

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

(наименование)

15.03.01 «Машиностроение»

(код и наименование направления подготовки / специальности)

«Современные технологические процессы изготовления деталей

в машиностроении»

(направленность (профиль) / специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Сварка главного циркуляционного трубопровода АЭС

Обучающийся

С.А. Котаев

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент О.В. Шашкин

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Консультанты

к.э.н., доцент О.М. Сярдова

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

к.ф.-м.н., доцент Д.А. Романов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2023

## Аннотация

В настоящей выпускной квалификационной работе рассматривается вопрос повышения эффективности сварочных операций при выполнении сборки и сварки главного циркуляционного трубопровода атомных электростанций.

Базовая технология сборки и сварки циркуляционного трубопровода предусматривает применение ручной дуговой сварки и ручной аргонодуговой сварки неплавящимся электродом.

Выполненный анализ состояния вопроса позволил обосновать выбор способа сварки, в качестве которого предлагается применить автоматическую аргонодуговую сварку.

Составлен проектный технологический процесс ремонтной сварки.

Выполненная идентификация этих негативных факторов позволила предложить стандартные методики и технические средства для защиты персонала и окружающей среды.

Производительность труда повышается на 33 %. Уменьшение технологической себестоимости составило 20 %. При этом за счёт повышения производительности труда и снижения издержек удалось получить годовой экономический эффект в размере 1,15 млн. рублей.

Результаты рекомендуются к внедрению на предприятиях, которые выполняют работы по строительству и ремонту технологических трубопроводов на атомных станциях.

## **Abstract**

The title of the graduation work «Welding of the main circulation pipeline of the nuclear power plant»

Until now, when welding the joints of the main circulation pipeline, manual arc welding continues to be used. At the same time, the root layer of the weld with a height of 6 ... 8 mm is performed by argon-arc welding with a non-consumable electrode without heating, and the filling of the groove is performed by manual arc welding with PT 300 electrodes with preliminary and concomitant heating.

The aim of the work is improving the efficiency of welding operations during the construction of the main circulation pipeline of nuclear power plants.

The performed analysis of the state of the issue made it possible to justify the choice of the welding method, which is proposed to be used as automatic argon-arc welding.

A design process for repair welding has been drawn up.

The identification of these negative factors made it possible to propose standard methods and technical means for the protection of personnel and the environment.

Labor productivity increases by 33%. The reduction in technological cost amounted to 20%. At the same time, by increasing labor productivity and reducing costs, it was possible to obtain an annual economic effect in the amount of 1.15 million rubles.

## Содержание

|   |    |
|---|----|
| Введение . . . . .  | 6  |
| 1 Современное состояние вопроса сварки главного циркуляционного трубопровода атомных станций. . . . . | 8  |
| 1.1 Сведения об особенностях конструкции и условиях работы. . . . .                                   | 8  |
| 1.2 Сведения о материале трубопровода . . . . .   | 10 |
| 1.3 Особенности базовой технологии сварки. . . . .  | 13 |
| 1.4 Формулировка задач выпускной квалификационной работы. . . . .                                     | 25 |
| 2 Построение проектной технологии сварки главного циркуляционного трубопровода . . . . .              | 27 |
| 2.1 Механизация и автоматизация сварки стыков главного циркуляционного трубопровода. . . . .          | 27 |
| 2.2 Обоснование выбора защитного газа и сварочной проволоки. . . . .                                  | 29 |
| 2.3 Описание операций проектного технологического процесса. . . . .                                   | 32 |
| 3 Обеспечение безопасности и экологичности предлагаемых технических решений. . . . .                  | 37 |
| 3.1 Конструктивно-технологическая характеристика рассматриваемого объекта . . . . .                   | 37 |
| 3.2 Идентификация профессиональных и производственных рисков. . . . .                                 | 39 |
| 3.3 Методики и технические средства для устранения профессиональных рисков . . . . .                  | 40 |
| 3.4 Пожарная безопасность рассматриваемого технологического объекта. . . . .                          | 42 |
| 3.5 Вопросы обеспечения экологической безопасности. . . . .   | 44 |
| 4 Экономическое обоснование предлагаемых в выпускной квалификационной работе решений. . . . .         | 45 |
| 4.1 Анализ исходной информации по базовой и проектной технологиям . . . . .                           | 45 |

|   |    |
|---|----|
| 4.2 Оценка фонда времени работы оборудования. . . . .   | 47 |
| 4.3 Оценка штучного времени при выполнении операций проектного и базового вариантов технологии . . . . .                      | 48 |
| 4.4 Расчёт заводской себестоимости при осуществлении операций технологического процесса по рассматриваемым вариантам. . . . . | 50 |
| 4.5 Капитальные затраты при реализации проектного и базового вариантов технологии. . . . .                                    | 54 |
| 4.6 Показатели экономической эффективности. . . . .   | 56 |
| Заключение . . . . .  | 58 |
| Список используемой литературы и используемых источников. . . . .   | 60 |

## Введение

Атомные электростанции (АЭС) являются потенциальными техногенноопасными объектами, аварии на которых могут привести к непоправимым последствиям. В связи с этим контроль за состоянием технологического оборудования и своевременное устранение его повреждений являются основными условиями надёжности работы АЭС. Поскольку требования к безопасности ядерных энергетических установок чрезвычайно высокие и продолжают ужесточаться, особое значение приобретает проблема ремонта компонентов оборудования и трубопроводов АЭС с целью продления их ресурса.

В реакторах ВВЭР-1000 в наиболее жестких условиях эксплуатации работают парогенераторы типа ПГВ-100М [19]. В них дефекты чаще всего образуются в теплообменных трубках, и поскольку пока практически не существует эффективных способов их ремонта, то после «глушения» допустимого их количества, вышедшие из строя парогенераторы заменяют, что включает проведение комплекса технологических операций. Наиболее сложные и дорогостоящие из них это стыковка, сварка, термообработка и контроль качества сварных соединений главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) диаметром 850 мм с коллекторами парогенератора в монтажных условиях. Цикл операции составляет около 20 суток.

До настоящего времени при сварке стыков главного циркуляционного трубопровода продолжает применяться ручная дуговая сварка. При этом корневой слой шва высотой 6...8 мм выполняется аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом без подогрева, а заполнение разделки выполняют ручной дуговой сваркой электродами марки ПТ-300 с предварительным и сопутствующим подогревом.

Применение ручной дуговой сварки следует признать нежелательным.

