Повышение эффективности оценки дефектов труб магистральных газопроводов с учетом результатов стендовых испытаний сканеров-дефектоскопов : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.19 / Алексей Евгеньевич Ремизов ; НИИ природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ. – Москва, 2014. – 138 с.

13. Бернадский В. Н., Сварочное производство и рынок сварочной техники в современной экономике: перспективы развития сварочного производства / В. Н. Бернадский, О. К. Маковецкая // Сварочное производство. – 2009. – № 2. – С. 43–47.

14. Галкин, В. А. Опыт разработки современных отечественных технологий и оборудования для механизированной сварки магистральных газопроводов / В. А. Галкин, А. А. Латышев, С. И. Полосков [и др.] // Сварка и Диагностика. – № 2. – С. 37–43.

15. Scotti, A. A methodology for voltage drop determination in GMA welding: arcs with shortcircuiting metal transfer / A. Scotti, V Ponomarev, da

A. V. Costa // European Physical Journal: Applied Physics. – 2006. – Vol. 34, № 3. – P. 231–236.

16. Полосков, С. И. Управление переносом капли при сварке плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка / С. И. Полосков, Ю. С. Ищенко, В. А. Лебедев, О. Б. Гецкин // Сварочное производство. – 2001. – № 6. – С. 6–9.

17. Полосков, С. И. Особенности управляемого тепломассопереноса при сварке плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка / С. И. Полосков, Ю. С. Ищенко, В. А. Лебедев, О. Б. Гецкин // Сварочное производство. – 2002. – № 7. – С. 6–13.

18. Komizo, Y. Overview of recent welding technology relating to pipeline construction / Y. Komizo // Transactions of JWRI. – 2009. – Vol. 37, № 1. – P. 1–5.

19. Yamane, S. Numerical simulation of weld pool in narrow gap GMA welding / S. Yamane, K. Yoshiyama, K. Oshima // Quarterly journal of the Japan welding society. – 2009. – Vol. 27, № 2. – P. 37–41.

20. Ковалевич, О. М. Риск в техногенной сфере / О. М. Ковалевич. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 148 с.

21. Стеклов, О. И. Анализ рисков магистральных газопроводов России по данным мониторинга результатов внутритрубной диагностики / О. И. Стеклов, Д. П. Варламов // Сварочное производство. – 2013. – № 9.

22. Никифоров, А. Д. Управление качеством: учебное пособие для вузов / А. Д. Никифоров. – М.: Дрофа, 2009. – 720 с.

23. Кане, М. М. Системы, методы и инструменты менеджмента качества: учебник для вузов / М. М. Кане, Б. В. Иванов, В. Н. Корешков, А. Г. Схиртладзе. – СПб.: Питер, 2009. – 560 с.

24. Ильенкова, С. Д. Управление качеством: учебник для вузов / С. Д. Ильенкова, Н. Д. Ильенкова, В. С. Мхитарян. – М.: Изд-во «ЮНИТИ-ДАНА», 2009. – 352 с.

25. Стеклов, О. И. Повышение технологичности и работоспособности

оборудования нефтегазохимического аппаратостроения / О. И. Стеклов // Труды МИНХиГП. 1987. – № 196. – С. 3–10.

26. Хромченко, Ф. А. Ресурс сварных соединений паропроводов / Ф. А. Хромченко. – М.: Машиностроение, 2005. – 352 с.

27. Бакиев, А. В. Технологическое обеспечение качества при производстве сварного нефтегазохимического оборудования оболочкового типа / А. В. Бакиев // Труды МИНХиГП. 1987. – № 196. С. – 20–28.

28. Феодосьев, В. И. Сопротивление материалов / В. И. Феодосьев. – М.: Наука, главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 560 с.

29. Захаров, М. Н. Прочностная надежность оборудования: учебное пособие / М. Н. Захаров. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 123 с.

30. Золоторевский, В. С. Механические свойства металлов: учебник для вузов / В. С. Золоторевский. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.

31. Фетисов, Г. П. Материаловедение и технология металлов / Г. П. Фетисов, М. Г. Карпман, В. М. Матюнин, В. С. Гаврилюк [и др.]. – М.: Изд-во «Высшая школа», 2001. – 639 с.

32. Крампит, Н. Ю. Управление процессом плавления и переноса при сварке в углекислом газе длинной дугой: монография / Н. Ю. Крампит, А. Г. Крампит. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 105 с.

33. Князьков, В. Л. Повышение эффективности ручной дуговой сварки модулированным током электродами с покрытием за счет автоматической адаптации параметров режима к технологическому процессу: дис. ... канд. техн. наук : 05.03.06 / Виктор Леонидович Князьков ; АлтГТУ им. И. И. Ползунова. – Барнаул, 2006. – 165 с.

