

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)

Производство, диагностика и ремонт сварных конструкций и деталей  
газонефтехимического оборудования

(направленность (профиль))

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

на тему: Исследование формирования сварного соединения трубопровода 3-х  
фазной дугой неплавящимися электродами

|                         |   |                        |
|-------------------------|---|------------------------|
| Студент                 | <u>А.А. Казанцев</u><br>(И.О. Фамилия)  | _____ (личная подпись) |
| Научный<br>руководитель | <u>Г.М. Короткова</u><br>(И.О. Фамилия) | _____ (личная подпись) |
| Консультанты            | <u>В.Г. Виткалов</u><br>(И.О. Фамилия)  | _____ (личная подпись) |

Руководитель программы д.т.н., профессор, В.В. Ельцов  
(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 2018

## Содержание

|  |    |
|--|----|
| Введение.....  | 4  |
| Глава 1. Технологический трубопровод.....  | 5  |
| 1.1 Классификация технологических трубопроводов .....  | 8  |
| 1.2 Обзор способов сварки технологического трубопровода.....   | 20 |
| 1.3 Способы термообработки сварных соединений технологических<br>трубопроводов.....  | 25 |
| Глава 2. Особенности 3-х фазной дуги.....  | 29 |
| 2.1 Обобщенное представление о горении 3-фазной сварочной дуги.....  | 29 |
| 2.2 Особенности 3-фазной симметричной сварочной дуги с $K_T = 1,0$ .....   | 30 |
| 2.3 Внутренний механизм и закономерности горения элементарных дуг в<br>факеле 3-фазной сварочной дуги с $K_T = 1,73$ при несимметричной схеме<br>питания ..... | 34 |
| Глава 3. Исследование формирования шва при сварке 3-х фазной дугой<br>сталей.....  | 39 |
| 3.1 Разработка методики проведения эксперимента .....  | 39 |
| 3.2 Выбор сварочного оборудования, материалов и контролирующих<br>приборов.....  | 41 |
| 3.3 Организация сварочного поста для сварки 3-х фазной дугой.....  | 48 |
| 3.4 Исследование формирования шва 3-х фазной дугой вольфрамовым<br>электродом в среде защитного газа аргон.....  | 51 |
| Глава 4. Металлографические исследования сварных соединений.....   | 62 |

|  |    |
|--|----|
| 4.1 Методика металлографических исследований образцов полученных способом трехфазной сварки.....   | 62 |
| 4.2 Результаты металлографических исследований сварного шва.....   | 64 |
| Глава 5. Проектирование технологии сварки трубопровода 3-х фазной дугой неплавящимися электродами сталей в среде защитного газа аргон..... | 70 |
| 5.1 Подготовка торцов соединяемых трубопроводов.....   | 71 |
| 5.2 Зачистка стыка перед сборкой и сваркой технологического трубопровода.....  | 72 |
| 5.3 Сборка технологического трубопровода перед сваркой.....  | 72 |
| 5.4 Сварка технологического трубопровода трехфазной дугой .....  | 73 |
| Заключение.....  | 77 |
| Список используемых источников.....  | 79 |

## **Введение**

Ранее на кафедре «Сварка, обработка металлов давлением и родственные процессы» способ сварки трехфазной дугой неплавящимися электродами в среде защитного газа аргон исследовался исключительно для сварки легких сплавов. Результаты исследований по легким сплавами выявили преимущества способа над остальными из-за простоты применяемого источника питания, увеличенной проплавляющей способности сварочной дуги, что позволило увеличить производительность сварки, не уступая в качестве сварных соединений.

Известны работы по сварке трехфазной дугой покрытыми электродами и плавящимися электродами. Исследования по сварке трехфазной дугой неплавящимися электродами сталей не проводились.

Высокую производительность трехфазной дуги при сварке неплавящимися электродами в защитной среде газа целесообразно применить при производстве конструкций из углеродистых сталей.

Отсутствие исследований по сварке трехфазной дугой углеродистых сталей неплавящимися электродами свидетельствуют об актуальности данной работы, так как производительность является важным критерием в условиях текущего удорожания проведения сварочных работ.

Предварительные исследования о применении способа сварки трехфазной дугой вольфрамовыми электродами сталей позволят расширить область применения трехфазной сварочной дуги.

Цель – повышение производительности сварки углеродистых сталей за счет использования трехфазной дуги неплавящимися вольфрамовыми электродами в среде защитного газа аргон.

## Глава 1. Технологический трубопровод

К технологическим трубопроводам относятся трубопроводы в пределах промышленных предприятий, по которым транспортируется сырье, полуфабрикаты и готовые продукты, пар, вода, топливо, реагенты и другие вещества, обеспечивающие ведение технологического процесса и эксплуатацию оборудования, а также межзаводские трубопроводы, находящиеся на балансе предприятия.

Трубопроводы в зависимости от класса опасности транспортируемого вещества (взрыво-, пожароопасность и вредность) подразделяются на группы среды (А, Б, В) и в зависимости от расчетных параметров среды (давления и температуры) - на пять категорий I, II, III, IV, V.



Рисунок 1.1 – Внешний вид технологического трубопровода

Таблица 1.1 - Классификация трубопроводов

| Группа среды     | Транспортируемое вещество   | Категория трубопровода |                                |                        |                    |                  |                 |                  |                 |                  |                 |
|------------------|---|------------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
|                  |   | I                      |                                | II                     |                    | III              |                 | IV               |                 | V                |                 |
|                  |   | $P_{расч}$ , МПа       | $t_{расч}$ , °C                | $P_{расч}$ , МПа       | $t_{расч}$ , °C    | $P_{расч}$ , МПа | $t_{расч}$ , °C | $P_{расч}$ , МПа | $t_{расч}$ , °C | $P_{расч}$ , МПа | $P_{расч}$ , °C |
| А                | Вещества с токсичным действием  | -                      | -                              | -                      | -                  | -                | -               | -                | -               | -                | -               |
|                  | а) Чрезвычайно опасные вещества класса 1, высокоопасные вещества класса 2 | Независимо             | Независимо                     | -                      | -                  | -                | -               | -                | -               | -                | -               |
|                  | б) Умеренно опасные вещества класса 3                                     | Св. 2,5                | Св. плюс 300 или ниже минус 40 | От вакуума 0,08 до 2,5 | От минус 40 до 300 | -                | -               | -                | -               | -                | -               |
| Вакуум ниже 0,08 |   | Независимо             | -                              |                        |                    | -                | -               | -                | -               | -                |                 |
| Б                | Взрывопожароопасные вещества  | -                      | -                              | -                      | -                  | -                | -               | -                | -               | -                | -               |
|                  | а) Горючие газы, в том числе сжиженные углеводородные газы                | Св. 2,5                | Св. плюс 300 или ниже минус 40 | От вакуума 0,08 до 2,5 | От минус 40 до 300 | -                | -               | -                | -               | -                | -               |
|                  |   | Вакуум 0,08 и выше     | Независимо                     |                        |                    | -                | -               | -                | -               | -                | -               |
|                  |   | -                      | -                              |                        |                    | -                | -               |                  |                 |                  |                 |

Продолжение таблицы 1.1

| Группа среды | Транспортируемое вещество            | I                      |                                | II  |                       | III                    |                       | IV                           |                       | V                      |                       |
|--------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------------|---|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
|              |                                      | $P_{расч}, \text{МПа}$ | $t_{расч}, \text{°C}$          | $P_{расч}, \text{МПа}$                      | $t_{расч}, \text{°C}$ | $P_{расч}, \text{МПа}$ | $t_{расч}, \text{°C}$ | $P_{расч}, \text{МПа}$       | $t_{расч}, \text{°C}$ | $P_{расч}, \text{МПа}$ | $t_{расч}, \text{°C}$ |
|              | б)<br>Легковоспламеняющиеся жидкости | Св. 2,5                | Св. плюс 300 или ниже минус 40 | Св. 1,6 до 2,5                              | До 300                | До 1,6                 | От минус 40 до 120    | -                            | -                     | -                      | -                     |
|              |                                      | Вакуум ниже 0,08       | Независимо                     | Вакуум выше 0,08                            | От минус 40 до 300    |                        |                       | -                            | -                     | -                      | -                     |
|              | в) горючие жидкости                  | Св. 6,3                | Св. плюс 350 или ниже минус 40 | Св. 2,5 до 6,3                              | До 350                | Св. 1,6 до 2,5         | До 250                | До 1,6<br>От минус 40 до 120 | -                     | -                      |                       |
|              |                                      | Вакуум ниже 0,003      |                                | От вакуума 0,003 до вакуума 0,08            |                       | Вакуум выше 0,08       | От минус 40 до 250    |                              | -                     | -                      |                       |
| В            | Трудногорючие и негорючие вещества   | Вакуум ниже 0,003      | Св. плюс 450 или ниже минус 60 | От вакуума 0,003 до вакуума 0,08 или до 6,3 | До 450                | Св. 2,5 до 6,3         | До 350                | Св. 1,6 до 2,5               | До 250                | От вакуума 0,08 до 1,6 | От минус 40 до 120    |
|              |                                      | Св. 6,3                |                                |   |                       | От вакуума 0,08 до 1,6 | Ниже минус 40         |                              |                       |                        |                       |

Основной функцией технологических трубопроводов является транспортировка в пределах предприятия сырья, готовой продукции, воды и других материалов, которые обеспечивают бесперебойную эксплуатацию оборудования, также ведение технологического процесса и отведение отработанных жидкостей, газов, а также других реагентов для последующей операции по утилизации.

### 1.1 Классификация технологических трубопроводов

В процессе работы трубопровод может находиться под давлением транспортируемого продукта от глубокого вакуума  $1 \times 10^{-5}$  до 250 Мпа и выше, под воздействием температур от  $-170$  до  $700^{\circ}\text{C}$  и более, под постоянной нагрузкой от веса труб и деталей, арматуры, транспортируемого продукта, теплоизоляции, нагрузок теплового удлинения, вибрационных, ветровых и давления грунта.

Надежность и безопасность работы технологических трубопроводов зависят от большого числа факторов, основные из которых:

- характеристику прочности материалов, из которых изготовлен трубопровод;
- характер действующих на трубопровод нагрузок;
- характер напряжений, возникающих в трубопроводе;
- рабочие параметры транспортируемого сырья;
- физико-химические свойства продукта, физическое состояние транспортируемого продукта;
- условия и длительность эксплуатации;
- механические повреждения.



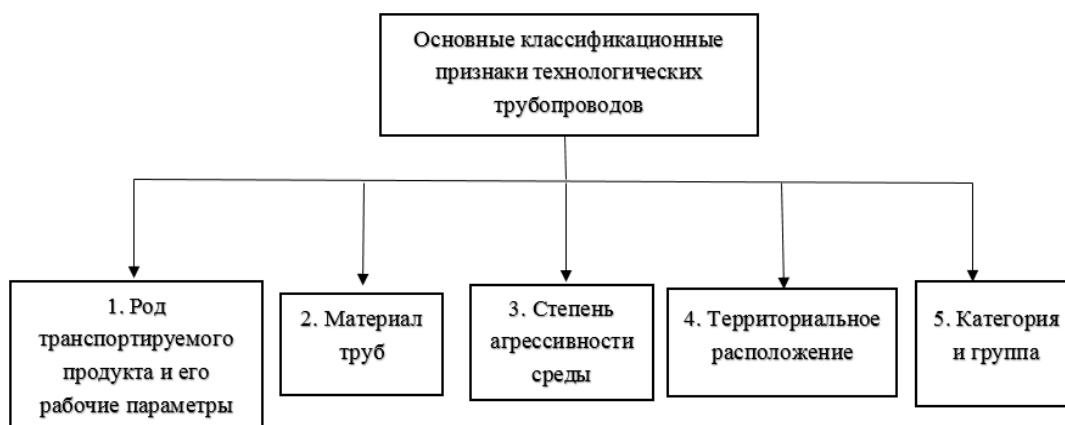


Рисунок 1.2 – Основные классификационные признаки технологических трубопроводов

Технологические трубопроводы в зависимости от транспортируемого продукта разделяют на нефте-, газо-, паро-, мазуто-, бензо-, кислото-, щелочепроводы, а также трубопроводы специального назначения.

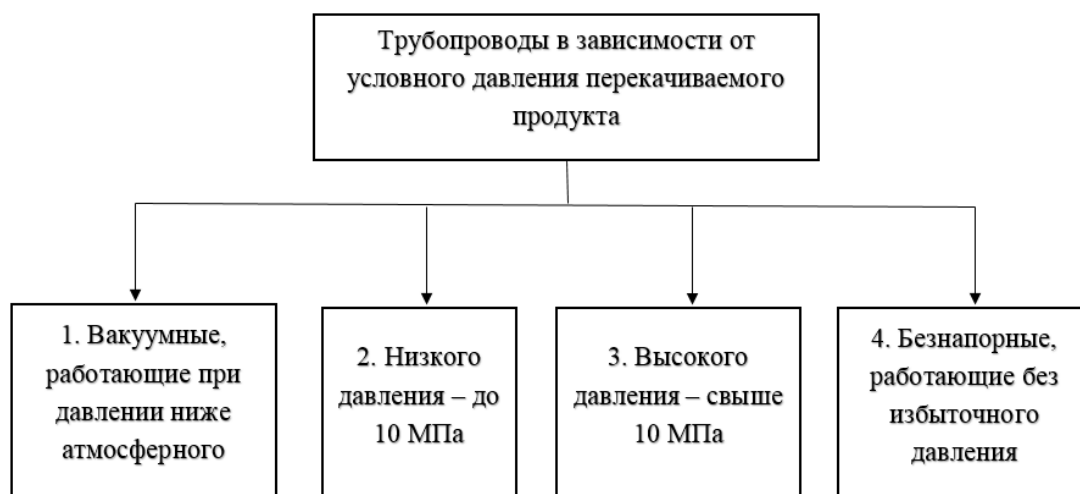


Рисунок 1.3 – Классификация технологических трубопроводов по давлению среды

В промышленном строительстве распределение трубопроводов в зависимости от  $P_y$  по массе таково, как показано в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Классификация трубопроводов по массе

|             |      |     |     |   |          |          |
|-------------|------|-----|-----|---|----------|----------|
| $P_y$ , МПа | До 1 | 1,6 | 2,5 | 4 | 6,3...10 | Свыше 10 |
| Масса, %    | 77,5 | 10  | 5   | 2 | 1,5      | 4        |

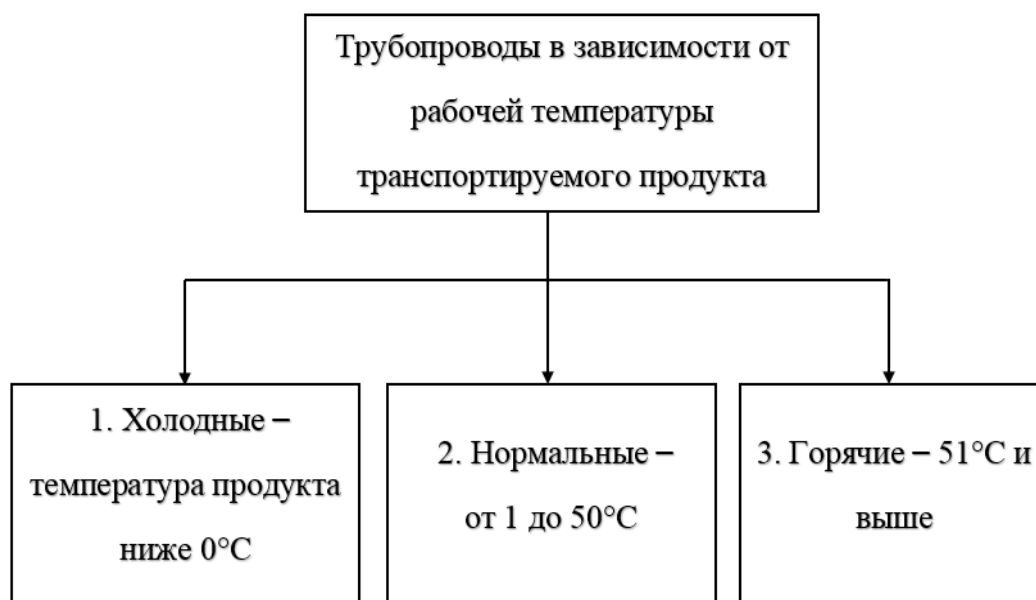


Рисунок 1.4 – Классификация технологических трубопроводов по температуре транспортируемого продукта

По материалу, из которого изготовлены трубы, различают трубопроводы: стальные (из углеродистой, легированной и высоколегированной стали), из цветных металлов и их сплавов (медные, латунные, титановые, свинцовые, алюминиевые), чугунные, неметаллические (полиэтиленовые, поливинилхлоридные, винипластовые, фторопластовые, стеклянные и др.), футерованные резиной, полиэтиленом, фторопластом, эмалированные биметаллические и др.

В промышленном строительстве применяют трубопроводы из различных материалов:

1. Углеродистых и низколегированных сталей;
2. Легированных и высоколегированных сталей;
3. Цветных металлов и их сплавов;

#### 4. Неметаллических материалов.



Рисунок 1.5 – Диаграмма соотношения применения различных материалов в промышленном строительстве

Технологические трубопроводы, которые выполняют операцию транспортировки в пределах одного технологического узла или участка цеха, также размещенные в помещении промышленного здания, называются внутрицеховыми.

Основная функция межцеховых технологических трубопроводов – осуществлять транспортировку продукта между оборудованием или хранилищами находящимися в разных цехах.