В настоящее время доля соединений, получаемых с применением ручной дуговой сварки, неуклонно снижается, а сама ручная дуговая сварка

уступает место более производительным и перспективным процессам [12]. Это объясняется большим количеством недостатков, устранение которых при существующем уровне развития техники и технологий неосуществимо.

Первым недостатком является малая производительность ручной дуговой сварки, которая не может быть повышена за счёт форсирования режимов или применения новых сварочных электродов. Вторым недостатком является вредность условий труда сварщика, которому приходится работать в атмосфере сварочного аэрозоля и излучения от дуги. Третьим недостатком следует указать увеличение расхода сварочных материалов из-за затрат на огарки, кроме того, необходимость прерывания горения дуги при смене электрода приводит к снижению производительности и качества сварки. Четвёртым недостатком является малая стабильность качества сварки, имеющая прямую зависимость от квалификации сварщика.

С учётом растущего количества монтируемых атомных энергоблоков и наблюдаемого недостатка квалифицированных сварщиков-ручников следует признать, что вопрос обеспечения производительности и качества сварки главного циркуляционного трубопровода начинает превращаться в проблему. Радикальное решение этой проблемы лежит в плоскости применения новых перспективных способов сварки, заменяющих ручную дуговую сварку со всеми её недостатками.

На основании вышеизложенного можно признать актуальность выбранной темы выпускной квалификационной работы и поставленную цель – повышение эффективности сварочных работ при строительстве главного циркуляционного трубопровода атомных станций.

Достижение поставленной цели должно вестись с учётом современных решений в области сварки толстостенных трубопроводов из перлитных сталей, предложенных отечественными и зарубежными инженерами-сварщиками.

# 1 Современное состояние вопроса сварки главного циркуляционного трубопровода атомных станций

## 1.1 Сведения об особенностях конструкции и условиях работы

Главный циркуляционный трубопровод и коллектор изготовлены из стали перлитного класса 10ГН2МФА согласно ТУ 108.1197-83, плакированной по внутренней поверхности аустенитной сталью марки ЭИ-898 (04Х20Н10Г2Б). Толщина основного металла трубы составляет 70 мм, толщина плакировки составляет 5...7 мм.

Трубопровод служит для передачи воды первого контура реактора ВВЭР-1000 к парогенераторам. Схема трубопровода представлена на рисунке 1.

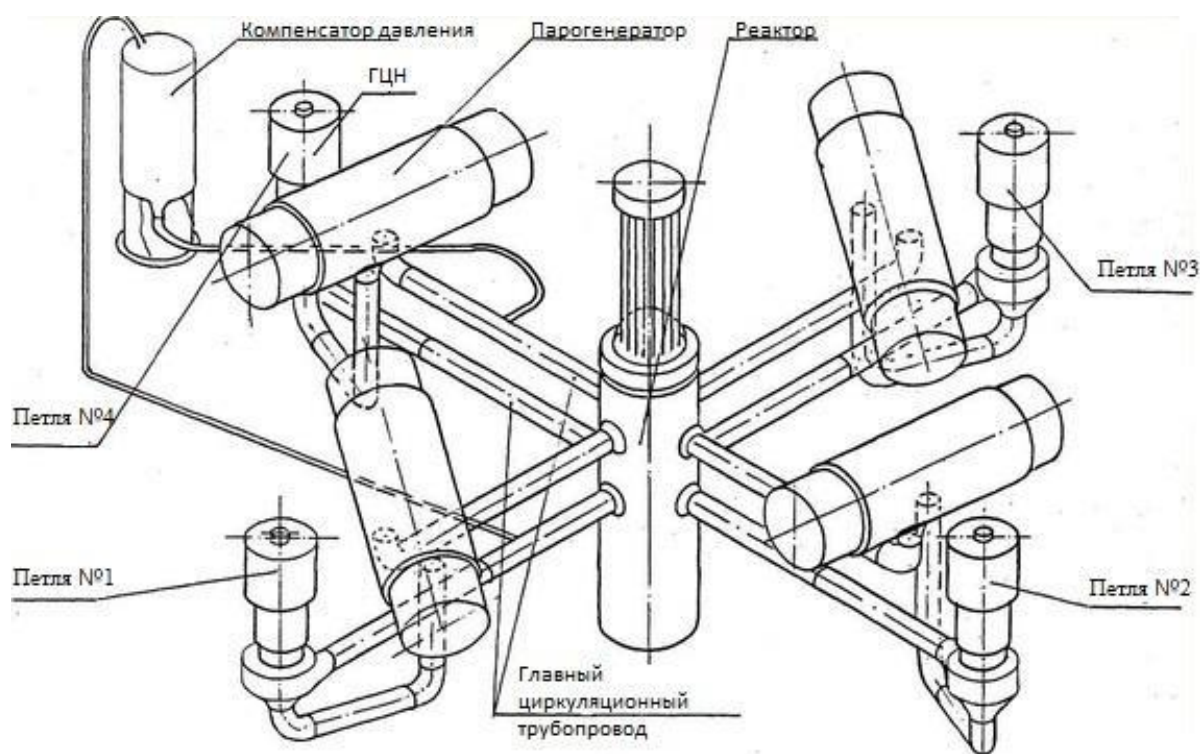


Рисунок 1 – Главный циркуляционный трубопровод в составе первого контура реактора ВВЭР-1000



Этот контур является радиоактивным и включает в себя реактор и циркуляционные петли. В каждую петлю включен главный циркуляционный насос, парогенератор и запорные задвижки. Первый контур работает под высоким давлением, составляющим 160 атмосфер, по нему прокачивается растворённая борная кислота. Контур является герметичным и препятствует проникновению продуктов распада в окружающую среду.

Граница первого контура является важнейшим барьером безопасности, при нарушении его работы не только перестаёт выполняться барьерная функция, но и нарушается работа других элементов, которые обеспечивают безопасность работы реактора. Важнейшим элементом первого контура является главный циркуляционный трубопровод.

Температура циркулирующей воды составляет 320 °С. Протяжённость трубопровода составляет порядка 160 метров, масса трубопровода составляет 237 тонн. На трубопроводе предусмотрено 28 стыков труб.

Особенности работы и аварийного разрушения главного циркуляционного трубопровода объясняются не только высокими давлениями и длительной работой при температуре теплоносителя более 300 °С. Стенка трубопровода плакирована нержавеющей сталью типа X18H10T толщиной 5...7 мм. При этом основная стенка трубы толщиной 63 мм имеет перлитную структуру, а плакирующий слой имеет аустенитную структуру. Разница в линейных коэффициентах расширения этих материалов вызывает значительные местные растягивающие напряжения, которые вызывают образование микротрещин в плакирующем слое, способных распространяться в основной металл [10].