34. Шигаев, Т. Г. Сварка модулированным током / Т. Г. Шигаев // Итоги науки и техники. – Том 17. Сварка. – 1985 – С. 91–133.



35. Князьков, А. Ф. Исследование сварочно-технологических свойств покрытых электродов при сварке модулированным током / А. Ф. Князьков, В. Л. Князьков // Сварочное производство. – 2011. – № 10. – С. 15–18.

36. Сварочно-технологический центр «ШТОРМ-ЛОРХ». URL: <http://shtormlorch.ru>

37. Райский В.Г. Технология импульсного сварочного процесса: TwinPulse, SpedPulse, STT, HighSpeed. – Режим доступа : <http://www.intertehno.ru/articles/c4/35/>. свободный. – Загл. с экрана.

38. Процесс SpeedArc. – Режим доступа : <http://www.shtormlorch.ru/rus/info/tech/speedarc.php>. свободный. – Загл. с экрана.

39. Waveform analysis for MIG / GMAW "Lincoln RapidArc" on steel. . – Режим доступа : [http://www.weldsmith.co.uk/dropbox/cranu/110523\\_waveforms\\_GMAW\\_steel/waveforms\\_GMAW-P\\_RapidArc.html](http://www.weldsmith.co.uk/dropbox/cranu/110523_waveforms_GMAW_steel/waveforms_GMAW-P_RapidArc.html). – Загл. с экрана.

40. Потапьевский, А. Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Часть 1. Сварка в активных газах / А. Г. Потапьевский. – К.: «Екотехнологія», 2007. – 192 с.

41. Потапьевский, А. Г. Сварка сталей в защитных газах плавящимся электродом. Техника и технология будущего: монография / А. Г. Потапьевский, Ю. Н. Сараев, Д. А. Чинахов. – Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2012. – 208 с.

42. Сварка MIG/MAG и Pulse-MIG: конспект лекций для сварщиков // Krmppi Oy. – 2002. – 44 с.

43. Устройство для сварки: а. с. № 1779506 СССР : МПК В 23 К 9/09 / А. Ф. Князьков, В. В. Швалев, Б. Г. Долгун ; заявл. 18.01.1991 ; опубл. 07.12.1992, Бюл. № 45. - 4 с.

44. Устройство для сварки: а. с. № 682336 СССР : МПК В 23 К 9/10 / С. В. Ушаков, Р. И. Дедюх : заявл. 31.05.1978 ; опубл. 30.08.79, бюл. № 32. – 5 с.

45. Устройство для сварки: а.с. № 1738525 СССР: МПК В 23 К 9/09 / А. Ф. Князков, Б. Г. Долгун, В. В. Швалев, В. О. Корняков : заявл. 15.10.90; опубл. 07.06.92, бюл. № 21. – 6 с.

46. Гецкин, О. Б. Опыт разработки и применения современных отечественных технологий и оборудования для автоматической орбитальной сварки магистральных газопроводов / О. Б. Гецкин, Е. М. Вышемирский, А. В. Шипилов, С. И. Полосков // Сварка и диагностика. – 2010. – № 6 – С. 51–57.

47. Scotti, A. A methodology for voltage drop determination in GMA welding: arcs with shortcircuiting metal transfer / A. Scotti, V. Ponomarev, F. V. Costa // European Physical Journal: Applied Physics. – 2006. – Vol. 34, № 3. – P. 231–236.

48. Ланкин, Ю. Н. Автоматическое управление процессом сварки плавящимся электродом в CO<sub>2</sub> с периодическими замыканиями дугового промежутка (обзор) / Ю. Н. Ланкин // Автоматическая сварка. – 2007. – № 1. – С. 3–10.

49. Князьков, А. Ф. Активное управление плавлением и переносом электродного металла / А. Ф. Князьков, С. А. Князьков // Сварка и диагностика. – 2011. – № 4. – С. 27–32.

50. ГОСТ 6996-66 Сварные соединения. Методы определения механических свойств. М.: Стандартиформ, 2006. – 44 с.

51. Ляпичев Д. М. Двухосное напряженное состояние при изгибе и растяжении широких образцов / Сборник тезисов 68-ой Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ – 2014». М.: Изд. центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2014. Т. 1. С. 291.

52. ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Стандартиформ, 2005. – 22 с.

53. Thomsen, J. S. Control of pulsed gas metal arc welding / J. S. Thomsen // Identification and Control. – 2006. – Vol. 2. – pp. 115–125.