Рисунок 1.6 – Общий вид внутрицеховых технологических трубопроводов

Статический анализ большого количества проектов связанных со строительством объектов промышленности разных отраслей показал количественный состав материалов, приведенный в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Состав стальных технологических трубопроводов

| Наименование            | Тип трубопровода |          |            |          | В среднем |          |
|-------------------------|------------------|----------|------------|----------|-----------|----------|
|                         | Внутрицеховой    |          | Межцеховой |          | На 1 т    | На 100 м |
|                         | На 1 т           | На 100 м | На 1 т     | На 100 м |           |          |
| Трубы                   | 810              | 1620     | 968        | 1936     | 889       | 1778     |
| Отводы                  | 97               | 194      | 9,7        | 19,4     | 52,3      | 106,6    |
| Тройники                | 5                | 10       | 0,5        | 1        | 2,8       | 5,6      |
| Переходы                | 5,5              | 11       | 1          | 1        | 3         | 6        |
| Заглушки                | 2,3              | 4,6      | 0,2        | 0,4      | 1,3       | 2,6      |
| Фланцы                  | 48               | 96       | 4,8        | 9,6      | 26,4      | 52,8     |
| Болты, гайки            | 12               | 24       | 1,2        | 2,4      | 7,2       | 14,4     |
| Прокладки               | 1,5              | 3        | 0,2        | 0,4      | 0,9       | 1,8      |
| Опоры и подвески        | 18               | 36       | 15         | 30       | 16,5      | 33       |
| Арматура трубопроводная | 178              | 356      | 17,8       | 35,6     | 97,9      | 215,6    |

Наличие большого количества сварных соединений, деталей и арматуры говорят о сложной конфигурации внутрицехового технологического трубопровода. На 100 м трубопровода в среднем

приходится до 80 – 120 кольцевых стыков. Около 37% общей массы внутрицехового трубопровода занимают детали и арматура.

Основной характеристикой межцеховых технологических трубопроводов являются длинные прямые участки общей протяженностью около нескольких сотен метров и малым в сравнении с внутрицеховыми трубопроводами количеством деталей и сварных соединений.



Рисунок 1.7 – Общий вид межцеховых технологических трубопроводов

Детали составляют около 5% от общей массы межцеховых технологических трубопроводов.

Отводы являются самой часто встречающейся деталей трубопроводов. Отводы используются для получения соединения труб одинакового диаметра расположенных под углом с помощью сварки. Конструкции отводов подразделяют на гнутые и крутоизогнутые.

Крутоизогнутые отводы обладают малым радиусом кривизны, поэтому имеют сравнительно малый вес и размеры. Изготавливаются крутоизогнутые отводы с диаметрами от 40 до 600 мм с углами 90°, 60° и 45°.

От марки сталей, и типа труб зависит область применения крутоизогнутых отводов.

Изготовление гнутых отводов осуществляют из электросварных или бесшовных труб операцией сгибания на специализированных трубогибочных станках. Использование гнутых отводов ограничивается в случаях, если нет возможности использовать крутоизогнутые отводы, также при наличии требований к радиусу кривизны, большему указанных в государственных стандартах.



Рисунок 1.8 – Общий вид отводов для технологического трубопровода

Основной функцией фланца является операция соединения труб и других деталей технологического трубопровода. Стандартная компоновка фланцевого соединения включает в себя два фланца, уплотнительное кольцо, прокладку, соединительные гайки и болтовые крепления. Применение фланцев в строительстве технологических трубопроводов ограничивают типами: литые, свободные, резьбовые и приварные. Стоимость изготовления фланца, сложность при монтаже и сборке, также

невысокий показатель надежности при эксплуатации при наличии постоянного изменения значений рабочих температур транспортируемого продукта и рабочего давления технологического трубопровода являются главными недостатками соединения фланцевого типа.

Удобство применения фланцевых соединений оправдано в случаях, наличия необходимости постоянного выполнения операций разборки и присоединения арматуры, поэтому их используют, когда по условиям технологического проекта обслуживающая трубопровод организация выполняет регламентные работы по очистке, промывке от загрязнений, также монтаже технологических трубопроводов в работающих с огнеопасными или взрывоопасными веществами, где по технике пожарной безопасности запрещены сварочные работы. На рисунках 1.9 и 1.10 показаны фланцы применяемые при строительстве технологических трубопроводов.



Рисунок 1.9 – Общий вид фланца для соединения технологических трубопроводов





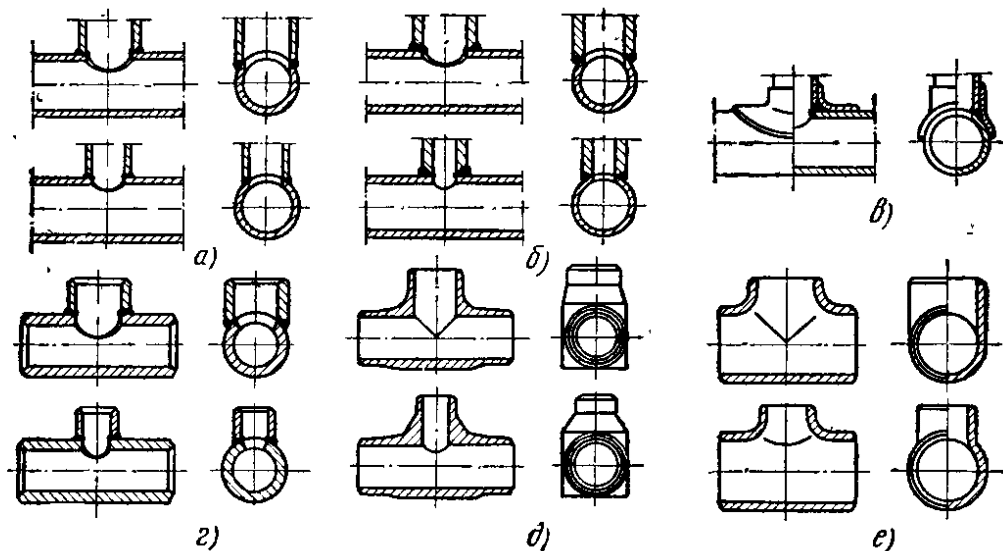
Рисунок 1.10 – Общий вид фланцевого соединения технологического трубопровода

Большое промышленное применение при изготовлении и монтаже технологических трубопроводов нашли соединения тройникового типа, основной функцией которых является получение разветвления труб.



Рисунок 1.11 – Общий вид тройника технологического трубопровода

В нормативно технической документации, также в государственных стандартах различают равнопроходные тройниковые соединения и переходные.



а – соединение врезкой без укрепляющих элементов; б – соединение врезкой с усиленным штуцером; в – соединение врезкой с укрепляющей седловиной; г – тройник сварной; д – тройник кованый; е – тройник штампованный из труб

Рисунок 1.12 – Конструкции равнопроходных и переходных тройниковых соединений и тройников для технологических трубопроводов

Основным назначением переходов является изменение диаметра технологического трубопровода. По технологии изготовления переходы разделяют на сварные вальцованные, сварные, штампованные и лепестковые. Конструктивно переходы разделяются на концентрические и эксцентрические.

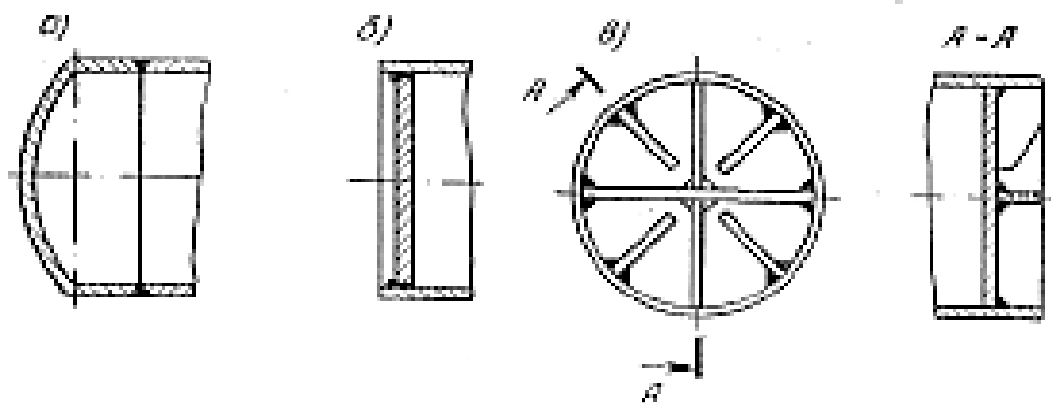
При строительстве вертикальных технологических трубопроводов используются концентрические переходы. Служат для изменения диаметра трубопровода не по центральной оси. Эксцентрические переходы применяются для строительства горизонтально направленных трубопроводов. Основное отличие от эксцентрических переходов

заключается в изменении диаметра осуществляемом по центральной оси трубопровода.

Технологический процесс изготовления переходов без сварных швов заключается в операции обжима и раздачи стальных листов. Возможен вариант изготовления с помощью штампования с операцией пробивки сквозного отверстия и последующей отбортовки.

Также переходы изготавливают с помощью соединения сваркой стальных листов лепестковым методом.

В зависимости от требований технологического проекта существуют плоские, плоские ребристые и эллиптические заглушки. Процесс изготовления эллиптических заглушек включает в себя горячее вытягивание стальных листов. Плоские и плоские ребристые получают с помощью операций вырезки и сварки, заранее заготовленных изделий из конструкционной стали на месте монтажа трубопровода.



а – эллиптическая заглушка; б – плоская заглушка; в – ребристая заглушка

Рисунок 1.13 – Внешний вид и разновидности заглушек применяемых в строительстве технического трубопровода

## 1.2 Обзор способов сварки технологического трубопровода

### 1.2.1 Технология газовой сварки

Основное применение газовой сварки в строительстве технологических трубопроводов ограничивается соединением тонкостенных труб из низкоуглеродистой стали значением условного прохода до 80 мм. Снижение механических свойств полученных газовой сваркой соединений ограничивает область применения способа. Пластические свойства наплавленного газовой сваркой металла в исходном состоянии значительно ниже, чем у основного металла.

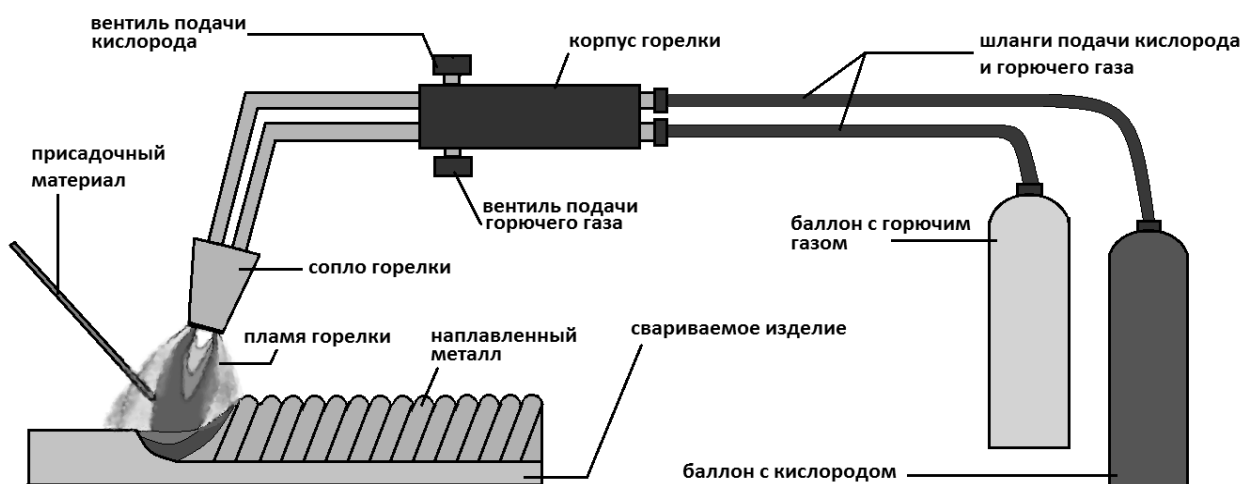


Рисунок 1.14 – Схема выполнения газовой сварки

Технология газовой сварки заключается в оплавлении с помощью нагрева газокислородным пламенем основного металла и заполнении зазора между свариваемыми деталями присадочным материалом. Ширина расплавления с помощью газового пламени приблизительно в 2 – 3 раза превышает глубину проплавления. Избыток расплавленного металла затрудняет проплавление на глубину около 5 мм, вследствие чего на свариваемых деталях необходима тщательная подготовка кромок.

## 1.2.2 Ручная дуговая сварка

Применение способа ручной дуговой сварки покрытыми металлическими электродами является одним из часто используемых в строительстве технологических трубопроводов. Отличается данный способ более высоким показателем производительности в сравнении с газовой сваркой. Главным достоинством способа является возможность выполнения работ в монтажных условиях.

Сущность способа ручной дуговой сварки покрытым электродом заключается в расплавлении кромок основного металла, стержня и покрытия электрода за счет выделения тепла электрической дуги возникающей между изделием и металлическим электродом. Расплавленный электродный металл заполняет зазор между стыкуемыми кромками свариваемых деталей, образуя неразъемное сварное соединение. Покрытие электрода представляет собой сложную смесь обеспечивающую защиту расплавленного металла от атмосферы с помощью компонентов обеспечивающих газовую и шлаковую защиту, легирование и раскисление наплавленного металла, а также дополнительную ионизацию, выполняющую роль стабилизатора сварочной дуги.

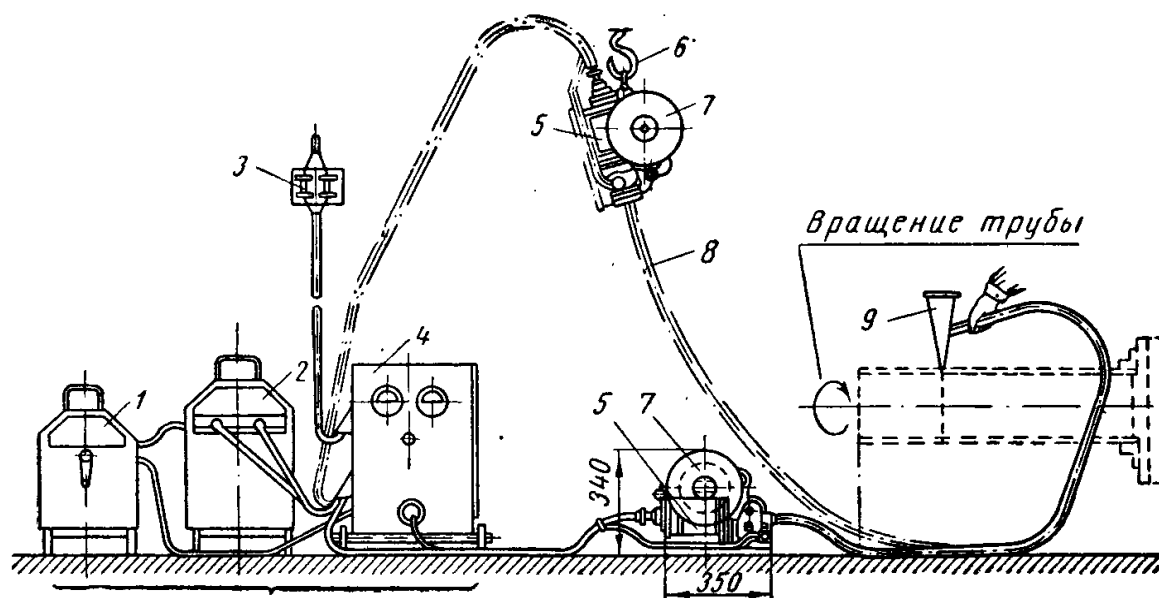
## 1.2.3 Автоматическая и полуавтоматическая сварка под флюсом

Способ автоматической и механизированной сварки под слоем защитного флюса относят к высокопроизводительным при соединении стыков технологических трубопроводов. Основная идея сварки под флюсом заключается в ведении электрической дуги под слоем защитного порошка, который расплавляясь, защищает застывающий металл от воздействия атмосферы.

Сварку под флюсом осуществляют с помощью сварочной головки. Полуавтоматическая сварка отличается от автоматической тем, что сварочную головку перемещают вдоль шва вручную.

Специализированное оборудование позволяет осуществлять сварку под слоем флюса как автоматически, так и с помощью ручного перемещения горелки.

Большое внимание уделяется подготовке и контролю качества кромок свариваемых стенок технологического трубопровода. Увеличенная плотность тока позволяет получить большое значение глубины проплавления, что положительно сказывается на производительности процесса сварки.



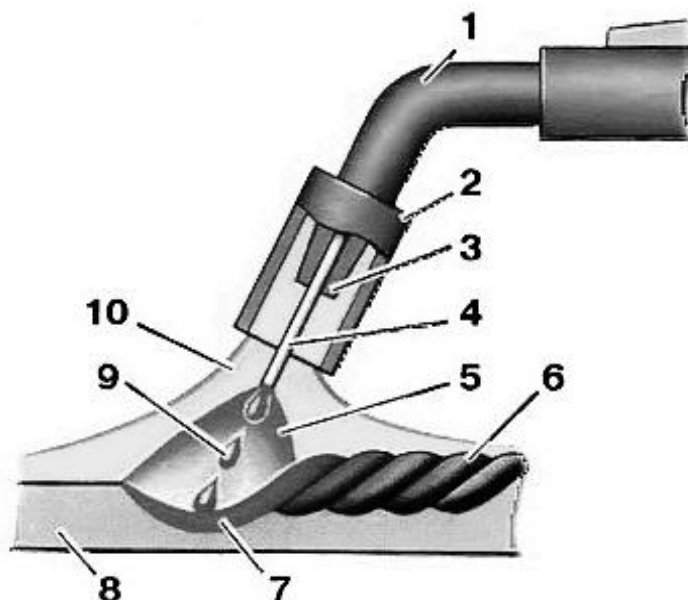
1 – дроссель; 2 – источник питания; 3 – защитная шторка; 4 – шкаф с оборудованием; 5 – механизм подачи проволоки полуавтомата; 6 – подвесной механизм; 7 – бухты с проволокой, 8 – специальная трубка для подачи проволоки; 9 - держатель

Рисунок 1.15 – Общий вид сварки под флюсом технологического трубопровода

#### 1.2.4 Автоматическая и полуавтоматическая сварка в среде защитных инертных газов

Защита электрической сварочной дуги от вредного воздействия содержащихся в атмосфере кислорода и азота обеспечивается с помощью применения обдува электрической сварочной дуги газом.

Использование защитных газов позволяет получить качественную защиту от окисления металла, без применения специальных флюсов, которые значительно удорожают процесс сварки, так же широкие возможности автоматизации и механизации являются основными достоинствами применения способа сварки в среде защитных газов.