В состав главного циркуляционного трубопровода входят трубные узлы с проходным диаметром 850 мм, элементы температурного контроля, элементы закрепления главного циркуляционного насосного аппарата, детали закладные элементов закрепления главного циркуляционного насосного аппарата, элементы закрепления кольца биологической защиты, детали закладные элементов закрепления кольца биологической защиты.

## 1.2 Сведения о материале трубопровода

Элементы главного циркуляционного трубопровода выполнены из стали 10ГН2МФА. Сталь 10ГН2МФА применяется при изготовлении элементов атомных станций начиная с 1973 года и продолжает применять в настоящее время [14]. По результатам аттестационных испытаний, описанных в работе [4], сталь 10ГН2МФА отнесена к ограниченно свариваемым сталям. Содержание химических элементов в различных образцах, взятых на трубопроводе из стали представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Содержание химических элементов в стали 10ГН2МФА [14]

| Образец | Содержание элемента, в % |      |      |      |      |      |      |       |       |
|---------|--------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
|         | C                        | Si   | Cr   | Ni   | Mn   | Mo   | V    | S     | P     |
| 1       | 0,10                     | 0,26 | 0,19 | 2,24 | 0,85 | 0,46 | 0,03 | 0,015 | 0,010 |
| 2       | 0,10                     | 0,26 | 0,26 | 2,25 | 0,95 | 0,47 | 0,04 | 0,013 | 0,009 |
| 3       | 0,10                     | 0,27 | 0,13 | 2,05 | 0,90 | 0,54 | 0,02 | 0,016 | 0,012 |

В процессе сварки стали 10ГН2МФА наблюдается различное поведение металла в зоне термического влияния [7]. На участке сплавления, если там присутствуют неметаллические включения, возможно образование горячих микротрещин [22]. Склонность к образованию горячих трещин повышается при сварке на режимах с повышенной погонной энергией. На рисунке 2-б представлена горячая микротрещина при увеличении 200 крат.

Очагами горячих микротрещин являются микродефекты в виде оплавленных полостей в области скопления неметаллических включений, как показано на рисунке 2-б с увеличением 1800 крат.

При сварке по границам крупных зёрен металла образуется пленка из сульфидной части компонентов, которая при действии растягивающих напряжений при усадке приводит к образованию надрывов.

Для борьбы с образованием горячих трещин следует стремиться к максимальному уменьшению размеров первичных дендритов в металле сварного шва, что позволяет измельчить зерно в структуре металла и

добиться повышения прочности. Для этого следует применять параметры режима, при которых снижено вложение тепла. Также можно применять перемешивание металла сварочной ванны и различные модифицирующие добавки. Выбор способа сварки и сварочных материалов оказывает существенное влияние на структуру металла в сварном шве [7].

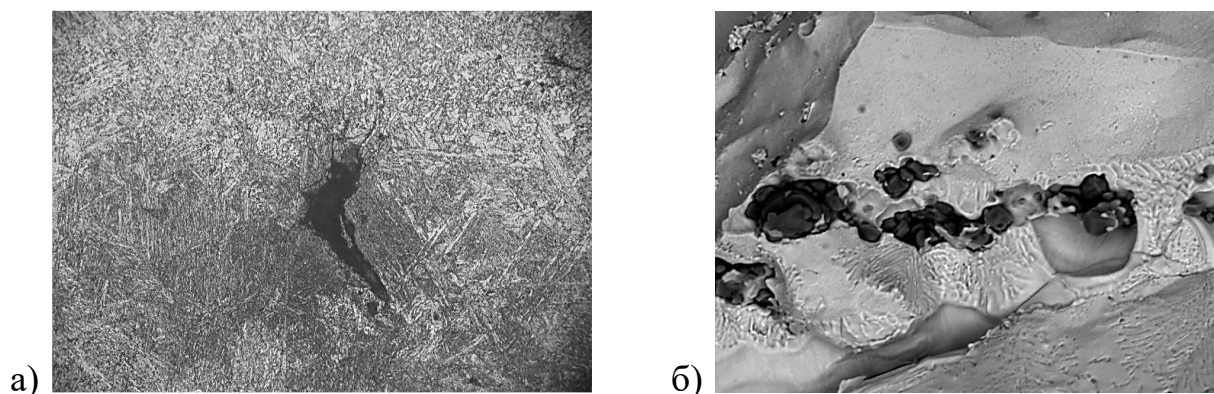


Рисунок 2 – Образование горячих микротрещин при сварке стали 10ГН2МФА: микротрещина при увеличении 200 крат (а); неметаллические включения в области сплавления при увеличении 1800 крат

Ещё одной трудностью при сварке стали 10ГН2МФА является склонность к образованию трещин отпуска [13]. Релаксация остаточных напряжений при температуре отпуска более 600 °С вследствие порообразования происходит по механизму термомодеформационного старения [17].

Следует отметить, что сталь 10ГН2МФА имеет минимальные пластические свойства при температуре нагрева 800...900 °С, как показано на рисунке 3. Такой провал механических свойств в интервале «средних температур» может стать причиной образования так называемых «тёплых трещин», что должно учитываться при построении технологии сварки конструкций из стали 10ГН2МФА [14].

Ещё одной проблемой при сварке трубопровода атомной станции является наличие на поверхности труб плакирующего слоя аустенитной структуры. При сварке на поверхности труб возникает структура,

характерная для случая сварки разнородных сталей, так как основная часть трубы имеет перлитную структуру, а плакирующий слой – аустенитную. При этом происходит образование горячих трещин в переходной зоне, как показано на рисунке 4.

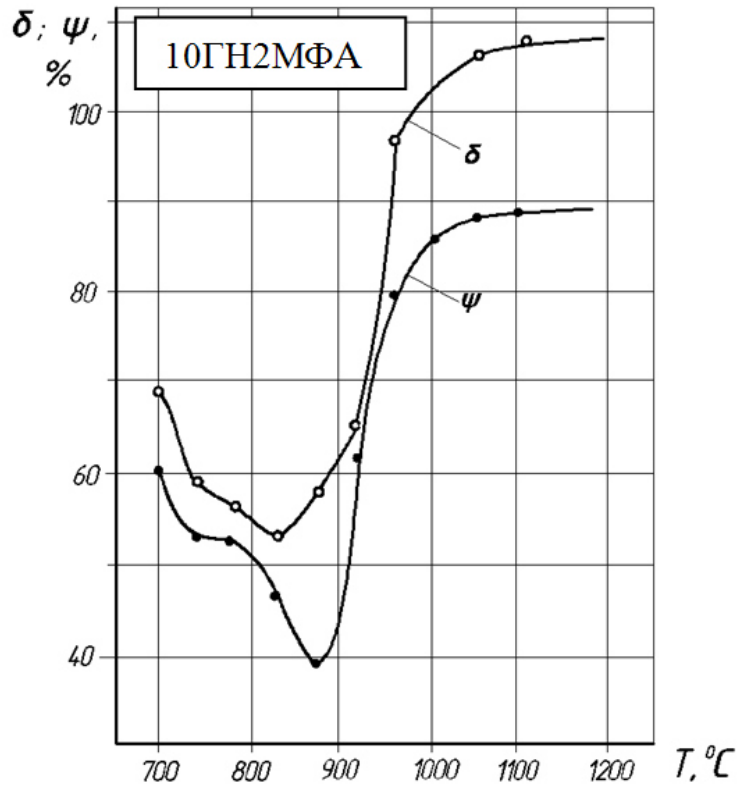


Рисунок 3 – Пластичность стали 10ГН2МФА при различных температурах

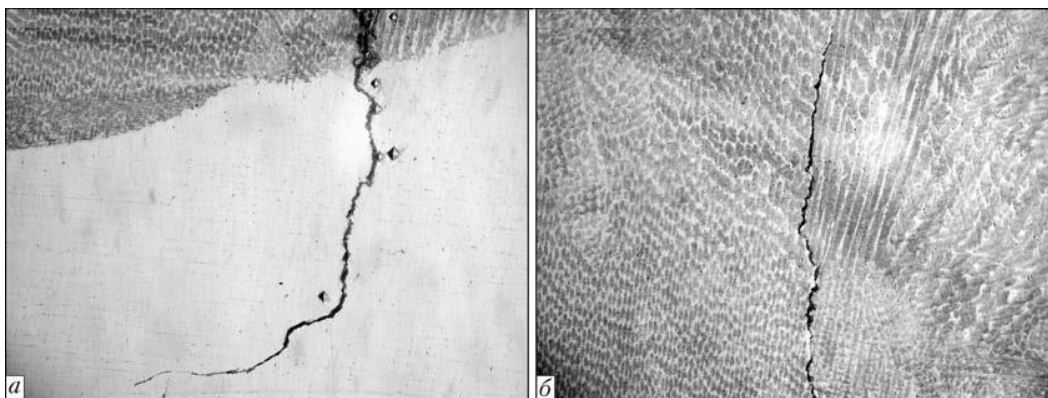


Рисунок 4 – Образование горячих трещин при сварке плакированных сталей: в зоне сплавления подслоя и несущего шва

Для борьбы с образованием трещин в плакирующем слое необходимо ограничить содержание в нем таких элементов, как кремний, фосфор и сера. Металл сварного шва следует легировать молибденом и марганцем.

### 1.3 Особенности базовой технологии сварки

В настоящее время основным способом соединения элементов главного циркуляционного трубопровода диаметром 850 мм с патрубками парогенератора является ручная дуговая сварка покрытыми электродами и ручная аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом с присадкой [1], [11].

Перед выполнением сборки следует провести входной контроль состояния поверхности и кромок труб и элементов. На поверхности труб не должно быть следов повреждений, полученных при транспортировке и неправильном хранении. Должны отсутствовать забоины, вмятины, следы коррозии. Необходимо наличие сопроводительной документации.

На концах элементов трубопровода должна быть выполнена подготовка в соответствии с требованиями нормативной документации. На рисунке 5 представлена форма применяемой V-образной разделки с раскрытием наружу [5]. На каждой кромке удаляют плакирующий слой на ширину 10 мм от края. Это необходимо для того, чтобы аустенитный материал плакирующего слоя не попадал при сварке в перлитный материал основной трубы, что может привести к образованию трещин.

Перед сборкой следует проконтролировать состояние кромок с визуальным и радиографическим методом. Визуальный контроль выполняют на 100 % кромок. Если по его результатам появились сомнения в состоянии кромок, следует провести радиографический контроль.

В случае обнаружения дефектов на кромках труб их исправление берёт на себя завод-изготовитель. Исправление дефектов проводят дуговой наплавкой с последующей механической обработкой. При наплавке может быть применена ручная дуговая сварка или аргонодуговая сварка неплавящимся электродом. В качестве наплавочных материалов должны применяться такие же материалы, что и для сварки труб. При этом допустимая глубина исправляемого дефекта не должна превышать 3 мм.

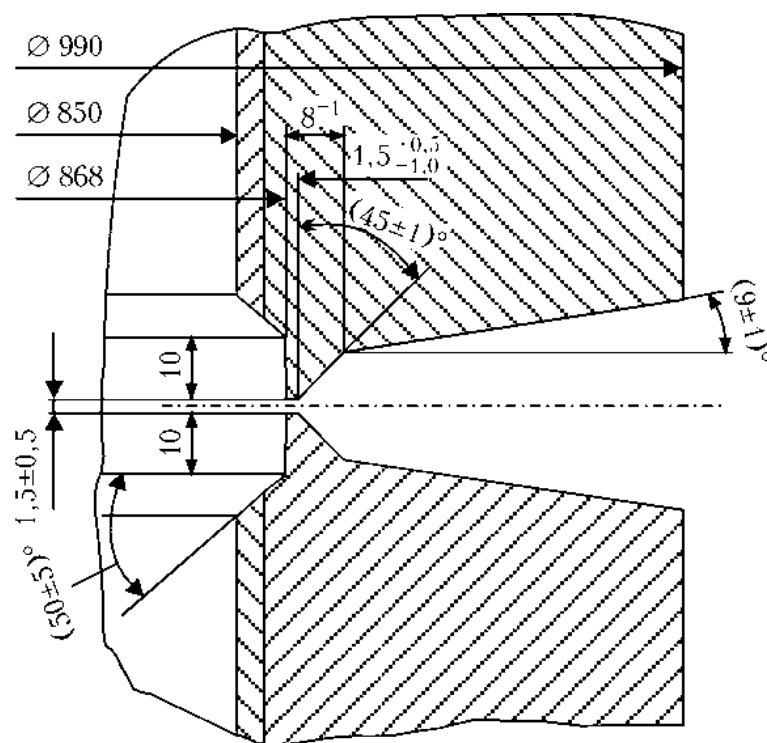


Рисунок 5 – Форма разделки кромок стыкового соединения трубопровода с условным проходным диаметром 850 мм из плакированной стали

После проведения входного контроля труб и контроля состояния кромок можно приступать к сборке стыка трубопровода. Для этого рекомендовано использовать инвентарные приспособления, к которым относят центраторы и стяжки, их применение позволяет обеспечить необходимую точность сборки под сварку.