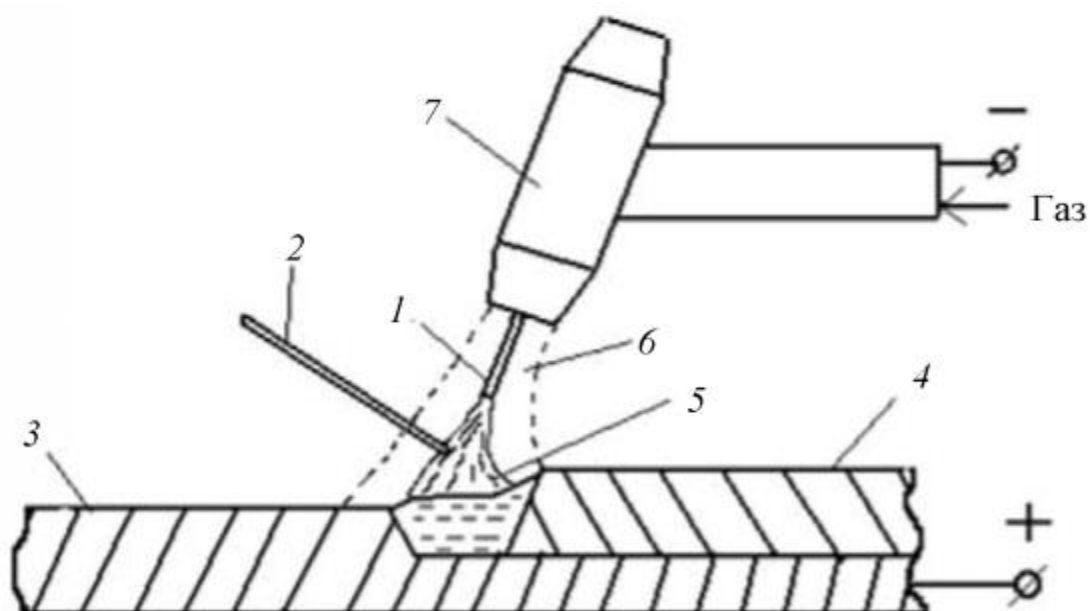
1 – приспособление для горения дуги; 2 – держатель электрода; 3 – токопроводящий наконечник; 4 – сварочная проволока; 5 – электрическая дуга; 6 – сварочный шов; 7 – расплавленный дугой металл; 8 – основной металл; 9 – капли электродного металла; 10 – газовая защита.

Рисунок 1.16 – Общий вид сварки плавящимся электродом в среде защитного газа

К недостаткам сварки в защитных газах следует отнести осложнения при проведении сварки на открытом воздухе, особенно в ветреную погоду из-за возможности отдува защитного газа струей воздуха, а также больше выделения вредного газа на рабочем месте сварщика.

Значительное влияние погодных условий затрудняет применение способа автоматической и механизированной сварки в среде защитных газов вне помещений.

Защитные газы подразделяются на инертные, такие как аргон и гелий, и активные газы – азот, углекислый газ и т.д.



1 – электрод; 2 – присадочная проволока; 3 – изделие; 4 – сварной шов; 5 – дуга; 6 – поток защитного газа; 7 – горелка

Рисунок 1.17 – Схема процесса дуговой сварки неплавящимся электродом в среде защитного газа

Вести процесс сварки в среде защитных газов можно с применением неплавящегося вольфрамового электрода, в таком случае горение электрической дуги не будет осуществлять расплавление электрода.



Источниками питания постоянного тока служат стандартные сварочные генераторы с падающей внешней характеристикой.

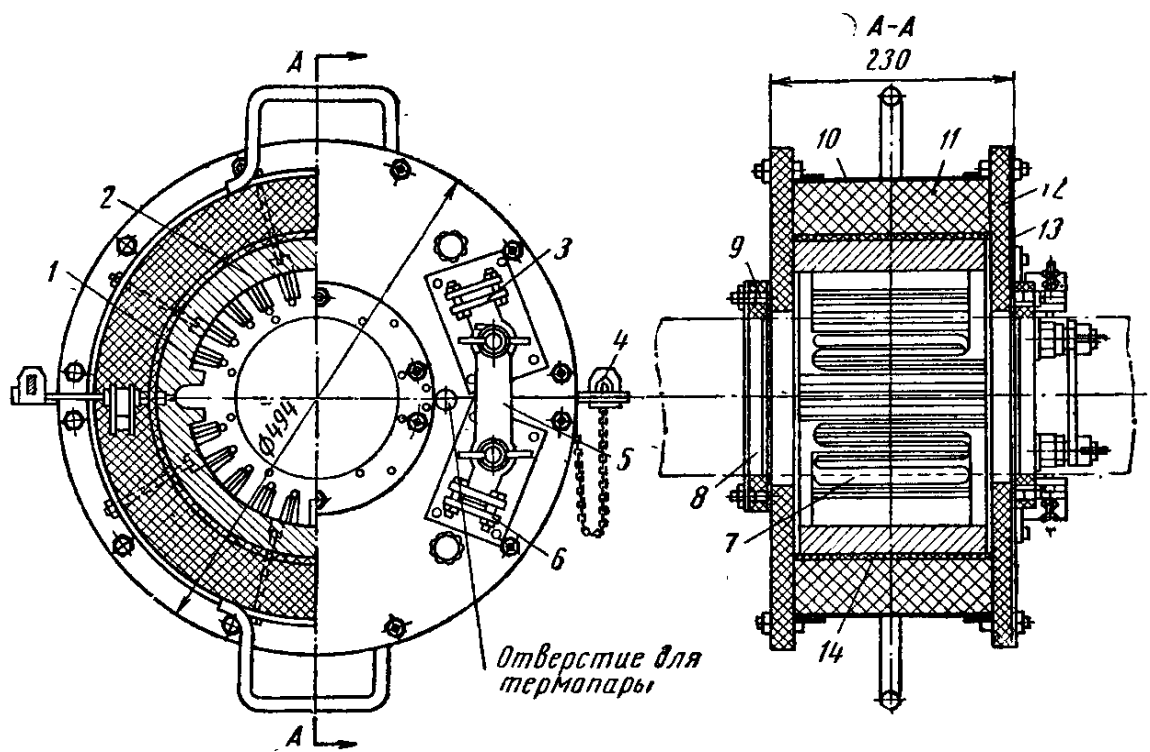
Для сварки труб в среде углекислого газа плавящимся электродом применяют малоуглеродистую проволоку с повышенным содержанием марганца и кремния марок СВ-08ГС и СВ-08Г2С. Устойчивость процесса возможна только при использовании специальных сварочных генераторов с жесткой или возрастающей внешней характеристикой, а также выпрямителей.

### 1.3 Способы термообработки сварных соединений технологических трубопроводов

Воздействие повышенных температур приводит к изменениям структуры металла сварных соединений. Отрицательное влияние термических деформаций на показатели механических свойств требуют проведения дополнительных операций термической обработки. При наличии возможности термообработку полученных трубопроводов проводят в специализированных цехах оборудованных печами больших размеров.

В монтажных условиях для термообработки сварных соединений труб применяют муфельные мечи сопротивления, газовые кольцевые горелки и индукционные нагреватели.

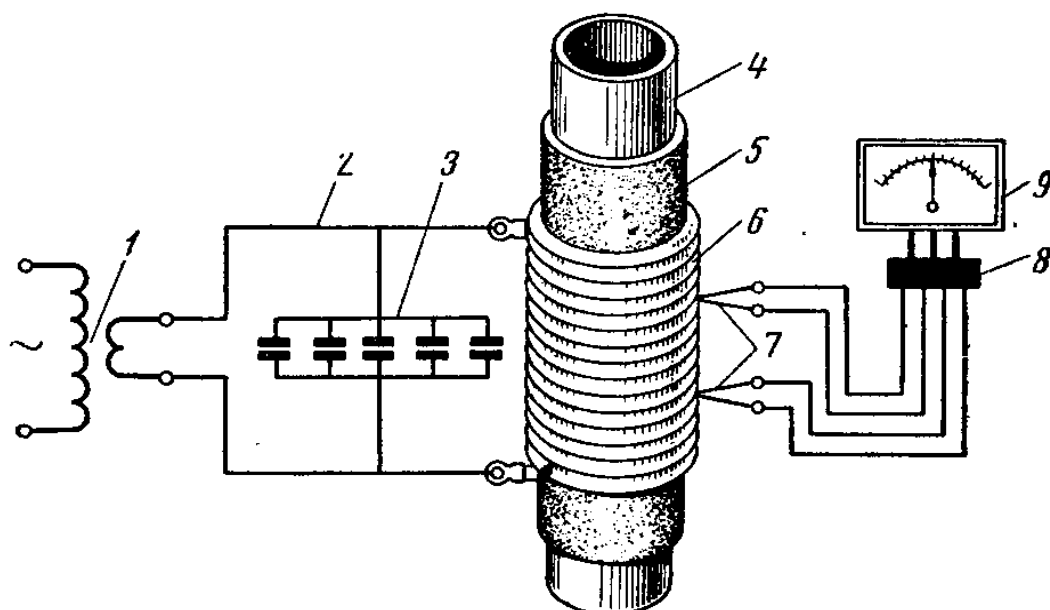
Основная область применения муфельных печей сопротивления ограничивается сварными соединениями труб диаметрами от 30 до 325 мм.



1 – шплинты; 2 – керамические подкладки; 3, 6 – ключи, 4 – замок; 5 – специальный контакт; 7 – нихромовая лента; 8 – приспособления для установки; 9 – шпильки; 10 – корпус; 11, 12 – материал теплоизоляции; 13 – защитная шторка; 14 – асбестовый лист

Рисунок 1.18 – Схема муфельной печи сопротивления

Способ термической обработки с помощью индукционного нагрева с использованием токов промышленной частоты применяют для труб большого диаметра. Технологическая операция сборки включает в себя обертывание асбестом стыка трубопровода и укладка порядка 30 витков открытого медного провода с большим сечением. Плотная намотка провода обеспечивает большую зону термического влияния на подвергаемый термообработке металл.



1 – источник питания, 2 – медный провод, 3 – конденсатор, 4 – сварочный стык, 5 – слой асбеста, 6 – нагревающие витки, 7 – термопары, 8 – реле переключения, 9 – регистрирующий прибор

Рисунок 1.19 – Схема термообработки сварных стыков труб индукционным способом нагрева токами промышленной частоты

Таким образом, обзор рекомендованных нормативными документами способов сварки показал среди перечисленных способов сварка трехфазной дугой неплавящимися электродами отсутствует. Однако известно, что этот способ обладает высокой производительностью и высокой проплавляющей способностью при несимметричном включении обмоток трансформатора. Поэтому в магистерской работе исследуется сварка трехфазной дугой неплавящимися электродами в защитной среде аргона сталей. В связи с этим необходимо решить следующие задачи.

1. Исследовать особенности 3-х фазной сварочной дуги при сварке неплавящимися электродами низкоуглеродистых сталей.
2. Разработать методику проведения эксперимента сварки неплавящимися электродами низкоуглеродистых сталей.
3. Провести металлографические исследования полученных сварных соединений.

4. Разработать проект технологии сварки технологического трубопровода используя способ сварки трехфазной дугой неплавящимися электродами в среде защитного газа аргон.

## Глава 2. Особенности 3-х фазной дуги

### 2.1 Обобщенное представление о горении 3-фазной сварочной дуги

3-фазная дуга представляет собой факел, в котором горят три отдельные дуги переменного тока со сдвигом по фазе. Этот сдвиг является необходимым условием существования непрерывного 3-фазного дугового разряда. Существует несколько схем исполнения 3-фазной дуги, но для сварки наиболее часто применяется такая, когда две фазы подключены к электродам, а третья – к свариваемой детали. В этом случае 3-фазная дуга образует две зависимых дуги (электрод - деталь: W-Сталь) и одну независимую между неплавящимися электродами (электрод - электрод: W-W). Горение зависимых дуг происходит подобно горению однофазной дуги переменного тока. Форма и размеры межэлектродной дуги в основном определяются силой тока, расстоянием и углом между электродами.

Существование в факеле в каждый отдельный момент времени не менее двух дуг зависимой W-Сталь и независимой W-W или двух зависимых W-Сталь и W-Сталь, мощности которых регулируются при различном соотношении между ними, обеспечивая высокую устойчивость этой системы в пространстве и во времени.

Экспериментальное и теоретическое исследование сварочной дуги – одно из важнейших направлений в области сварки. Изучение различных характеристик дугового разряда и поведения дуги в различных условиях позволяет более рационально осуществлять процесс сварки и проектировать источники питания и средства управления.

Для создания условий устойчивости системы «источник питания – дуга» и стабильного повторного возбуждения дуги при питании ее переменным током необходимо знать энергетические параметры, характер изменения тока и напряжения во времени, проводимости и сопротивления дуги, статические, динамические характеристики и электрическую мощность сварочной дуги.

В литературе подобные вопросы достаточно подробно изучены и рассмотрены для однофазной дуги при сварке неплавящимся угольным электродом сталей (С-Fe) в защитной среде газа и на воздухе, вольфрамовым электродом алюминиевых сплавов (W-Al) в аргоне и в гелии, покрытыми электродами, медным электродом медных сплавов (Cu-Cu) на воздухе, стальным электродом сталей (Ст-Ст) под слоем флюса. Представленная в перечисленных работах теория горения однофазных дуг переменного тока объясняет отдельные моменты горения или какое-то одно или несколько свойств дуги для различных материалов электродов и защитных сред.

Электрическая дуга переменного тока – явление сложное. Она имеет начальный период зажигания, затем горение и период угасания, каждому из этих явлений посвящены работы по изучению зажигания при смене полярности, горению дуги с вольфрамовым электродом на алюминиевых сплавах в среде аргона, в гелии, в смеси аргона и гелия.

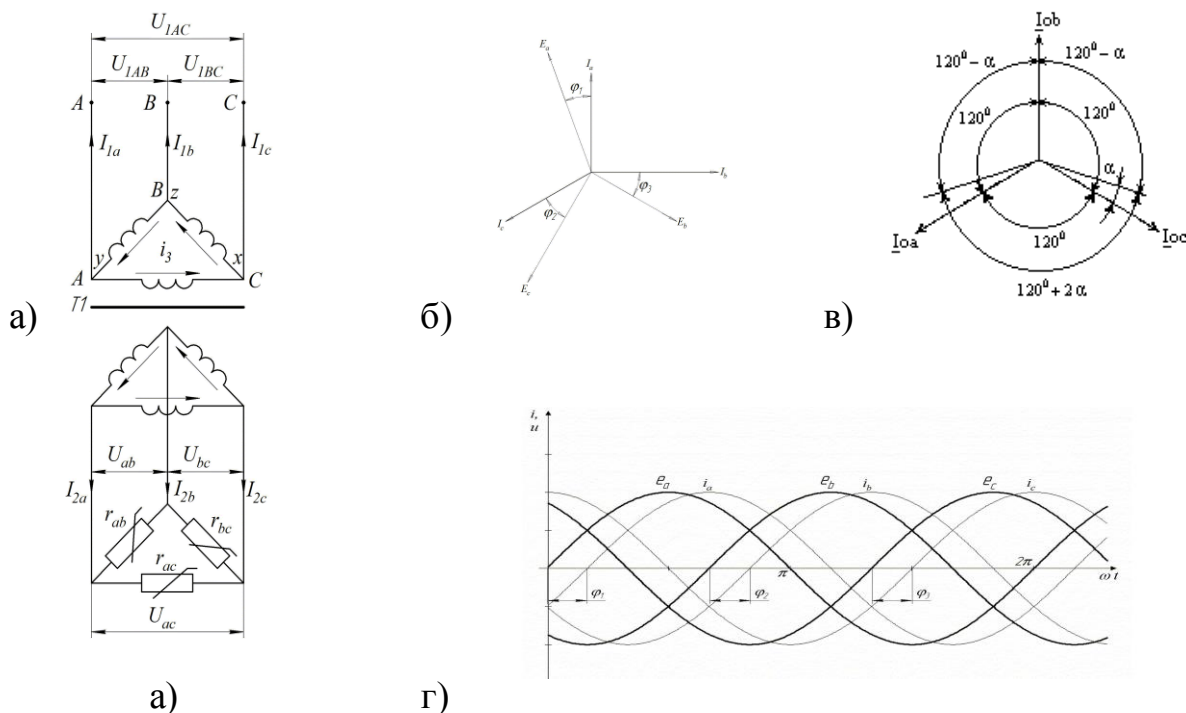
## 2.2 Особенности 3-фазной симметричной сварочной дуги с $K_t = 1,0$

Проблема стабильности 3-фазной дуги решена путем применения неплавящихся вольфрамовых электродов, образующих устойчивую в пространстве и времени систему электрод-деталь. 3-фазная дуга – это короткая дуга, у которой длина разрядных промежутков и поперечные размеры дуг – величины одного порядка, измеряющиеся несколькими миллиметрами. 3-фазная сварочная дуга горит непрерывно, устойчиво, длительно без обрывов при переходе через нуль. Характер горения дуг в значительной степени зависит от схемы ее питания, материала электродов и отношения тока в изделии  $I_{изд}$  к току в электроде  $I_w$ , которое обозначим коэффициентом  $K_t = I_{изд} / I_w$ .

Рассмотрим условия работы 3-фазной дуги, когда два неплавящихся электрода из сплава вольфрама, третий – Ст. Дуги горят свободно. Для питания 3-фазной дуги использованы специальные источники питания с симметричной схемой включения обмоток трансформатора

треугольник/треугольник при условии, что мгновенные значения тока в линиях равны между собой  $i_a = i_b = i_c$ , равны и мгновенные значения фазных токов  $i_{ax} = i_{by} = i_{cz}$ , тогда для схемы, показанной на рисунке 2.1 а, имеем:

$$i_a = i_{ax} - i_{bx}; \quad i_b = i_{by} - i_{cz}; \quad i_c = i_{cz} - i_{ax}. \quad (2.1)$$



источника питания 3-фазной дуги (а); диаграммы токов и ЭДС (б, в) и осциллограммы линейных токов и ЭДС (г)

Рисунок 2.1 - Симметричная схема соединения обмоток трансформатора

Соответствующая векторная диаграмма для первой гармонической токов изображена на рисунке 2.1б. Вектор линейного тока опережает вектор фазного тока на угол  $30^\circ$ , при этом  $I_{л1} = I_{\phi 1} \sqrt{3}$ .