На рисунке 6 представлен процесс сборки труб с применением временного приспособления. Уголки приспособления должны привариваться к трубе на расстоянии не менее 60 мм от кромки. Для соединения временных приспособлений применяется ручная аргодуговая сварка неплавящимся электродом. В качестве присадочной проволоки должна применяться такая же проволока, что и для сварки труб.

При сборке используется четыре приварных стяжки, которые следует равномерно расположить по периметру трубы. При удалении привариваемых временных приспособлений должны применяться механические способы с полной зачисткой заподлицо с поверхностью трубы и последующим контролем визуальным и капиллярным.

Разрешается приварка к трубам деталей крепления, к которым относят опоры, подвески, упоры и т.д. При этом деталь крепления должна быть выполнена из стали того же структурного класса, что и элемент трубопровода, к которому выполняется приварка.

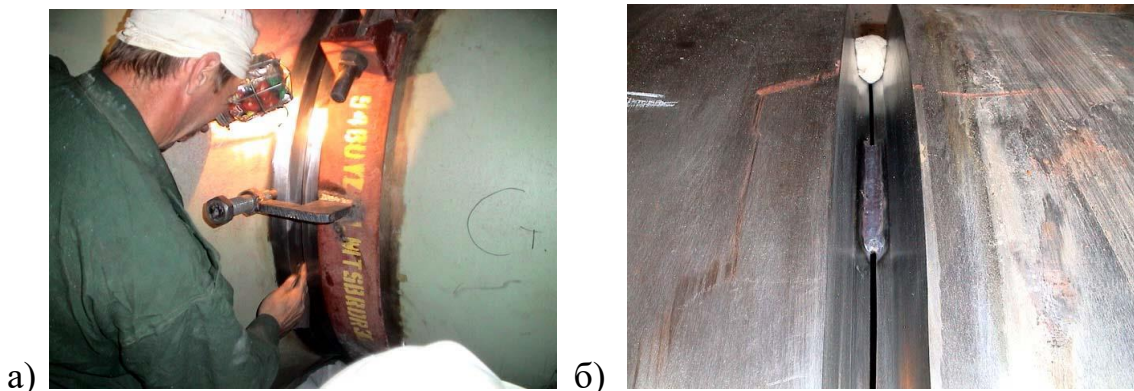


Рисунок 6 – Сборка труб под сварку (а) и выполнение прихваток

К сварке и прихватке соединений трубопроводов допускаются сварщики, прошедшие аттестацию на право выполнения сварочных работ в соответствии с требованиями «Правил аттестации сварщиков оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПН АЭ Г-7-003-87» и получившие «Удостоверение сварщика» установленной формы.

Для выполнения прихваток привлекается тот же сварщик, который будет выполнять заварку стыка. В порядке исключения прихватки может выполнять другой сварщик, но также должен быть аттестован и допущен к проведению сварочных работ на АЭС.

Перед выполнением прихваток следует провести предварительный подогрев до температуры 220...250 °С.

Прихватки и корневые швы выполняют аргонодуговой сваркой с присадкой сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 2...3 мм. В качестве защитного газа применяется аргон высшего или первого сорта. Для сварки в качестве источника питания применяется MasterTIG-2500, который представлен на рисунке 7-а. В качестве горелки используется горелка «Искра 200СМ», представленная на рисунке 7-б.



Рисунок 7 – Оборудование для аргодуговой сварки неплавящимся электродом: источник питания MasterTIG-2500 (а), сварочная горелка «Искра» (б)

При сборке труб допускается смещение кромок до 1 мм. Зазор в стыке должен составлять 2...4 мм.

Перед выполнением прихваток следует обработать зачищенные кромки ацетоном или уайт-спиритом.

Прихватки должны быть равномерно распределены по периметру стыка. Не допускается выполнение прихваток в месте пересечения продольного и поперечного швов на трубах. Прихватки следует выполнять с полным проплавом. Прихватки следует располагать через каждые 300...400 мм, длина прихватки должна быть 50...80 мм. На рисунке 6-б представлен внешний вид выполненных прихваток.

К качеству выполнения прихваток предъявляются такие же требования, как и к сварному шву. Оценку качества выполнения прихваток следует проводить посредством визуального контроля. В случае обнаружения в прихватке недопустимых дефектов (поры, трещины, раковины, кратеры и т.д.) следует полностью зачистить прихватку и заварить её вновь.

После того, как выполнили сборку и прихватку труб, следует провести визуально-измерительный контроль. При этом следует контролировать:

- чистоту поверхности основного металла и кромок;
- зазоры в соединении;
- смещение кромок;



- правильность сборки деталей и их закрепление;
- качество прихваток и правильность их выполнения;
- правильность установки временных креплений;
- перелом осей соединяемых деталей;

Для контроля перелома осей применяется металлическая линейка длиной 400 мм и щуп. Просвет между линейкой и поверхностью трубы на расстоянии 200 мм от стыка не должен превышать 1,5 мм.

Смещение кромок не должно превышать 5 мм.

После сборки стык следует укрыть хлопчатобумажной тканью для предотвращения попадания на поверхность влаги и загрязнений. Собранный стык представлен на рисунке 8. При этом после прихватки и сваркой не должно проходить более одной смены. Самым оптимальным является начало сварки сразу же после выполнения и контроля прихваток.

В соответствии с нормативной документацией допускается вести сварку корневого слоя шва без предварительного подогрева, если сварка выполняется ручная аргонодуговая неплавящимся электродом. Исходя из этого, при выполнении корневого слоя шва предварительный подогрев не выполняют.

При выполнении аргонодуговой сварки зажигание дуги и прогрев неплавящегося электрода следует выполнять на разделке кромок, ранее наплавленном металле и графитовой пластине. Зажигать дугу на поверхности труб не допускается. В случае обрыва дуги необходимо выполнить механическую обработку кратера, повторное зажигание дуги следует выполнять на ранее наплавленном металле, отступив на 5...15 мм.

При аргонодуговой сварке толщина наплавляемого валика не должна превышать 4 мм, а ширина валика должна быть не более 15 мм. Внешний вид корневого слоя шва представлен на рисунке 9.

Сварку выполняют по четвертям обратноступенчатым способом при длине ступени 150...200 мм, направление сварки «снизу вверх». Схема

выполнения сварки представлена на рисунке 10. Сварку ведут одновременно два сварщика в диаметрально противоположных четвертях.

Сварку корневого шва следует начинать на участке с минимальным зазором. Запрещено начинать сварку на прихватке. При выполнении корневого слоя шва прихватки следует переплавлять.

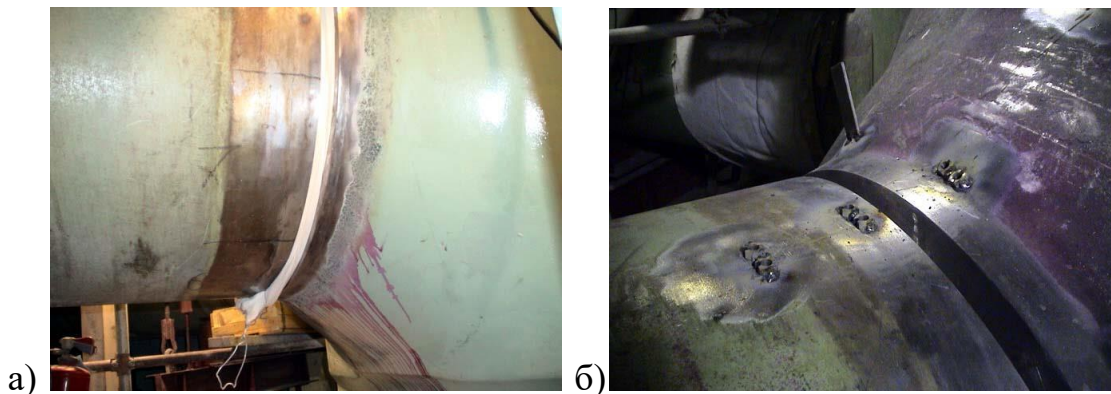


Рисунок 8 – Собранный стык, подготовленный под сварку (а) удаление временных приспособлений (б)



Рисунок 9 – Корневой слой шва

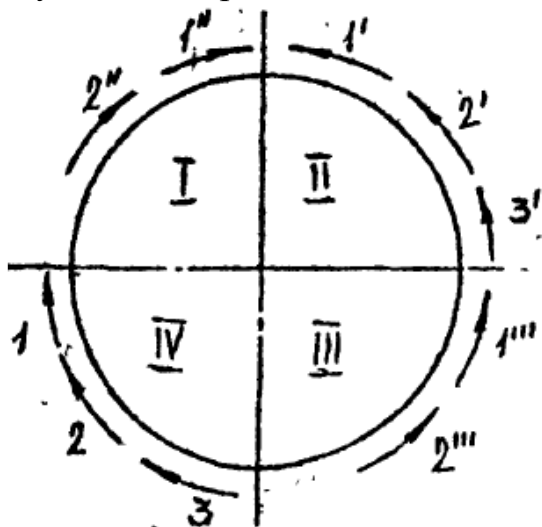


Рисунок 10 – Порядок выполнения корневого слоя шва

Аргодуговую сварку неплавящимся электродом ведут на постоянном токе прямой полярности. Сварку ведут как непрерывной дугой, так и с применением импульсной дуги. Применение импульсной дуги с поперечными колебаниями позволяет повысить качество выполнения швов.

При выполнении аргодуговой сварки следует устанавливать минимальную величину сварочного тока, которая обеспечивает выполнение корневого слоя шва с надлежащим качеством. Диаметр неплавящегося электрода составляет 3 мм, диаметр присадочной проволоки 2 мм. Сила тока составляет 80...100 А. Сварку ведут со скоростью 2...3 метра в час. Расход защитного газа принимают 6...8 литров в минуту.

После выполнения сварки корневого слоя шва проводят его визуальный контроль.

Перед заполнением разделки проводят предварительный подогрев стыка труб. Температура предварительного подогрева составляет 220...250 °С. Для контроля температуры подогрева применяется контактная термопара ТК-5. Ширина зоны предварительного подогрева для труб толщиной 60 мм и 70 мм составляет 200 мм. Для предварительного подогрева применяется индукционный нагрев.

Предварительный подогрев и термическую обработку стыка выполняем применением установки индукционного нагрева производства «Унитех», которая представлена на рисунке 11.

В качестве источника питания для индукционного нагрева применим сварочный трансформатор ТДМ-501, который представлен на рисунке 12.

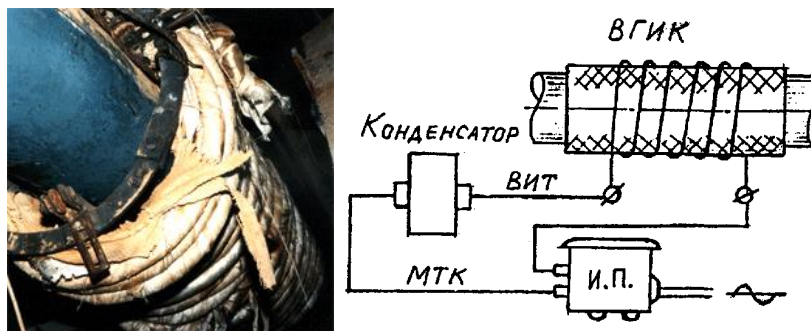


Рисунок 11 – Установка индукционного нагрева стыков труб



Рисунок 12 – Сварочный трансформатор ТДМ-501

Заполнение разделки проводится ручной дуговой сваркой покрытыми электродами ПТ-30 диаметром 4 мм. Для питания сварочной дуги применяется сварочный выпрямитель с падающей характеристикой ВД-306, представленный на рисунке 13.

Сварку ведут на постоянном токе обратной полярности. При выполнении вертикального стыка сварку ведут слоями. При выполнении горизонтального стыка сварку ведут слоями из отдельных валиков шириной до трёх диаметров электрода, при этом первым следует сваривать валик у нижней кромки. Порядок выполнения сварки вертикального стыка приведён на рисунке 9. Заполнение разделки ведут одновременно два сварщика.

Сварку следует вести на дуге с минимальной длиной, что позволяет уменьшить разбрызгивание и выгорание легирующих элементов.