Фазные напряжения в симметричной схеме питания дуги, где обмотки соединены треугольником, в режиме холостого хода равны между собой:

$$\left. \begin{aligned} U_{ав\ xx} &= U_{max} \sin \omega t, \\ U_{ac\ xx} &= U_{max} \sin(\omega t - 120^\circ) \\ U_{bc\ xx} &= U_{max} \sin(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Активные и реактивные сопротивления обмоток трансформатора в источнике питания 3-фазной дуги в каждой фазе одинаковы:  $R_{ав} = R_{bc} = R_{ac}$ ,  $X_{ав} = X_{bc} = X_{ac}$ . Линейные токи при такой схеме питания и наличии индуктивного сопротивления сдвинуты на угол  $\varphi$ ,  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3$  (рисунок 4.2в). Несимметрией, вносимой магнитной системой, пренебрегаем. Тогда линейные токи

$$\left. \begin{aligned} i_a &= I_{max} \sin(\omega t - \varphi), \\ i_b &= I_{max} \sin(\omega t - (\varphi + 120^\circ)) \\ i_c &= I_{max} \sin(\omega t - (\varphi + 240^\circ)) \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

Эту систему можно использовать при сварке плавящимися электродами 3-фазной дугой, где форма и размеры трехфазного факела могут меняться в широких пределах, изменяя его технологические и энергетические характеристики.

Использование симметричной схемы питания 3-фазной дуги с неплавящимися электродами позволило установить, что в каждый отдельный момент времени горит не менее двух дуг вольфрам-сталь (W-Ст) и вольфрам-вольфрам (W-W) или вольфрам-сталь (W-Ст) и вольфрам-сталь (W-Ст), которые обеспечивают высокую устойчивость этой системы в пространстве и во времени. Ограничение на систему токов: сумма мгновенных значений токов в 3-фазной дуге должна быть равна нулю в каждый момент времени:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2.4)$$



Зависимость  $u_d(t)$  в режиме нагрузки, т. е. при горении дуги, с допущением можно считать прямоугольной по форме.

Доступные для измерения линейные токи и фазные напряжения позволяют определить область «жизни» статической вольт-амперной характеристики дуги. Характер этой зависимости приведен на рисунке 2.2.

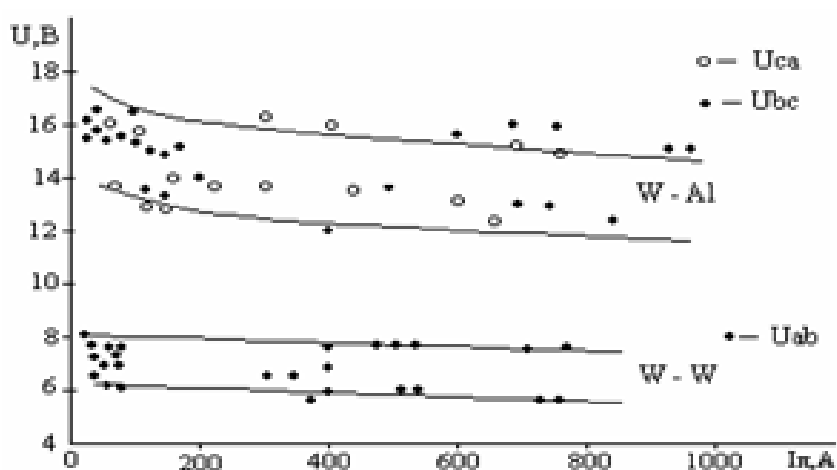


Рисунок 2.2 - Статические вольт-амперные характеристики 3-фазной дуги

Величина напряжения фазных дуг вольфрам – сталь в аргоне лежит в области от 12,5 до 17,0 В в диапазоне линейных токов от 75 до 500 А, напряжение фазной дуги вольфрам - вольфрам в аргоне составляет (5,5...8,0) В. Статические вольт-амперные характеристики 3-фазной дуги сняты при синусоидальной форме тока.

Можно предположить, что система «источник питания - дуга» для 3-фазного факела будет устойчива при падающей внешней вольт-амперной характеристике источника питания (рисунок 4.5). Вместе с тем, следует определить значение каждой фазной дуги в формировании факела.

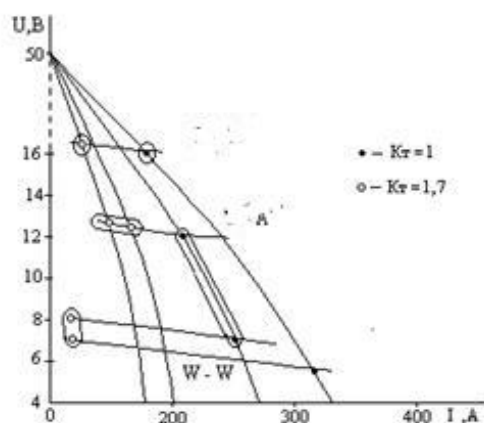
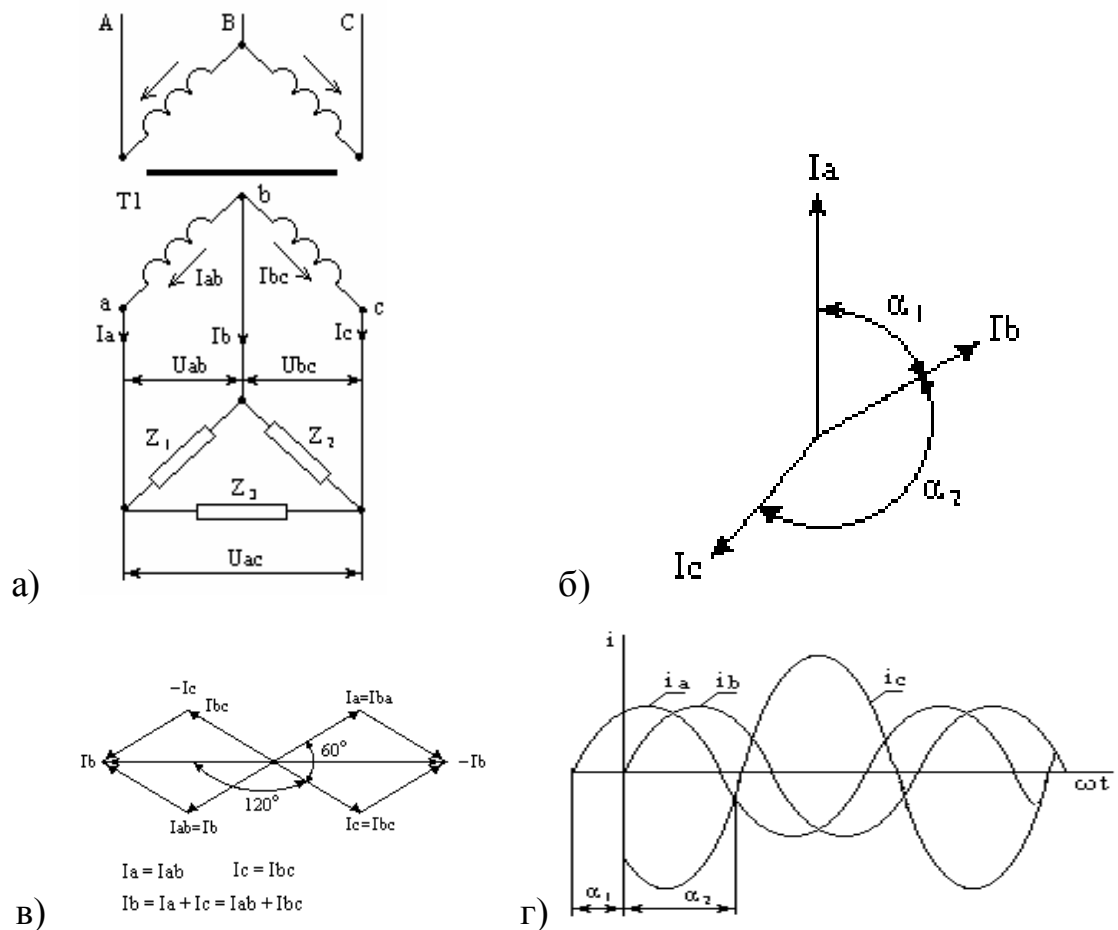


Рисунок 2.3 - Система «источник питания - 3-фазная дуга»

2.3 Внутренний механизм и закономерности горения элементарных дуг в факеле 3-фазной сварочной дуги с  $K_T = 1,73$  при несимметричной схеме питания

Устойчивость трехфазной дуги при сварке неплавящимися электродами в защитном газе выше, чем однофазной. На основании экспериментальных данных установлены необходимые условия устойчивого дугового разряда при сварке 3-фазной дугой - это области углов сдвига линейных токов между фазами А и В и фазами В и С, которые находятся в диапазоне:  $\alpha_{ав} = 60...120^\circ$ ,  $\alpha_{вс} = 120...150^\circ$  при условии, что линейные токи синусоидальны как показано на рисунке 2.4.



питания 3-фазной дуги (а); векторные диаграммы (б, в) и динамические характеристики линейных токов (г)

Рисунок 2.4 - Несимметричная схема включения обмоток источника

Величина  $K_T = I_{изд}/I_w$  определяет длительность горения дуг в факеле. Максимальной величины мощность фазной дуги достигает при  $K_T = 1,73$ . По данным авторов возрастает эффективный и термический КПД 3-фазной дуги. Поэтому несимметричной схеме включения обмоток трансформатора с  $K_T = 1,73$  отдается предпочтение.

Исследование энергетических характеристик 3-фазной дуги на реальных дугах, позволили выявить закономерности изменения фазных токов во времени  $i_\phi(t)$  при несимметричной схеме питания.

При синусоидальном изменении линейных токов в электродах и детали при сварке 3-фазной несимметричной дугой запишем:

$$\left. \begin{aligned} I_a &= I_a \max \sin \omega t, \\ I_b &= I_b \max \sin (\omega t - \psi_{ab}) \\ I_c &= I_c \max \sin (\omega t - \psi_{ac}) \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

Осуществив разложение периодических функций  $i_{ab}(t)$ ,  $i_{bc}(t)$ ,  $i_{ac}(t)$  с периодом  $2\pi$  в ряд Фурье, можно найти выражения для определения мгновенных значений тока в интервале разложения. При синусоидальном изменении линейных токов в электродах и детали находим, что фазные токи имеют прерывистый характер, но описываются также синусоидальным законом. Графо-аналитический метод позволяет определить действующие значения фазных токов 3-фазного факела для синусоидальной и искаженной формы линейных токов сварочной цепи из выражения (2.6), в котором интеграл заменен суммой интегралов от каждого участка

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{max}^2 \sin^2 \omega t dt} \quad (2.6)$$

Несимметричная схема питания с коэффициентом  $K_T = 1,5 \dots 1,73$  увеличивает проплавляющую способность дуги, сохраняя стабильность процесса без дополнительных источников энергии. Определение фазных токов в 3-фазной несимметричной дуге по известным линейным токам позволяет построить вид зависимостей фазных токов во времени  $i_{ab}(t)$ ,  $i_{bc}(t)$ ,  $i_{ac}(t)$ . Полученные зависимости фазных токов позволяют определить схему горения дуг, из которой следует, что при питании 3-фазной дуги по схеме открытого треугольника, в каждый момент времени горят не более двух фазных дуг. Осциллограмма линейных токов при  $K_T = 1,7$  перенесена на рисунок 2.5. В каждой из обозначенных точек определены фазные токи согласно закону Кирхгофа для электрической цепи при следующих условиях:

- в каждый момент времени горит две дуги;

- на одном электроде не может одновременно существовать катодное и анодное пятна;
- элементарные дуги W-W и W-Ст горят прерывисто в течении времени  $\Delta t$  и в определенной последовательности как показано на рисунке 2.5д.

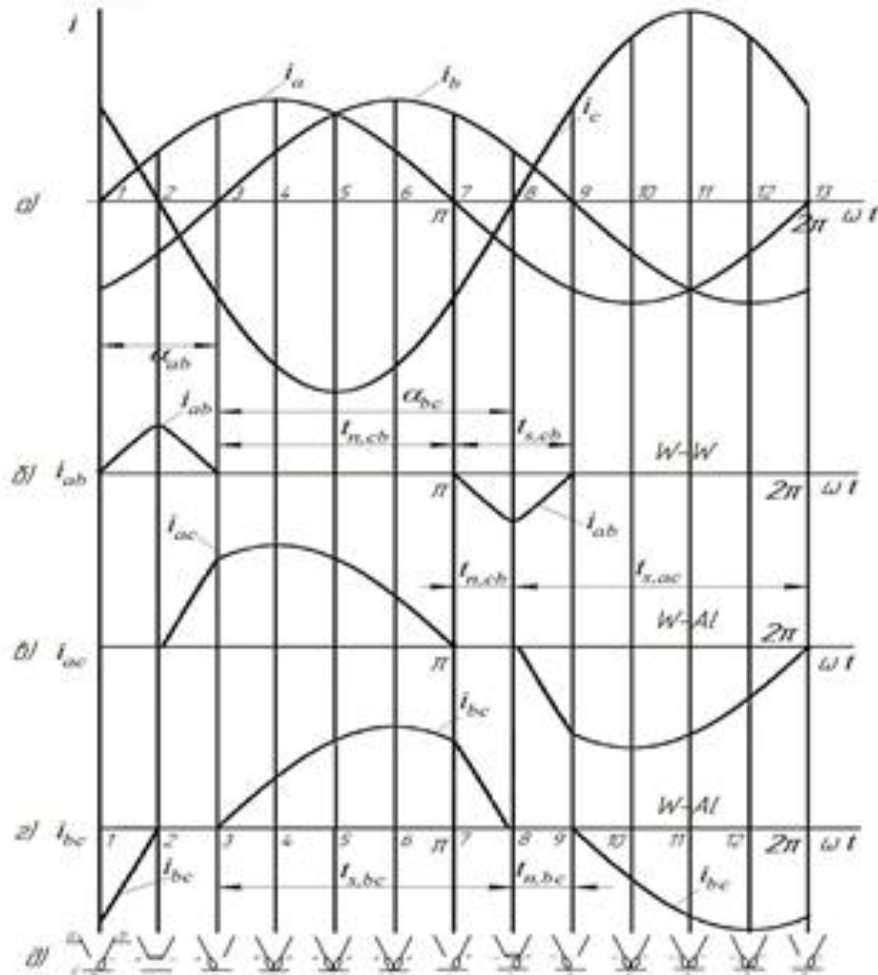


Рисунок 2.5 - Осциллограмма линейных токов 3-фазной дуги с  $K_r = 1,73$  и  $K_a = 1,41$  (а), фазные токи (б,в,г) и схема горения дуг (д)

Используя методику определения фазных токов, находим величину фазных токов для  $K_r = 1,73$  при изменении линейных токов от 70 до 500 А. Определив величину фазных токов, построим зависимости  $i_{ab} = f(t)$  (рисунок 2.5б),  $i_{bc} = f(t)$  (рисунок 2.5г),  $i_{ac} = f(t)$  (рисунок. 2.5в). Полученные зависимости для фазных токов 3-фазной дуги имеют прерывистый характер,

длительность горения которых составляет: для дуги W-W  $\Delta t_{w-w} = (3,0 \dots 3,5) \cdot 10^{-3} \text{с}$ , для дуги W-Ст  $\Delta t_{w-ct} = (8,0 \dots 9,7) \cdot 10^{-3} \text{с}$ .

\* - действующие значения тока и напряжения

В результате исследований определены: характер зависимостей  $i_{ав} = f(t)$ ,  $i_{вс} = f(t)$ ,  $i_{ac} = f(t)$ , величина фазных токов зависимых и независимых дуг, соотношение между линейными и фазными токами, полярность элементарных дуг и последовательность движения их в пространстве  $i_{ав} \rightarrow i_{ac} \rightarrow i_{вс}$ ; установлено, что фазные токи каждой элементарной дуги факела 3-фазной дуги прерывисты и длительность горения между неплавящимися электродами соизмерима с длительностью работы стабилизатора дуги при сварке однофазной дугой.

## **Глава 3. Исследование формирования шва при сварке 3-х фазной дугой сталей**

### **3.1 Разработка методики проведения эксперимента**

Широко известны технологические возможности трехфазной дуги при сварке неплавящимся электродом в защитной среде аргона алюминиевых сплавов. Установлено, что при сварке неплавящимся электродом алюминиевых сплавов скорость сварки составляет 50 м/ч и более, что положительно сказывается на производительности.

На кафедре «Сварка, обработка металлов давлением и родственные процессы» д.т.н. проф. Сидоров В.П. и к.т.н., доц. Моторин К.В. проводят исследования в области сварки сталей трехфазной дугой неплавящимися электродами в среде защитного газа аргон. Полученные ими соединения, дали хорошие результаты, о которых можно судить по металлографическим исследованиям.

Учитывая возможности трехфазной дуги при сварке вольфрамовыми электродами, и результаты эксперимента по сварке точками, проведем исследования этого способа для сварки продольных швов сталей.

Исходные данные:

В таблице 3.1 указаны геометрические характеристики образцов для проведения испытаний.

Таблица 3.1 – Геометрические характеристики образцов

| Наименование параметра | Единица измерения | Величина |
|------------------------|-------------------|----------|
| Толщина пластин        | мм                | 3        |
| Длина пластин          | мм                | 120      |
| Ширина пластин         | мм                | 40       |

В таблице 3.2. представлен химический состав стали марки Ст.

Таблица 3.2 – Химический состав стали марки Ст3

| Химический элемент | Содержание, % |
|--------------------|---------------|
| Si                 | 0,15 - 0,3    |
| Mn                 | 0,4 - 0,65    |
| Ni                 | до 0,3        |
| S                  | до 0,05       |
| P                  | до 0,04       |
| Cr                 | до 0,3        |
| N                  | до 0,008      |
| Cu                 | до 0,3        |
| As                 | до 0,08       |

Таблица 3.3 – Механические свойства стали марки Ст3

| Временное сопротивление разрыву $\sigma_b$ , МПа | Относительное удлинение $\delta_5$ , % | Работа удара КСУ, кДж / м <sup>2</sup> |
|--|--|--|
| 380-490  | 25                                     | -*                                     |

\* - для толщины 3,0 – 5,0 значение ударной вязкости не нормируется.