Рисунок 13 – Сварочный выпрямитель ВД-306

При заполнении разделки задаётся сварочный ток силой 140...170 А. При сварке следует следить за температурой стыка, которая не должна опускаться ниже 220 °С.

При сварке следует тщательно заплавлять кратеры. Сварку следует вести без перерывов. В случае вынужденного прекращения сварки следует накрыть стык листовым асбестом, обеспечивая его равномерное остывание. При возобновлении сварки следует провести ультразвуковой контроль и предварительный подогрев.

Между выполнением корневого слоя шва и заполнением разделки не должно проходить более одних суток. В порядке исключения этот срок может быть увеличен до трёх суток, но при этом требуется проведение радиографического контроля корня шва перед заполнением разделки.

После выполнения сварки стыка до проведения его термической обработки стык должен находиться в состоянии «термического отдыха» при котором температура в стыке лежит в диапазоне 150...250 °С в течение 8 часов.

Температура отпуска составляет 650 °С. Ширина зоны нагрева составляет 250 мм в обе стороны от стыка. Продолжительность отпуска составляет 6 часов. При этом суммарная продолжительность отпусков с учётом исправления дефектов не должна превышать 45 часов согласно ГОСТ Р 58721-2019. Однако в работе [18] показано, что увеличение суммарной продолжительности отпуска при сварке толстостенных трубопроводов из стали 10ГН2МФА до 75 часов не приведён к ухудшению эксплуатационных свойств основного и наплавленного металла.

После проведения термической обработки и остывания стыка проводят его приемочный контроль. Предусмотрено проведение визуального контроля 100%, капиллярного контроля 100 %, радиографического 100 %.

Для проведения визуального контроля применяется набор, который представлен на рисунке 14 и включает в себя: металлические линейки, штангенциркуль с глубиномером, универсальный шаблон сварщика, набор

луп, фонарик, инструкцию РД 03-606-03, металлический угольник, щупы и радиусные шаблоны, маркер по металлу.



Рисунок 14 – Набор для проведения визуального контроля

Трещины, отслоения, прожоги, свищи, наплывы, усадочные раковины, подрезы, брызги металла, непровары, скопления и неодионые включения, выявленные при визуальном контроле, не допускаются. При контроле состояния поверхности сварного шва максимальная глубина (высота) между валиками и чешуйчатость допускается не более 1,2 мм. Выпуклость корня сварного шва при односторонней сварки без подкладного кольца должна быть не больше 2,5 мм.

Все выявленные дефекты при визуальном и измерительном контроле должны быть исправлены до проведения контроля другими методами.

Для проведения капиллярного контроля применяется набор «Клевер», в состав которого входит очиститель КЛ, пенетрант ПК и проявитель ДП, которые представлены на рисунке 15-а. Система капиллярного контроля «Клевер» позволяет выявлять дефекты с шириной раскрытия до 1 мкм. Материалы, которые входят в набор, не являются токсичными, не обладают коррозионной активностью и могут быть использованы для широкого класса материалов. Производство материалов набора «Клевер» в Российской Федерации позволяет реализовать программу замещения импорта. Также для проведения капиллярного контроля применяется ультрафиолетовый светильник Zb-100F, который представлен на рисунке 15-б.



Рисунок 15 – Материалы и оборудование для капиллярного контроля: набор препаратов «Клевер» (а), светильник Zb-100F (б)

По результатам капиллярного контроля допустимый размер выявленного одиночного дефекта не должен превышать 1,5 мм. На протяжённости 100 мм в любую сторону допускается не более 4 включений. Включения размером менее 0,2 мм не учитываются.

Для проведения радиографического контроля применяется аппарат рентгеновского контроля «Арион-600», представленный на рисунке 16.



Рисунок 16 – Комплектация аппарата импульсного рентгеновского контроля «Арион-600»

Аппарат «Арион-600» позволяет выполнять радиографический контроль стыков стальных трубопроводов толщиной стенки до 110 мм. В комплект аппарата входит высоковольтный блок, пульт управления, высоковольтный соединительный кабель, аккумулятор, зарядное устройство, пульт дистанционного управления, сумка для переноски, лампа-вспышка, ЗИП комплект.

Рабочее напряжение на аноде рентгеновской трубки составляет 600 кВ. Длительность рентгеновского импульса составляет 1,5 мс. Гарантийный срок службы аппарата составляет не менее 500 тысяч импульсов. Напряжение питания аппарата 220 В.

По результатам радиографического контроля допускается наличие одиночных включений размером до 3,5 мм. На протяженности 100 мм в любом направлении допускается наличие не более 22 дефектов при суммарной площади не более 56 мм<sup>2</sup>. Одиночные крупные включения длиной до 10 мм и шириной до 3,5 мм допускаются в количестве не более 2 штук на 100 мм длины в любом направлении.

Применение РДС и РАДС при соединении элементов ГЦТ Ду 850 с коллекторами парогенераторов, относящихся к I категории сварных соединений оборудования и трубопроводов группы А, связано не только со значительными трудозатратами и длительным циклом сварочных работ, но и с необходимостью обеспечения требуемого качества сварных соединений [1]. В связи с этим целесообразно для выполнения указанных соединений использовать механизированную и автоматическую сварку.

Традиционная РАДС по сравнению с другими способами сварки является процессом с низкой производительностью. Однако этот способ сварки имеет свои преимущества, например, высокое качество сварного шва, отсутствие шлака и окисления на поверхности шва. При этом по таким показателям, как плотность металла шва и незначительное количество дефектов, этот способ сварки превосходит большинство традиционных, имеющих более высокую производительность наплавки. Благодаря стабильности и возможности безопасной работы в различных условиях РАДС можно легко автоматизировать и механизировать. В случае необходимости обеспечения высокого уровня механических свойств металла шва применяют автоматическую аргонодуговую сварку (ААРДС) [15], [16].



## 1.4 Формулировка задач выпускной квалификационной работы

В настоящей выпускной квалификационной работе поставлена цель – повышение эффективности сварочных работ при строительстве главного циркуляционного трубопровода атомных станций.

При анализе особенностей конструкции, эксплуатации и материала главного циркуляционного трубопровода обозначены главные проблемы при его сварке.

Базовая технология сборки и сварки циркуляционного трубопровода предусматривает применение ручной дуговой сварки и ручной аргонодуговой сварки неплавящимся электродом. При этом корневой слой шва высотой 6...8 мм выполняется аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом без подогрева, а заполнение разделки выполняют ручной дуговой сваркой электродами марки ПТ-300 с предварительным и сопутствующим подогревом.