Тип соединения: С2 (рисунок 3.1)



Рисунок 3.1 – Вид сварного соединения С2

Способ сварки: 3-х фазная дуга с неплавящимися электродами, защитная среда аргон.



Сварочное оборудование:

- а) Источник питания 3-х фазной дуги с падающей внешней ВАХ типа УДТ-151У2;
- б) Горелка для сварки 3-х фазной свободной дугой с неплавящимися электродами;
- в) Лабораторный стенд с ручным прижатием образцов,
- г) Управляемый электропривод с блоком питания постоянного тока ВСА-111.

### 3.2 Выбор сварочного оборудования, материалов и контролирующих приборов

Проведение исследовательских работ по теме ВКР предполагает разработку и организацию сварочного поста. Для этого проведем выбор сварочного оборудования и доработку его в случае необходимости.

Структурная схема поста представлена на рисунке 3.2. В состав схемы должна входить горелка для сварки свободной дугой неплавящимися электродами. В данной работе для исследований применяется горелка типа ГС-5А (разработка д.т.н. В.И. Столбова), внешний вид которой приведен на рисунке 3.3.

Техническая характеристика горелки ГС-5А приведена в таблице 3.4. Для крепления горелки на стенд производится разработка узла крепления.

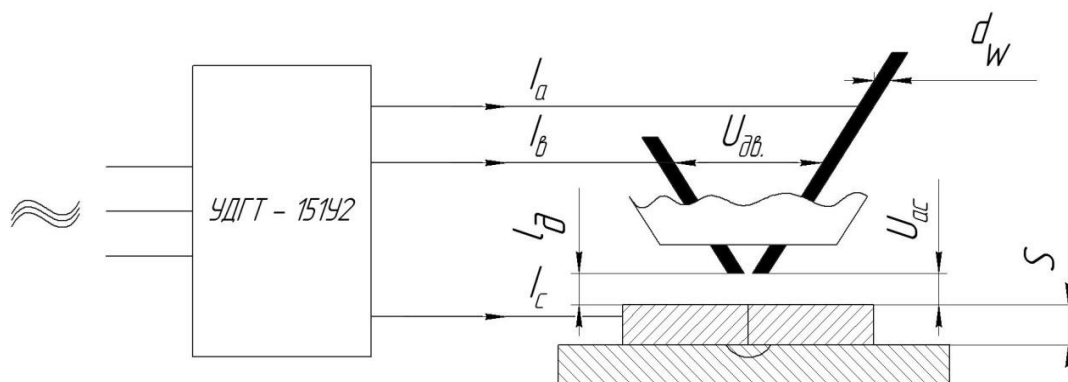


Рисунок 3.2 – Схема сварочного поста для сварки 3-х фазной свободной дугой неплавящимися электродами в среде защитного газа

Таблица 3.4 – Технические характеристики горелки для сварки неплавящимися электродами ГС-5А

| Наименование параметра          | Единица измерения | Значение   |
|---------------------------------|-------------------|------------|
| Напряжение на W- Ст в режиме XX | В                 | 65         |
| Номинальный ток в электродах    | А                 | 350        |
| Диаметр электрода               | мм                | 2-6        |
| Расстояние между W электродами  | мм                | 1,5-4      |
| Расход аргона                   | л/мин             | 15         |
| Масса горелки                   | г                 | 280        |
| Габариты                        | мм                | 60x190x180 |

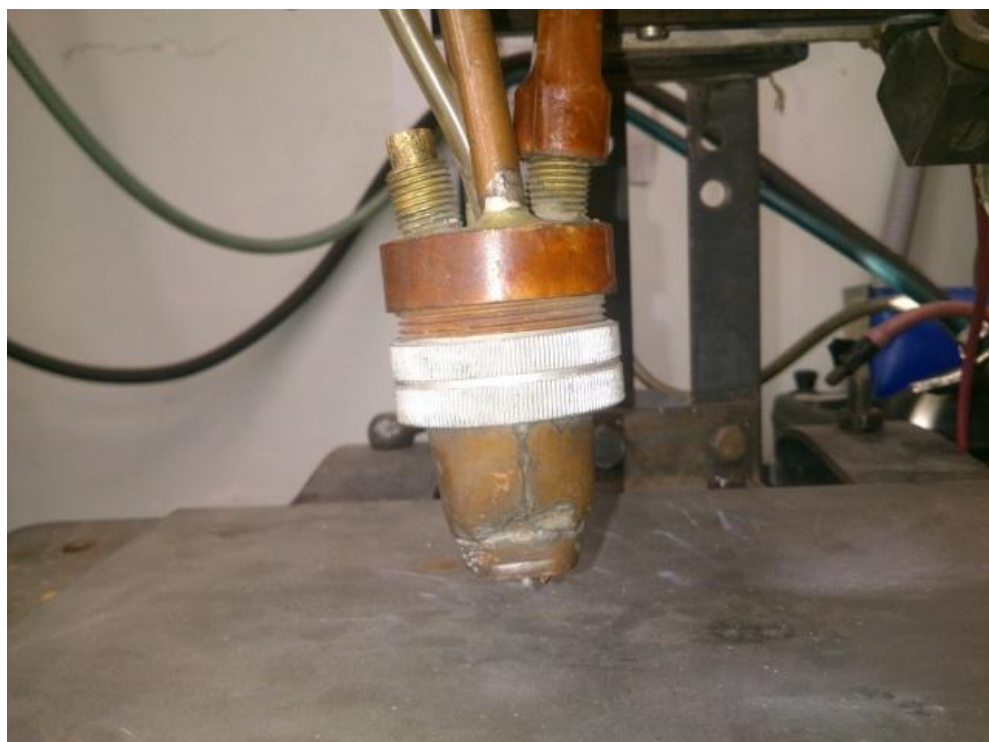


Рисунок 3.3 - Внешний вид горелки для сварки неплавящимися электродами ГС-5А

При выборе материала вольфрамового электрода был проведен анализ имеющихся на рынке неплавящихся электродов.

Электрод с содержанием не менее 99,5% чистого вольфрама. Электроды обеспечивают хорошую устойчивость дуги при сварке на переменном токе, сбалансированном или не сбалансированном с осциллятором. Эти электроды применяются для сварки на переменном синусоидальном токе легких сплавов, так как они обеспечивают хорошую устойчивость дуги в среде инертных газов. Основные свариваемые материалы: алюминий, магний и их сплавы.

Электроды с содержанием оксида циркония применяются для сварки на переменном токе, когда к чистоте сварного соединения применяются жесткие требования. Электроды обеспечивают стабильную дугу. Контактный торец электрода при сварке на переменном токе обрабатывается в форме сферы. Основные свариваемые материалы: легкие сплавы, бронза и ее сплавы, никель и его сплавы.

Электрод с добавлением оксида тория. Наиболее часто встречающиеся электроды. Торий — является радиоактивным материалом низкого уровня, таким образом, пары и пыль, образующаяся при заточке электрода, могут влиять на здоровье сварщика и безопасность окружающей среды.

Торированные электроды применяются для сварки на постоянном токе. Торированные электроды хорошо сохраняют свою форму при больших сварочных токах даже в тех случаях, когда чисто вольфрамовый электрод начинает плавиться с образованием на конце сферической поверхности.

Торированные электроды не рекомендуется использовать для сварки на переменном токе. Основные свариваемые материалы: высоколегированные стали, тугоплавкие металлы, ниобий и его сплавы.

Иттрированный вольфрамовый электрод обладает повышенной стойкостью по сравнению с другими неплавящимися электродами. Используется для сварки особо ответственных соединений на постоянном токе прямой полярности, содержание добавки оксида иттрия — 1,8-2,2%.

Иттрий положительно влияет на стабильность катодного пятна на контактном торце электрода, повышая устойчивость дуги при наличии большого диапазона рабочих токов. Основные свариваемые материалы: сварка конструкций из углеродистых, низколегированных и нержавеющей сталей, титана, меди и их сплавов на постоянном токе.

Сплав вольфрама с содержанием около 2% оксида церия повышает значение электронной эмиссии электрода. Облегчает первичное возбуждение сварочной дуги и увеличивает допустимое значение силы тока. Электроды неплавящиеся вольфрамовые с содержанием оксида церия позволяют сваривать на переменном токе и на постоянном прямой полярности.

Электроды применяются при орбитальной сварке труб, сварке трубопроводов и тонколистовой стали. При сварке этими электродами с большими значениями тока происходит концентрация оксида церия в раскаленном конце электрода. Это является недостатком цериевых электродов.

Основным недостатком вольфрамовых электродов с содержанием церия является повышенная концентрация оксида церия на контактном торце электрода при сварке повышенными значениями тока. Основные свариваемые материалы: тугоплавкие металлы, ниобий и его сплавы, медь, никель и его сплавы. Подходит для всех типов углеродистых сталей и сплавов на переменном и постоянном токе.

Электроды из сплава вольфрама с оксидом лантана имеют очень легкое первичное возбуждение дуги, повышенную устойчивость дуги, хорошим вторичным возбуждением.

Содержание 1,5% и 2,0% оксида лантана в составе электрода повышает значение максимально возможного тока. По сравнению с цериевыми и ториевыми, лантановые электроды имеют меньший износ контактного торца электрода.

Лантановые электроды более долговечны и меньше загрязняют вольфрамом сварной шов.

Оксид лантана равномерно распределен по длине электрода, что позволяет длительное время сохранять при сварке первоначальную заточку электрода. Равномерное распределение оксида лантана по длине вольфрамового электрода позволяет сохранять форму заточенного контактного торца. При сварке на переменном синусоидальном токе рабочий конец электрода должен иметь сферическую форму. Основные свариваемые материалы: высоколегированные стали, алюминий, медь, бронза, углеродистые стали.

Так как на кафедре СОМДиРП имеются только чистые вольфрамовые электроды, для проведения испытаний выбираем их.

Питание 3-х фазной дуги производим от установки типа УДГТ-151 У2, внешний вид которой приведен на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 – Внешний вид установки УДГТ-151 У2

Принципиальная схема установки состоит из понижающего трансформатора, прерывателя тока VS1 и VS2, установленного в средней фазе.

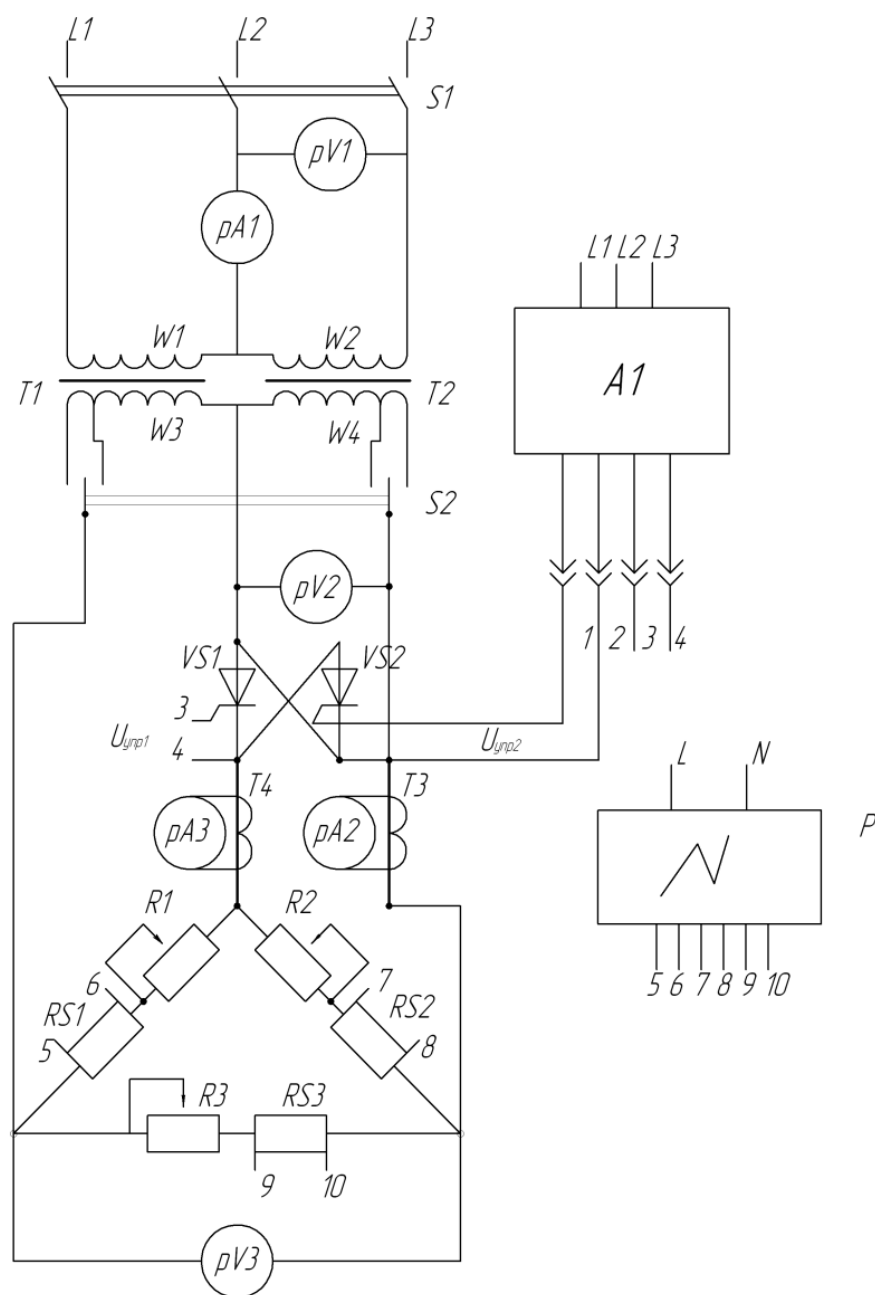


Рисунок 3.5 – Принципиальная схема установки УДГТ-151 У2

Схема установки оснащена приборами для контроля и регистрации параметров сварки. При настройке оборудования используются в качестве нагрузки активные сопротивления R1, R2, R3, включенные по схеме

треугольника. Для регистрации тока предусмотрены измерительные шунты RS1, RS2, RS3 и многоканальный осциллограф N.

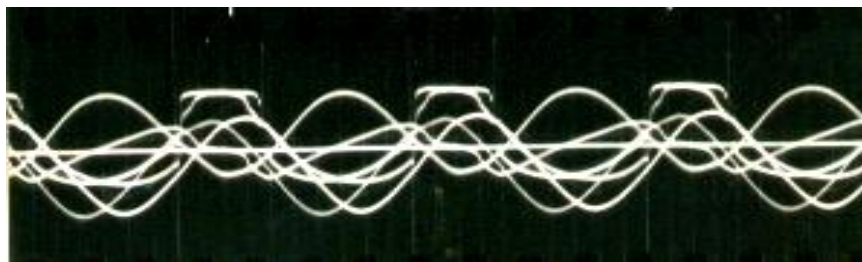


Рисунок 3.6а - Линейные токи  $i(t)$  и фазные напряжения  $u(t)$  3-фазной дуги при  $\alpha_1 = 60^\circ$ ,  $\alpha_2 = 120^\circ$  при  $K_T = I_c / I_a = 1,57$ ,  $I_a = I_b = 110$  А

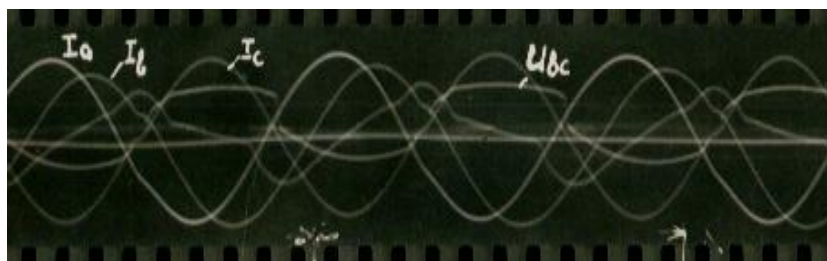


Рисунок 3.6б - Линейные токи  $i(t)$  и фазные напряжения  $u(t)$  3-фазной дуги при  $\alpha_1 = 67^\circ$ ,  $\alpha_2 = 180^\circ$  при  $K_T = I_c / I_a = 1,73$ ,  $I_a = I_b = 210$  А

При использовании несимметричной схеме включения установки УДГТ-150 У2 непосредственно на дуге регистрируем токи в фазах А и В.

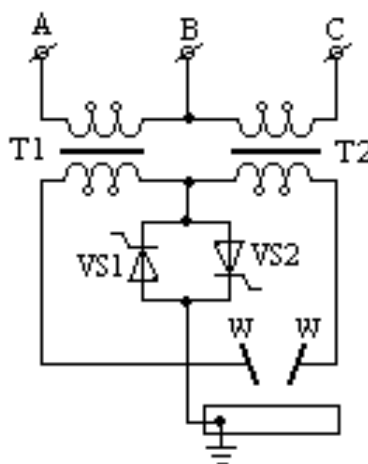


Рисунок 3.7– Схема подключения установки УДГТ-150 У2 к горелке

Технические характеристики установки типа УДГТ приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 - Технические характеристики установки типа УДГТ-151

| Наименование параметров                     | УДГТ-151 У2 |
|---|-------------|
| Напряжение сети, В                          | 220         |
| Напряжение ХХ, В                            | 70          |
| Номинальный ток в электродах, А             | 150         |
| Номинальный ток в изделии, А                | 255         |
| Диапазон регулирования тока в электродах, А | 20-150      |
| Диапазон регулирования тока в изделии, А    | 34-255      |
| КПД   | 0,53        |
| cosφ  | 0,6         |

### 3.3 Организация сварочного поста для сварки 3-х фазной дугой

Из выбранного оборудования собран лабораторный стенд и доработаны узлы крепления. На рисунке 3.8 приведен лабораторный стенд, на котором показан узел крепления горелки ГС-5А и редуктор перемещения горелки.



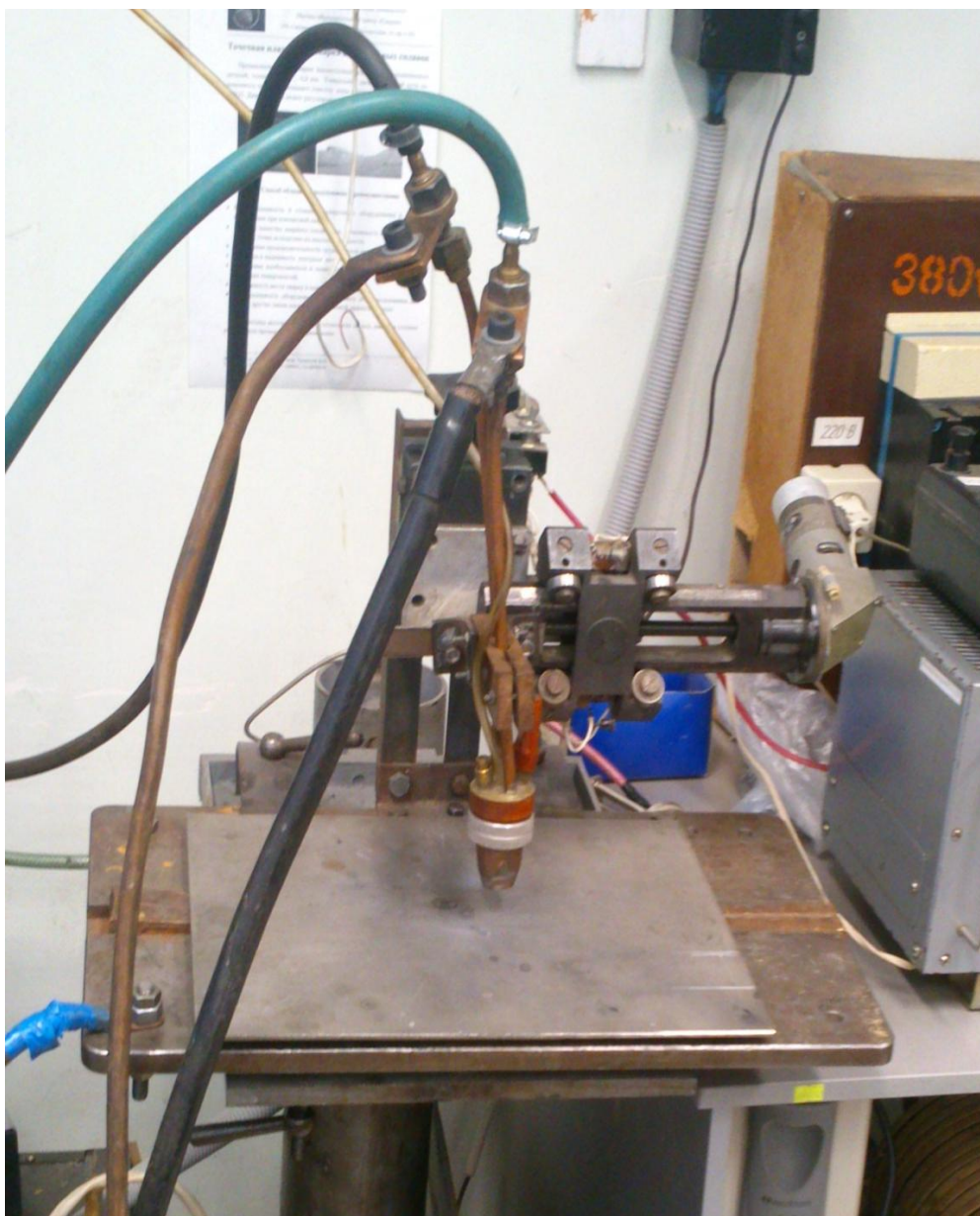


Рисунок 3.8 – Внешний вид лабораторного стенда

Для управляемого электропривода, выполненного на двигателе СД-75 используется блок питания постоянного тока ВСА-111К, который показан на рисунке 3.9. Отдельно на рисунке 3.10 приведен блок управления УДГТ – 150 У2.



1- источник питания УДГТ-150 У2, 2- блок управления ИП, 3- телескопическая стойка с плитой, 4- горелка ГС-5А, 5 – редуктор, 6- двигатель СД-75, 7 – блок питания постоянного тока ВСА-111 К

Рисунок 3.9 – Общий вид станда для исследований



Рисунок 3.10 – Блок управления УДГТ – 150 У2

### 3.4 Исследование формирования шва 3-х фазной дугой вольфрамовым электродом в среде защитного газа аргон

Исследование формирования шва проводилось на образцах толщиной 3 мм свободной трехфазной дугой неплавящимися электродами в защитной среде аргона на лабораторном стенде. Ориентировочные режимы сварки приведены в таблице:

Таблица 3.6 – Ориентировочные режимы сварки

| Наименование параметра         | Единица Измерения | Значение параметра |
|--------------------------------|-------------------|--------------------|
| Толщина металла, $S$           | мм                | 3                  |
| Ток на первом электроде, $I_a$ | А                 | 150                |
| Ток на втором электроде, $I_b$ | А                 | 160                |
| Ток на изделии, $I_c$          | А                 | 270                |
| Напряжение на дуге W-СТ, $U$   | В                 | 13                 |
| Скорость сварки, $V_{св}$      | м/ч               | 18                 |
| Расход аргона, $Q_{ар}$        | л/мин             | 7                  |
| Диаметр электрода, $d_w$       | мм                | 3                  |

Сварка производится на подкладке из стали 14X18НД для обеспечения формирования корня шва предусмотрена канавка размерами 5x2 мм на медной пластине размерами 500x35x10 мм. Установочная длина дуги составляет 3 мм. Сварка ведется в нижнем положении. Горелка устанавливается перпендикулярно плите. Начальное возбуждение дуги производится с короткого замыкания угольным электродом между двумя вольфрамовыми электродами трехфазной горелки на технологической подкладке. Защитный газ аргон подается до начала начальной ионизации дугового промежутка за 1 - 5 с. Скорость сварки регулируется управляемым приводом горелки от специального блока управления ВСА-111К.

Предварительно проверяем работоспособность собранного оборудования на наплавке. На рисунке 3.11а приведен внешний вид наплавки полученной 3-х фазной дугой неплавящимися электродами в среде аргона. Формирование хорошее. Проплавление полное показано на рисунке 3.11б. Трехфазная дуга горит устойчиво.



Рисунок 3.11 – Внешний вид образца К1

Закончив проверку лабораторного стенда, переходим к сварке стыковых соединений образцов из низкоуглеродистой стали.

Сварка производится на образцах. Для формирования корня шва используется формирующая канавка. Длина дуги выставляется равной 3 мм. Начальное возбуждение дуги производится с помощью короткого замыкания между неплавящимися вольфрамовыми электродами.

В результате экспериментов получены сварные образцы, которые приведены на рисунках 3.12-3.15.

На рисунке 3.12а приведен внешний вид сварного соединения. Шов полномерный. Однако обнаружены наплывы, которые связаны с неравномерностью перемещения горелки. На рисунке 3.12б видно формирование корня шва. Проплавление хорошее, высота корня шва составляет 0,2 мм, наблюдается смещение шва, поэтому в дальнейшем образец не рассматриваем.

а)

б)





Рисунок 3.12 – Внешний вид образца К2

Образец К3 показанный на рисунке 3.13 демонстрирует смещение горелки относительно стыка. Отклонение горелки от стыка совпало с повышением напряжения сети, что привело к прожогу. Прожог, смещение от оси шва, наплывы не позволяют рассматривать в дальнейшем этот образец.

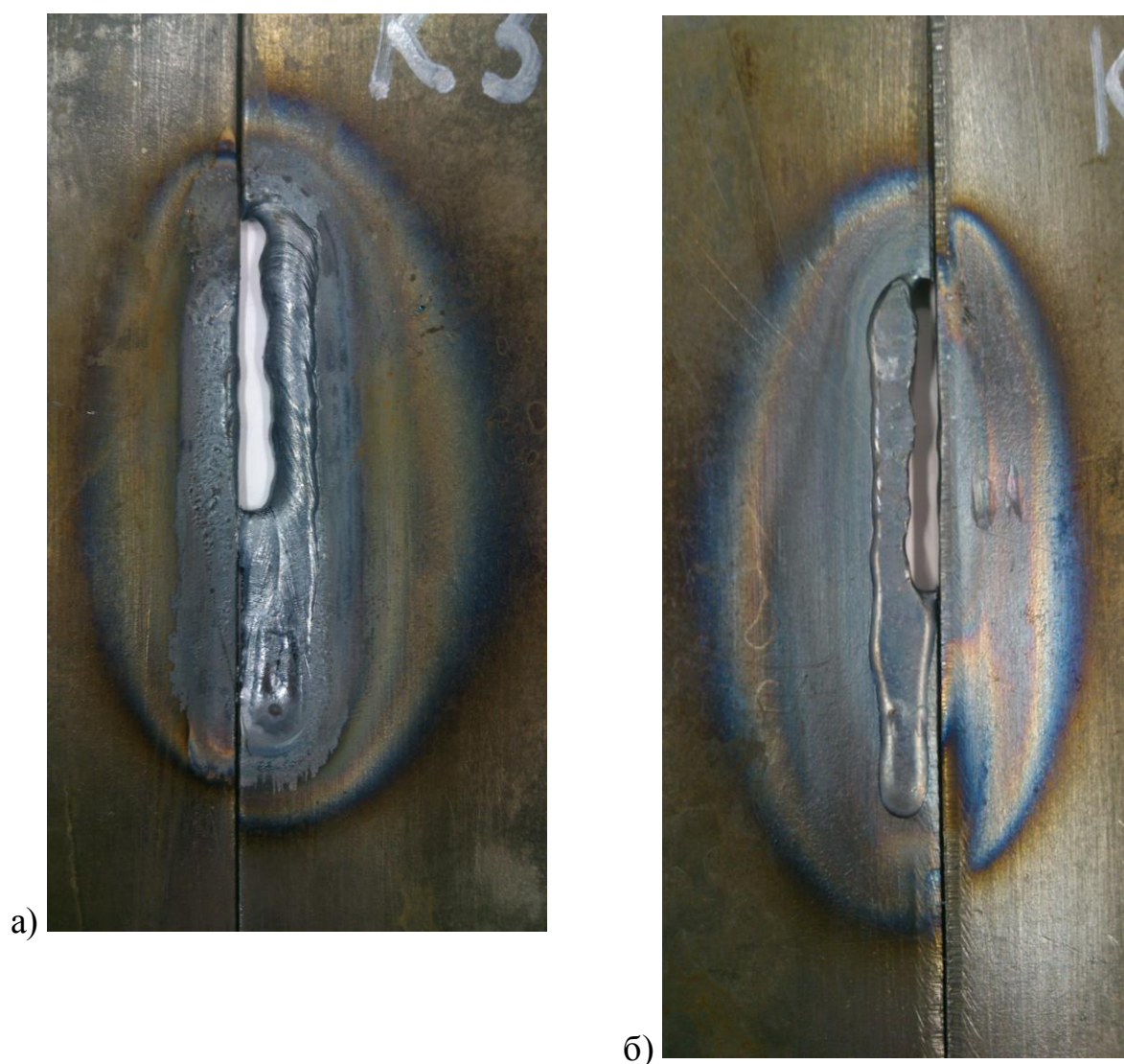


Рисунок 3.13 – Внешний вид образца К3

На рисунке 3.14а приведен внешний вид сварного соединения образца К4. Шов полномерный по всей длине, ширина шва составляет 7,1 мм,

наплывы не наблюдаются. Проплавление полное (рисунок 3.14б), усиление корня шва не более 0,5 мм. Столь малое усиление особенно важно при сварке технологических трубопроводов малого диаметра с односторонней разделкой кромок, когда невозможно производить зачистку внутри трубы. Ширина корня шва составляет 4,4 мм.





a)



### Рисунок 3.14 – Внешний вид образца К4

На рисунке 14а приведен внешний вид сварного соединения образца К5. Шов полномерный, ширина составляет 9,5 мм по всей длине, проплавление полное (рисунок 14б), усиление корня шва составляет 1 мм, что связано с уменьшением скорости сварки.



a)



### Рисунок 3.15 – Внешний вид образца К5

Режимы сварки образцов приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Режимы сварки образцов

| №<br>п/п | $I_a=I_b$ , А | $I_c$ , А | $U_{bc}$ , В | $U_{ab}$ , В | $V_{cb}$ , м/ч | $Q_{ar}$ , л/мин |
|----------|---------------|-----------|--------------|--------------|----------------|------------------|
| 1        | 70            | 120       | 11,8         | 7,2          | 18             | 9-12             |
| 2        | 70            | 120       | 11,8         | 7,2          | 16,7           | 9-12             |
| 3        | 70            | 120       | 11,8         | 7,2          | 16             | 9-12             |
| 4        | 70            | 120       | 12,2         | 7,5          | 16,7           | 9-12             |
| 5        | 70            | 120       | 12,2         | 7,5          | 16             | 9-12             |

Для дальнейших исследований отбираем образцы К2, К4, К5. Геометрические параметры швов, выбранных образцов приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Геометрические параметры швов

| N  | $e_1$ , мм | $e$ , мм | $q$ , мм | $q_1$ , мм | Примечание              |
|----|------------|----------|----------|------------|-------------------------|
| К2 | 7,4        | 5,7      | 1        | 0,2        | $S=2$ мм, соединение С2 |
| К5 | 9,5        | 7,5      | 0,3      | 1,0        | $S=2$ мм, соединение С2 |
| К4 | 7,1        | 4,4      | 0,1      | 0,3        | $S=2$ мм, соединение С2 |

Таким образом, результаты исследования формирования неразъемного соединения из низкоуглеродистой стали трехфазной дугой неплавящимися электродами показали, что формируется полномерные швы с малой величиной усиления корня шва, что чрезвычайно важно при сварке технологических трубопроводов малого диаметра с односторонней разделкой кромок, когда нет возможности снять усиление корня шва трубопровода.



## Глава 4. Металлографические исследования сварных соединений

4.1 Методика металлографических исследований образцов полученных способом трехфазной сварки

С помощью микроанализа выявляют:

- Возможные внутренние дефекты сварных соединений;
- Микротрещины всех видов и направлений;
- Непровары или несплавления расположенные в сечении сварного соединения между отдельными валиками или основным металлом и металлом шва;
- Свищи и поры;
- Шлаковые и другие неметаллические включения;
- Микроструктуру металла шва;
- Зону термического влияния и основного металла, не находившегося под термическим воздействием сварки;
- Дефекты микроструктуры;
- Межкристаллитную коррозию и другие виды коррозионного поражения.

Для металлографических исследований изготавливаются образцы размерами 15 x 30 мм и заливаются смолой в специальное приспособление. Внешний вид приспособления показан на рисунке 4.1.

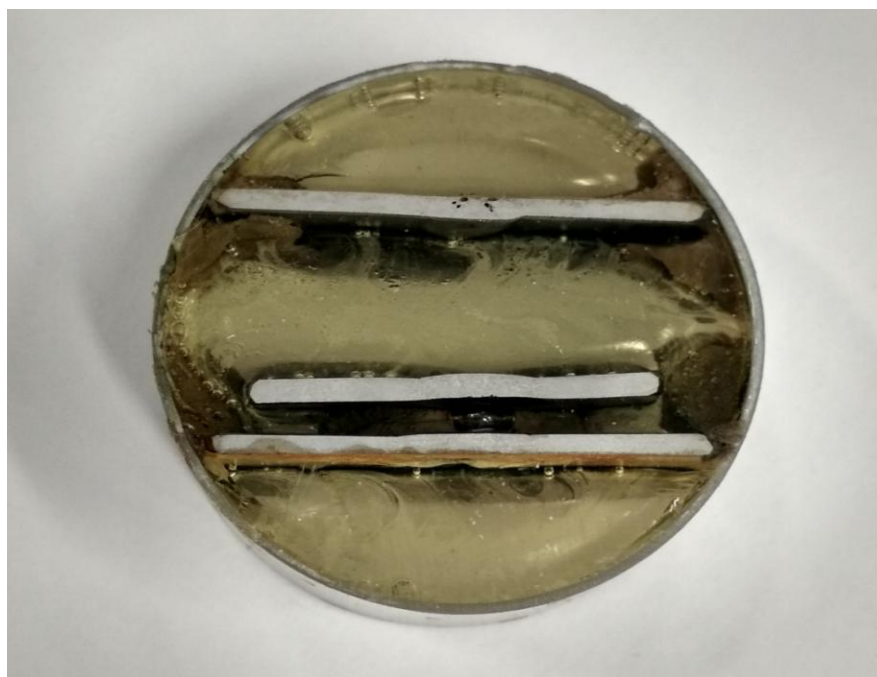


Рисунок 4.1 – Общий вид приспособления для шлифования образцов

Последовательность изготовления микрошлифа:

1. Контролируемая поверхность микрошлифа обрабатывается шлифовальным кругом зернистостью 8-M14 по ГОСТ-10054 на плоскошлифовальном станке с обязательным охлаждением эмульсией, затем шлифовальной шкуркой и алмазной пастой с частотой вращения диска до 1400 об./мин. зернистостью АСМ 14/10 НОМ; АСМ 7/5 НОМ; АСМ 5/3 НОМ; АСМ 3/2 НОМ по ГОСТ 25593 в несколько проходов с переходом последовательно от крупнозернистого к мелкозернистому абразивному материалу.

2. Производят подготовку полировочной жидкости размешивая в 1 л дистиллированной воды 10-20 г окиси хрома  $Cr_2O_3$  или окиси алюминия  $Al_2O_3$ . Наиболее тонкий равномерной зернистости абразив получается при отстаивании смеси в течение 6 часов.

3. Затем контролируемая поверхность микрошлифа полируется с помощью сукна смоченной полировочной жидкостью хорошего качества на полировальном станке с направлением полирования перпендикулярным рискам на микрошлифе с частотой вращения диска 800-1000 об./мин.

4. Далее поверхность промывается горячей водой, температурой около 40°C без моющих средств.

5. Травление производят с помощью 2-4% раствора азотной кислоты в этиловом спирте. Микрошлиф после промывания горячей водой опускают в раствор. Продолжительность травления – 45 секунд.

6. После травления реактив с микрошлифа удаляют водой, затем протирают ватным тампоном и сушат с помощью фильтровальной бумаги или сухим воздухом.

7. Исследование производят с помощью металлографического микроскопа при увеличении 100-500.

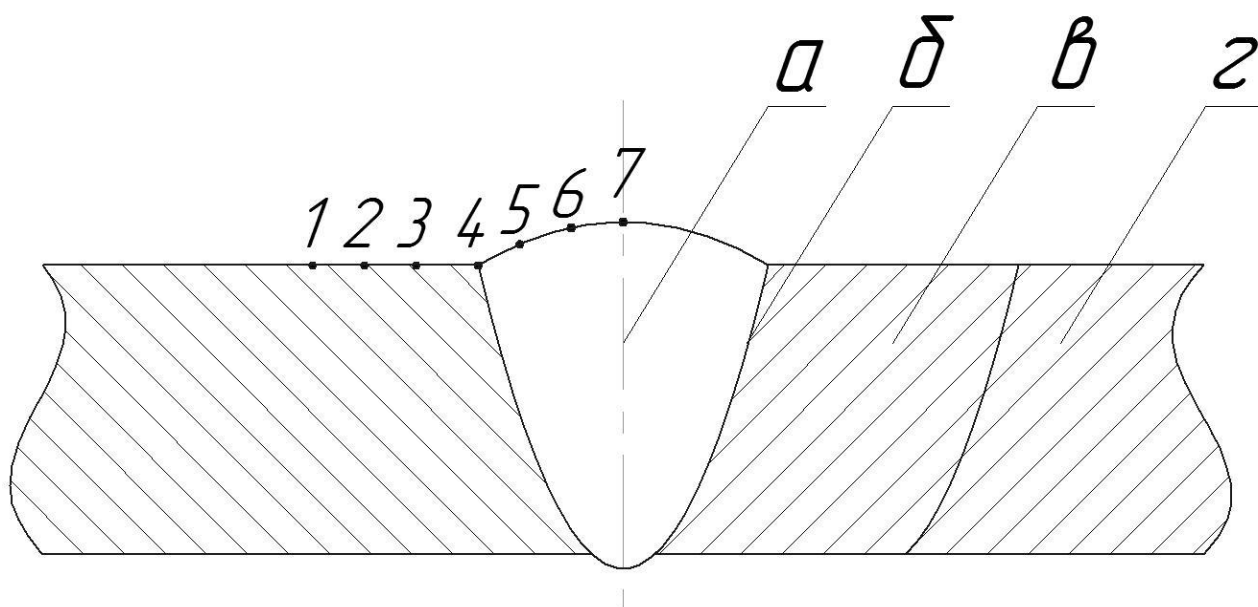


Рисунок 4.2 – Общий вид металлографического микроскопа

#### 4.2 Результаты металлографических исследований сварного шва

Металлографический анализ малого образца проводится с помощью микроскопа в точках 1-7 показанных на рисунке 4.3.





*а* – шов, *б* – линия сплавления, *в* – ЗТВ, *г* – основной металл

Рисунок 4.3 – Схема проведения металлографического анализа

Металлографические исследования производятся в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 4.3. Для двух шлифов получено 14 снимков которые позволяют судить о структуре основного металла, зоны термического влияния, линии сплавления и сварного шва выбранных образцов К4 и К5.

Результаты металлографического анализа образца К4 приведены рисунках 4.4-4.7.



Рисунок 4.4 – Структура основного металла образца К4

Структура основного металла в точке 1 показана на рисунке 3. Зерно

мелкое, границы зерен ярко выражены. Структура: перлит, феррит. На рисунке 4.5 показана структура в зоне термического влияния сварного шва трехфазной дугой неплавящимися электродами в защитной среде аргона. Размеры зерен уменьшились, границы зерен четкие. В зоне термического влияния дефектов не обнаружено.

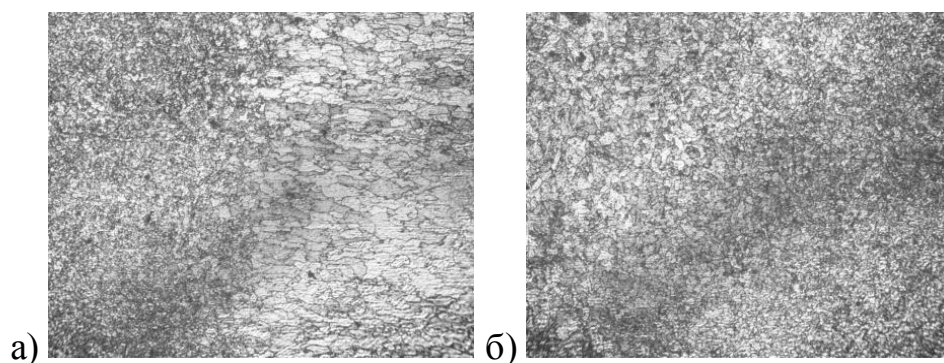


Рисунок 4.5 – Структура металла в зоне термического влияния образца К4 в точках 2 (а), 3 (б)

Изучение структуры низкоуглеродистой стали в линии сплавления в точке 4 выявила следующее. Размеры зерен увеличились. Линия сплавления узкая. Дефектов нет.

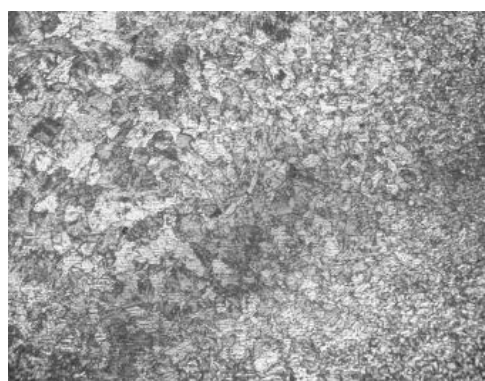


Рисунок 4.6 – Структура металла линии сплавления сварного шва и основного металла

При переходе к сварному соединению заметна тенденция к увеличению зерна. Структура зерен разнородна, границы зерен размыты, дефектов нет.

Структура сварного шва – перлит+феррит. Микроструктура, полученная в точках 5, 6, 7 показана на рисунке 4.7.

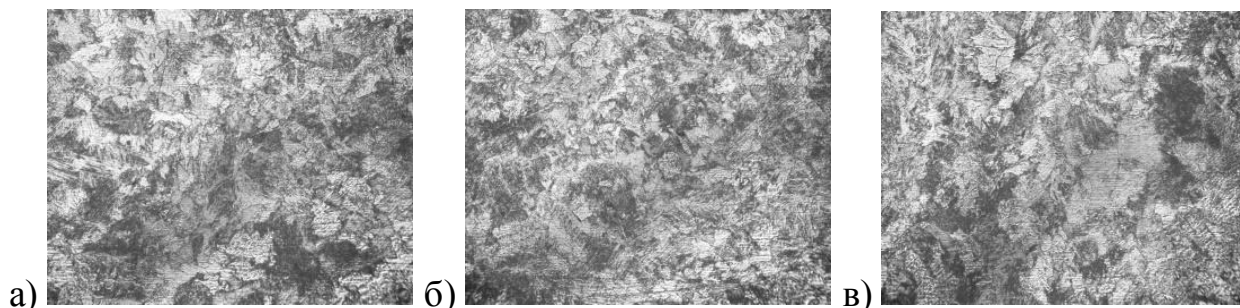


Рисунок 4.7 – Структура сварного шва образца К4 в точке 5 (а), 6 (б), 7 (в)

Металлографический анализ образца К4 показал резкую переходную границу от мелкого зерна ферритной структуры основного металла к неравномерно распределенному крупному зерну с наличием 20-35% перлита сварного шва. Феррит располагается по границам зерен перлита. Границы зерен размыты. Отсутствие дефектов говорит о возможности сварки сталей способом трехфазной дугой вольфрамовыми электродами в аргоне.

Результаты металлографического исследования образца К5.



Рисунок 4.8 – Структура основного металла образца К5

На рисунке 4.8 показана структура основного металла в точке 1. Зерно мелкое, границы зерен ярко выражены. Структура: перлит, феррит.

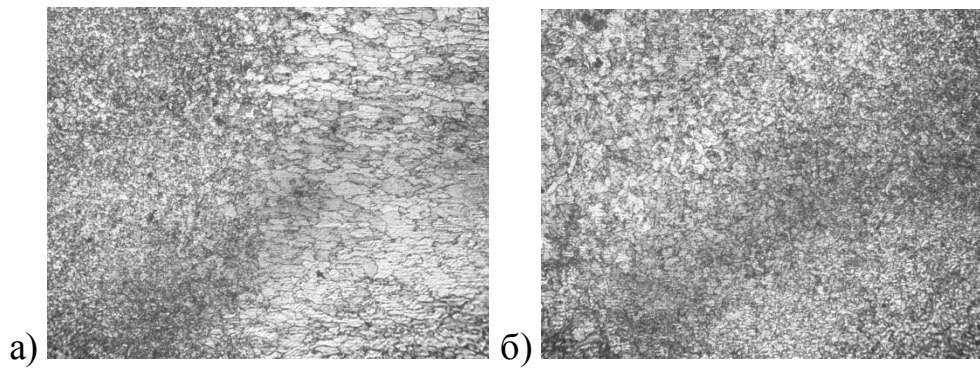


Рисунок 4.9 – Структура зоны термического влияния образца К5

На рисунке 4.9 приведена структура в зоне термического влияния при сварке трехфазной дугой неплавящимися электродами в защитной среде аргона в точках 2 и 3. Размеры зерен уменьшены, границы зерен четкие. В зоне термического влияния дефектов не обнаружено.

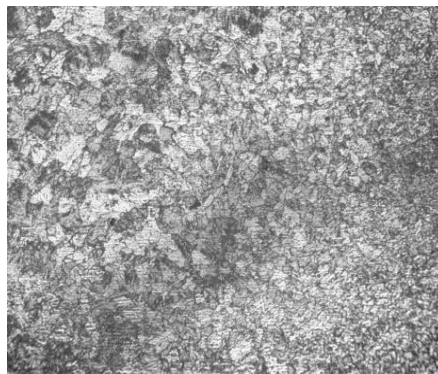


Рисунок 4.10 – Структура металла линии сплавления образца К5

При переходе к сварному соединению заметна тенденция к увеличению зерна. Структура зерен разнородна, границы зерен размыты, дефектов нет. Структура сварного шва – перлит+феррит.

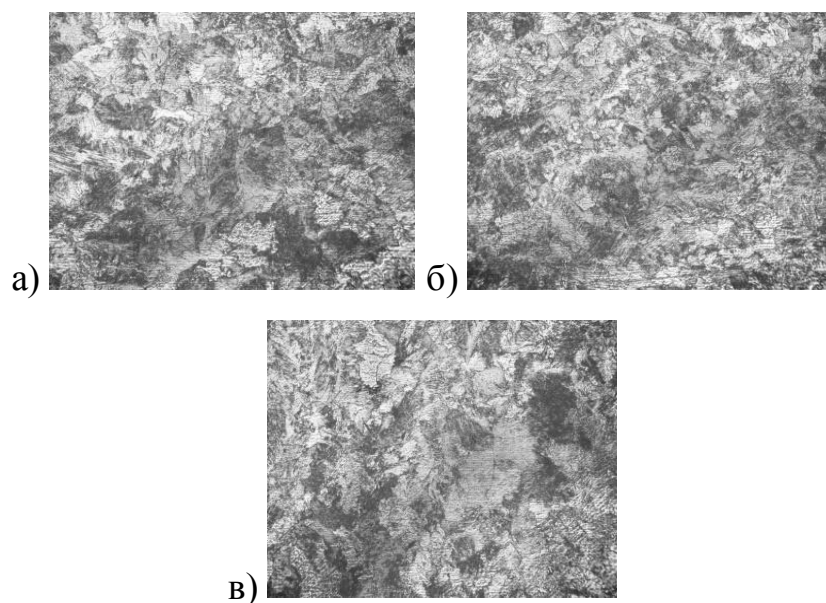


Рисунок 4.11 – Структура сварного шва образца К5

Исследования образца К5 показали, что резкая переходная граница от мелкого зерна ферритной структуры основного металла к неравномерно распределенному крупному зерну с наличием 20-35% перлита сварного шва. В зоне сплавления феррит располагается по границам зерен перлита. Границы зерен размыты. Отсутствие дефектов в зоне термического влияния, зоне сплавления, также в сварном шве говорит о возможности применения способа для соединения сталей способом трехфазной сварки.

Металлографические исследования образцов сваренных трехфазной дугой в среде защитного газа аргон неплавящимися электродами дали хорошие результаты. Однако исследования по сварке трехфазной дугой неплавящимися электродами необходимо продолжить на более широком диапазоне толщин различных сплавов низкоуглеродистых низколегированных сталей.

## Глава 5. Проектирование технологии сварки трубопровода 3-х фазной дугой неплавящимися электродами сталей в среде защитного газа аргон

Исходные данные для составления проектной технологии сварки трехфазной дугой неплавящимися электродами технологического трубопровода указаны в таблице 5.1

Таблица 5.1 Параметры соединяемого трубопровода

| Параметры                   | Единицы измерения | Величина |
|-----------------------------|-------------------|----------|
| Диаметр трубопровода        | мм                | 159      |
| Толщина стенки трубопровода | мм                | 5        |
| Тип соединения              |                   | C17      |

Таблица 5.2 - Размеры кромок соединения C17

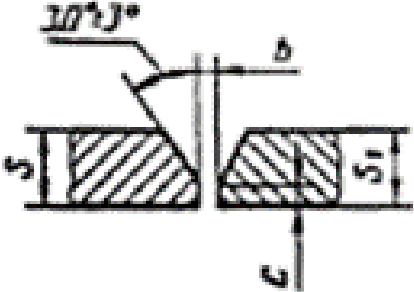
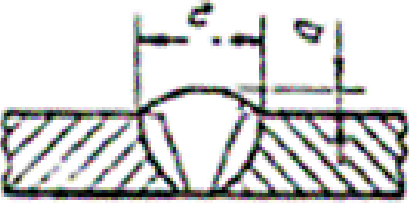
| Размеры кромок свариваемых деталей  | Толщина ( $S=S_1$ ), мм | b, мм   | c, мм   |
|---|-------------------------|---------|---------|
|  | 5                       | 1,5±0,5 | 1,0±0,5 |

Таблица 5.3 - Размеры сварочного шва соединения С17

| Размеры сварочного шва  | Толщина свариваемых изделий, мм | e, мм | g, мм   |
|---|---------------------------------|-------|---------|
|  | 5                               | 9,0+2 | 1,5+1,5 |

### 5.1 Подготовка торцов соединяемых трубопроводов

Подготовку кромок осуществляют абразивным кругом, контролируя геометрию полученных соответствию требованиям таблицы.

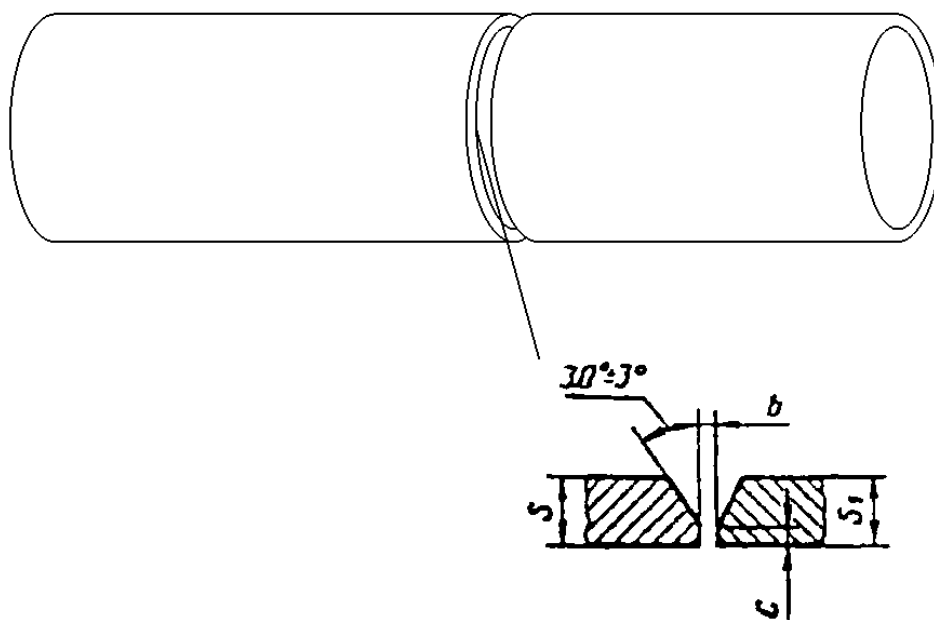


Рисунок 5.1 – Контроль качества разделки кромок

## 5.2 Зачистка стыка перед сборкой и сваркой технологического трубопровода

Зачистка стыка выполняется механическим способом до металлического блеска и обезжиривается на ширину не менее 10 мм с внутренней и не менее 20 мм с наружной стороны согласно требованиям технической документации. Схема зачистки стыка показана на рисунке 5.2.

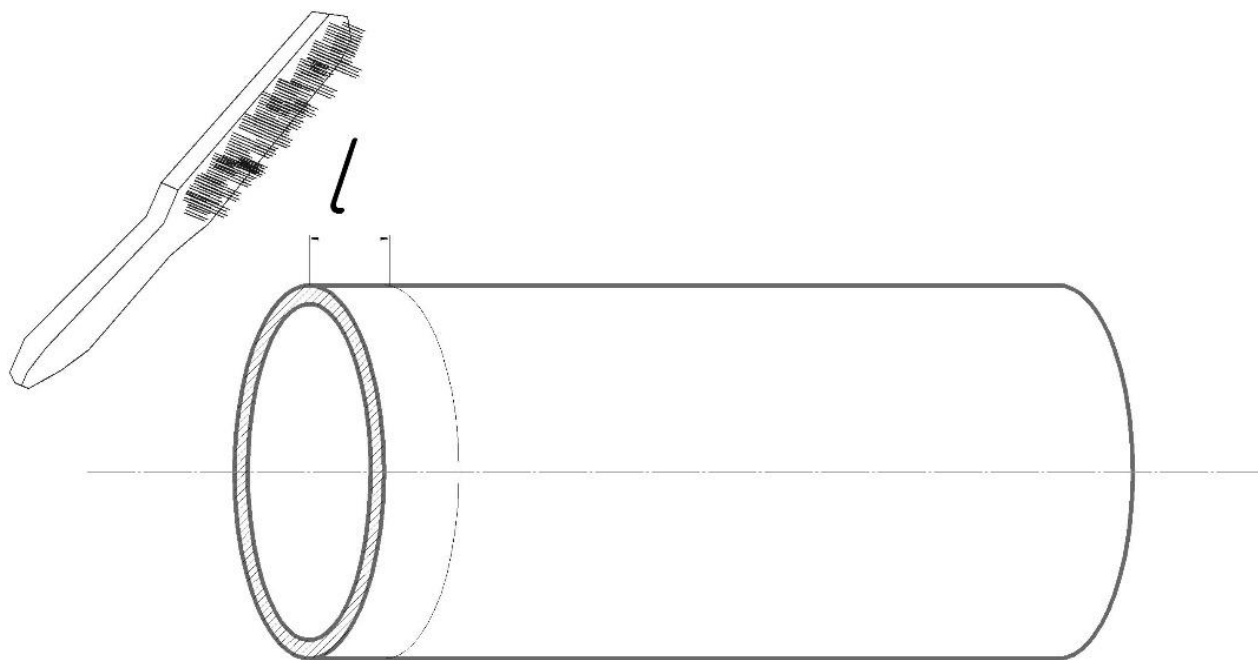


Рисунок 5.2 – Схема зачистки стыка

## 5.3 Сборка технологического трубопровода перед сваркой

Сборка соединений выполняют с помощью наружных центраторов эксцентрикового или звеньевого типов. Общий вид эксцентрикового центрирующего устройства показан на рисунке 5.3.



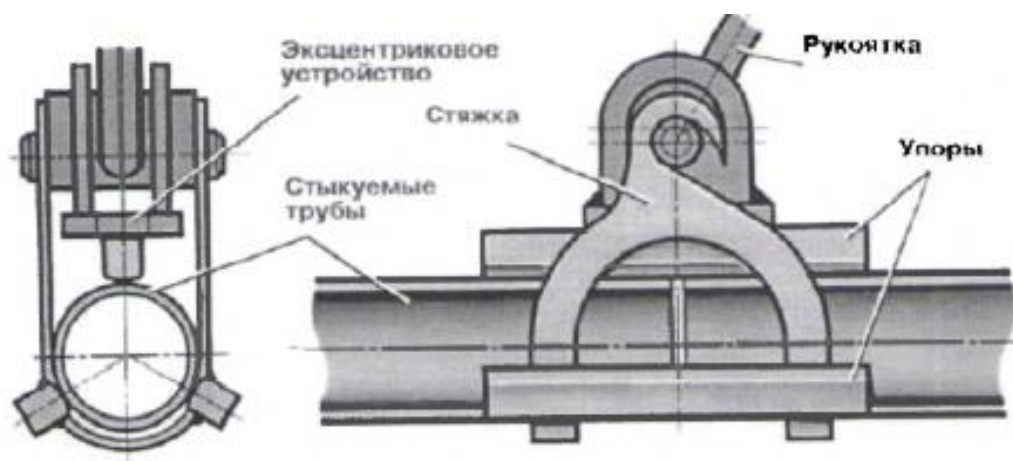


Рисунок 5.3 – Общий вид эксцентрикового устройства

При выполнении операции сборки стыков с двусторонней разделкой кромок свариваемых без подкладного кольца, смещение кромок не должно превышать значение, установленное технической документацией на технологический трубопровод.

Прихватки выполняют на режиме сварки корневого шва, и равномерно распределяют по периметру стыка. Количество и длина прихваток указаны в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Выбор количества прихваток

| Диаметр трубы, мм | Количество прихваток на стык | Длина прихватки, мм | Высота прихватки, мм |
|-------------------|------------------------------|---------------------|----------------------|
| 159               | 4                            | 40                  | 3                    |

#### 5.4 Сварка технологического трубопровода трехфазной дугой

Начальное возбуждение дуги производят коротким замыканием вольфрамовых электродов. Схема сварки косвенной дугой показана на рисунке 5.4.

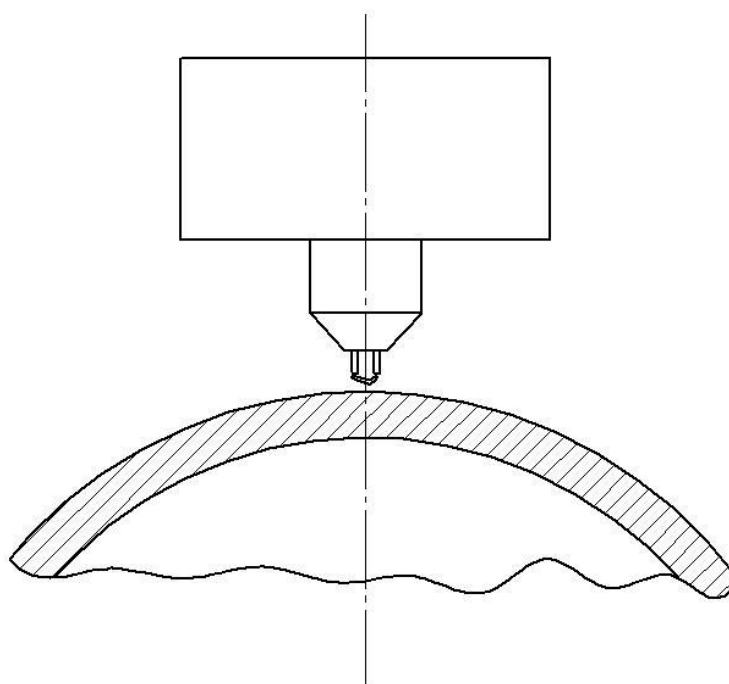


Рисунок 5.4 – Схема сварки косвенной дугой

Сварку корневого шва выполняют на режимах, указанных в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Параметры сварки корневого шва

| Параметр   | Единицы измерения | Величина параметра |
|------------|-------------------|--------------------|
| $I_a=I_b$  | А                 | 80-90              |
| $I_c$      | А                 | 1,73 (80-90)       |
| $U_{bc}$   | В                 | 8-20               |
| $U_{ab}$   | В                 | 8-10               |
| $V_{св}$   | м/ч               | 16                 |
| $Q_{ар}$   | л/мин             | 8-9                |
| $V_{п.п.}$ | м/ч               | 80                 |

После сварки корневого шва сварщик подвергает стык визуальному контролю качества. Результаты контроля являются удовлетворительными, если в стыке не обнаружены прожоги, трещины, вольфрамовые включения и другие дефекты, регламентируемые стандартом на сварку технологических трубопроводов.

Сварка заполняющего слоя производится после выполнения корневого шва на режимах, указанных в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Режимы сварки заполняющего шва

| Параметр   | Единицы измерения | Величина параметра |
|------------|-------------------|--------------------|
| $I_a=I_b$  | А                 | 90-100             |
| $I_c$      | А                 | 1,73 (90-100)      |
| $U_{bc}$   | В                 | 20                 |
| $U_{ab}$   | В                 | 8-10               |
| $V_{св}$   | м/ч               | 20                 |
| $Q_{ар}$   | л/мин             | 90                 |
| $V_{п.п.}$ | м/ч               | 9-12               |

Схема сварки заполняющего шва приведена на рис. 4.5. Для сварки шва определяется длина электродной проволоки и заправляется в специальную оснастку. Длина проволоки рассчитывается на один оборот. Длина дуги устанавливается 3-6 мм, расстояние между вольфрамовыми электродами 3 мм. Длина вылета электродов 6-8. Посадочное место для трехфазной горелки дорабатывается в соответствии с её габаритами. Величина тока устанавливается на источнике питания УДГТ – 150 У2 вручную на технологических образцах. Начальное возбуждение дуги производится с короткого замыкания W-W. Заварка кратера производится перекрытием шва на длину 40-50 мм. Схема сварки заполняющего шва показана на рисунке 5.5.

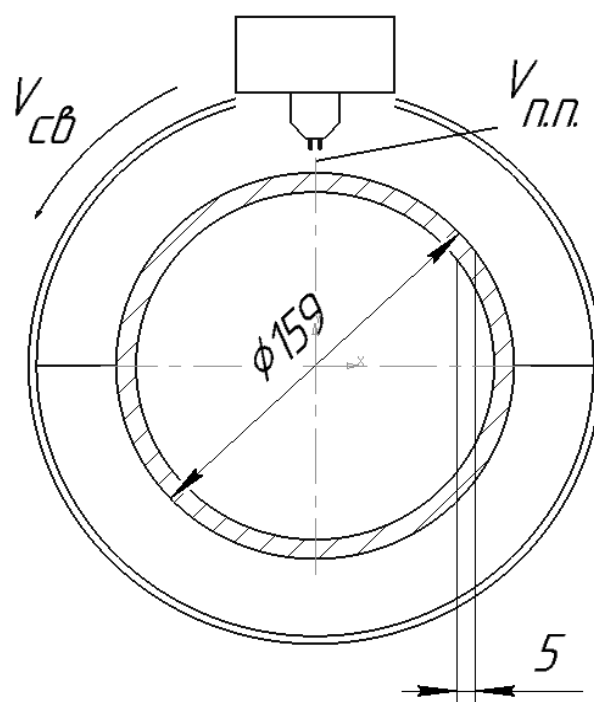


Рисунок 5.5 – Схема сварки заполняющего шва

Согласно имеющимся нормативно техническим документам и государственным стандартам, регламентирующим сварку технологических трубопроводов операции контроля качества, включают 100% визуально измерительный контроль и 100% ультразвуковой контроль.

## Заключение

Большой объем трубопроводной системы выносит на повестку дня производительность получения неразъемных соединений. В трубопроводных системах сварка преобладает, как в условиях цеха, так и в монтажных. Поэтому повышение производительности сварки технологических трубопроводов актуально.

В сварочной технике хорошо изучены возможности отечественного способа сварки трехфазной дугой неплавящимися электродами алюминиевых сплавов, однако сведений о применении этого способа для сварки углеродистых сталей малочисленны. В Уральском Политехническом Институте в свое время выполнены работы по сварке стали трехфазной дугой покрытыми электродами и плавящимися электродами.

В связи с тем, что сведений о сварке трехфазной дугой неплавящимися электродами низкоуглеродистых сталей малочисленны была разработана методика проведения экспериментов. Выбрано сварочное оборудование, контролирующие и регистрирующие приборы и материалы для сварки низкоуглеродистой стали.

Предварительные исследования показали, что при сварке неплавящимися электродами сталей дуга горит устойчиво, формирование шва хорошее, производительность высокая по сравнению с известными способами.

В работе выполнен большой объем металлографических исследований стыковых соединений из низкоуглеродистых сталей, выполненных трехфазной дугой неплавящимися электродами. Результаты показали, что резкая переходная граница от мелкого зерна ферритной структуры основного металла к неравномерно распределенному крупному зерну с наличием 20-35% перлита сварного шва. В зоне сплавления феррит располагается по границам зерен перлита. Границы зерен размыты. Отсутствие дефектов в зоне термического влияния, зоне сплавления, также в сварном шве говорит о

возможности применения способа для соединения сталей способом трехфазной сварки.

Разработан проект технологии сварки неповоротного стыка трубы диаметром 159 мм технологического трубопровода используя, оборудование для сварки трехфазной дугой разработанное на кафедре СОМДиРП и не оцененное в промышленности, за исключением завода МИАЗ, которое до сегодняшнего дня использует сварку трехфазной дугой.

Целесообразно использование способа сварки трехфазной дугой сталей, продолжив исследования.

## Список используемых источников

1. OPENGOST.RU [Электронный ресурс] : портал нормативных документов. – Режим доступа: <http://www.opengost.ru/iso>. - Заглавие с экрана. - (Дата обращения 04.04.18).

2. Больфор, М.Г. Оборудование для дуговой и шлаковой сварки и наплавки [Текст] : Учебник / М.Г. Больфор, В.Е. Патон. – М. : Высш. шк., 1974. – 256 с.

3. Ельцов, В.В. Ремонтная сварка и наплавка деталей машин и механизмов [Текст] : Учеб. пособие по дисциплинам «Ремонтная сварка и наплавка деталей машин и механизмов», «Основы восстановления деталей и ремонт автомобилей». – 2-е изд., испр. и доп./ М. Г. Козулин. – Тольятти : ТГУ, 2010. - 176 с.

4. Каракозов, Э.С. Справочник молодого электросварщика [Текст] : Справочник / Э.С. Каракозов, Р.И. Мустафаев. – М. : Высш. шк., 1992. – 304 с.

5. Козулин, М.Г. Технология сварочного производства и ремонта металлоконструкций [Текст] : Учеб. пособие для студентов специальности 150202 «Оборудование и технология сварочного производства»/ В. В. Ельцов. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2012. - 176 с. : пер.

6. Кононенко, В.Я. Сварка в среде защитных газов плавящимися и неплавящимися электродом [Текст] : Справочник / В.Я. Кононенко. – Киев: Ника-Принт, 2007. – 166с.

7. Короткова Г.М. Источники питания переменного тока для сварки неплавящимся электродом алюминиевых сплавов [Текст] : Монография / Г.М. Короткова. – Тольятти: ТГУ, 2009. – 335 с.

8. Кузмак, Е.М. Основы технологии аппаратостроения [Текст] : Учебник/ Е. М. Кузмак. – М : Изд-во «Недра», 1967. - 469 с.

9. Куркин, С.А. Технология, автоматизация и механизация производства сварных конструкций: атлас [Текст] : Учеб. пособие для

студентов машиностроительных специальностей вузов / С. А. Куркин, В. М. Ховов, А. М. Рыбачук. - М. : Машиностроение, 1989. — 328 с.: ил.

10. Лившиц, Л.С. Металловедение для сварщиков (сварка сталей) [Текст] : Учебник / Л.С. Лившиц. – М. : Машиностроение, 1979. – 253с.: ил.

11. Михайлов Г.П. Сварка трехфазной дугой [Текст] : Учебник. – М. – Свердловск, 1956. – 236 с.

12. Никифоров, В.М. Технология металлов и конструкционные материалы [Текст] : Учеб. пособие / В.М. Никифоров. – М. : Высшая школа, 1968. – 360 с.

13. Петров, Г.Л. Сварочные материалы [Текст] : Учеб. пособие для вузов/ Г.Л. Петров. – Л. : Машиностроение, 1972. – 280 с. : ил.

14. Столбов В.И., Короткова Г.М. Технология и оборудование для сварки трехфазной дугой неплавящимися электродами [Текст] : Учеб. Пособие/ В.И Столбов, Г.М. Короткова. – Куйбышев: КуАИ, 1984. – 81с.

15. Столбов В.И. Сварка и резка алюминиевых сплавов трехфазной дугой [Текст] : диссертация д.т.н. / В.И. Столбов. – Тольятти : ТПИ, 1963. – 348 с.

16. Тавастшерна Р.И. Изготовление и монтаж технологических трубопроводов [Текст] : Учеб. для техникумов – 2-е изд., перераб. и доп. / Р. И. Тавастшерна. – М : Стройиздат, 1986. - 286 с.: ил.

17. Техэксперт [Электронный ресурс] : электронный фонд правовой и нормативно - технической документации. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru>. - Заглавие с экрана. - (Дата обращения 10.04.18).

18. ГОСТ 32569-2013. Трубопроводы технологические стальные. Требования к устройству и эксплуатации на взрывопожароопасных и химически опасных производствах. Дата введения [Текст] : ГОСТ 32569-2013 – Введ. 2015-01-01- М. : Стандартинформ, 2015-184 с.

19. Фоминых, В.П. Оборудование и технология дуговой сварки [Текст] : Учебник / В.П. Фоминых. – М. : Машиностроение, 1966. – 312 с.



20. Фролов, В.А. Специальные методы сварки и пайка [Текст] : Учеб. пособие / В.А. Фролов, В.В. Пешков, А.Б. Коломенский, и др. - М. : Интернет Инжиниринг, 2003. – 183 с.
21. Фролов, В.А. Технология сварки плавлением и термической резки металлов [Текст] : Учеб. пособие / В.А. Фролов, В.Р. Петренко, А.В. Пешков, А.Б. Коломенский, В.А. Козаков ; под ред. А.В. Фролова. – М. :Альфа-М:ИНФРА-М , 2011. – 448 с.: ил.
22. Фролова, В.В. Теория сварочных процессов [Текст] : Учеб. для вузов по спец. «Оборуд. и технология сварочн. пр-ва» / В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров, и др.; Под ред. В.В. Фролова. – М. : Высш. шк., 1988. – 559 с.: ил.
23. Юхин, Н.А. Ручная дуговая сварка неплавящимся электродом в защитных газах [Текст] : Учеб. / Н.А. Юхин под ред. О.И. Стеклова. – М. : СОУЭЛО, 2001. – 49 с.
24. Егоров, А.Г. Правила оформления выпускных квалификационных работ по программам подготовки бакалавра и специалиста [Текст] : Учебно - методическое пособие / А.Г. Егоров, В.Г. Виткалов, Г.Н. Уполовникова, И.А. Живоглядова – Тольятти, 2012, - 135 с.
25. William, L. Welding Essentials: Questions & Answers [Текст] : Expanded Edition / William L. Galvery Jr. and Frank M. Marlow ; Cengage Learning published in 2001 / p. 480
26. Karen, Ruth Welding Basics [Текст] : handbook / Karen Ruth ; Cengage Learning published in 2004 / p. 144
27. Larry Jeffus Welding: Principles and Applications (Fifth Edition) [Текст] / Larry Jeffus ; Cengage Learning published in 2002 / p. 904
28. Deruntz, B. Assessing the Benefits of Surface Tension Transfer Welding to Industry / Journal of Industrial Technology, Vol. 19, N° 4, 2004 / p.13 – 18
29. Jarvis, L. Keyhole GTAW User guide / CSIRO Manufacturing & Infrastructure Technology Australia Vol. 3, 2000 / p. 45 – 52

30. ГОСТ 14771-76. Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. – М.: ИПК Издательство стандартов. – 1996г. – С. 59.