Сформулированы недостатки базовой технологии. Первым недостатком является малая производительность ручной дуговой сварки, которая не может быть повышена за счёт форсирования режимов или применения новых сварочных электродов. Вторым недостатком является вредность условий труда сварщика, которому приходится работать в атмосфере сварочного аэрозоля и излучения от дуги. Третьим недостатком следует указать увеличение расхода сварочных материалов из-за затрат на огарки, кроме того, необходимость прерывания горения дуги при смене электрода приводит к снижению производительности и качества сварки. Четвёртым недостатком является малая стабильность качества сварки, имеющая прямую зависимость от квалификации сварщика.

На основании предварительного анализа источников научно-технической информации по вопросы повышения эффективности сварки толстостенных трубопроводов из перлитных сталей сделан вывод о высокой

перспективности автоматической аргодуговой сварки при заполнении разделки стыка.

На основании вышеизложенного следует сформулировать задачи выпускной квалификационной работы.

Первой задачей является обоснование выбора способа сварки стыков главного циркуляционного трубопровода. В ходе её решения предстоит выполнить анализ преимуществ и недостатков альтернативных способов сварки неповоротных стыков трубопроводов на атомных станциях, дать им экспертную оценку по экономическим и технологическим критериям.

Второй задачей является повышение эффективности выбранного способа сварки. В ходе её решения следует рассмотреть предлагаемые современными исследователями решения для расширения технологических возможностей выбранного способа сварки.

Третьей задачей является построение проектной технологии сборки и сварки главного циркуляционного трубопровода атомных станций. В ходе её решения предстоит составить карту технологического процесса, в которую следует внести перечень операций, применяемое оборудование и параметры режима. Для каждой операции следует указать технологические требования.

После выполнения перечисленных выше задач исполнительского блока воспоследует оценочный блок, в котором предстоит провести оценку экологичности и промышленной безопасности предлагаемых решений в соответствии с методикой [2], [3]. Также необходимо провести рассчитать и сравнить экономические показатели базовой и проектной технологии [8], [9], по результатам чего сделать вывод о целесообразности внедрения предлагаемых решений в производство.

## **2 Построение проектной технологии сварки главного циркуляционного трубопровода**

### **2.1 Механизация и автоматизация сварки стыков главного циркуляционного трубопровода**

В настоящий момент количество стыков на главных циркуляционных трубопроводах атомных станций, которые выполнены с применением ручной дуговой сварки, составляет порядка десяти тысяч. Однако недостатки ручной дуговой сварки заставляют вести поиск способов автоматизации и механизации сварочных работ. За рубежом при сварке и ремонте трубопроводов главного контура из аустенитных сталей автоматическая аргонодуговая сварка применяется с начала 80-х годов [23]. Применительно к биметаллическим трубопроводам из стали 10ГН2МФА с покрытием из аустенитной стали эти технологии до недавнего времени не применялись.

В Советском Союзе с конца 80-х годов велись разработки способов автоматической сварки стыков трубопроводов с условным диаметром Ду 850 мм главных циркуляционных трубопроводов атомных станций. Результатом этих работ стала установка АДГ-301, которая была разработана ВНИИЭСО. Для сварки стали 10ГН2МФА была разработана специальная сварочная проволока Св-08Г1СН1МА. Было получено разрешение ГОСПРОМАТОМНАДЗОРА на выполнение автоматической аргонодуговой сварки неплавящимся электродом стыков трубопроводов с реакторами ВВЭР-1000 [1].

В 90-е годы в Украине разработки автоматической сварки толстостенных трубопроводов атомных станций велись в ИЭС им. Е. О. Патона, разработаны технологии сварки как стандартную, так и в узкую разделку [20], [21], которые представлены на рисунке 17. Сварку проводили на Чернобыльской АЭС с использованием специализированных сварочных автоматов производства фирмы «Polysoude» (Франция).

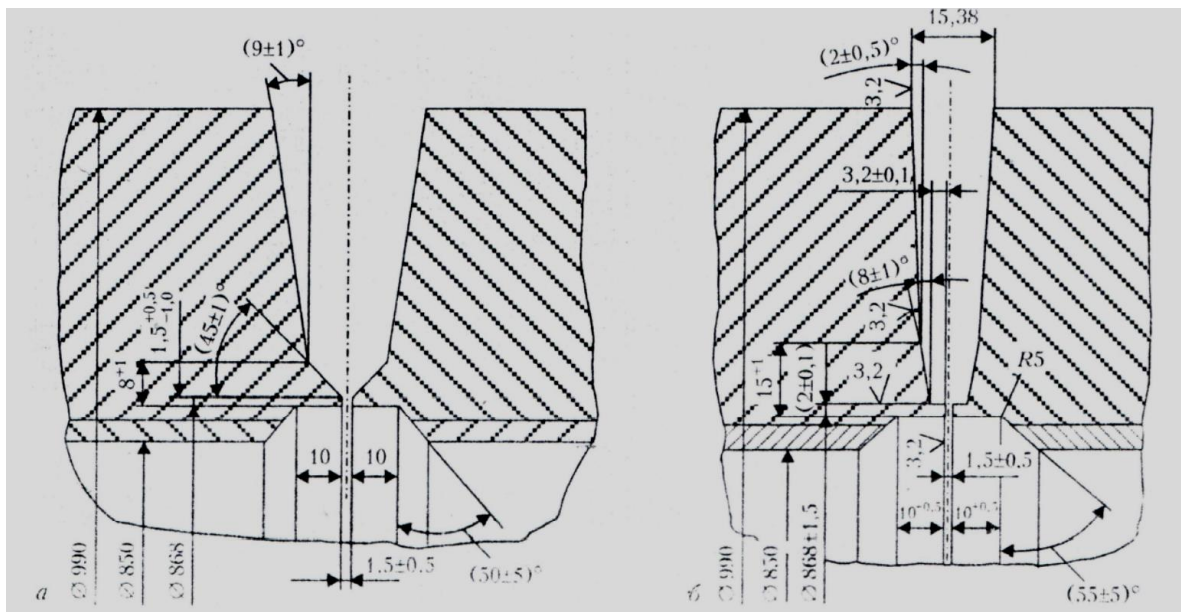


Рисунок 17 – Схема стандартной (а) и узкой (б) разделки трубопровода

Начиная с 2010 года в Российской Федерации отмечается рост количества сооружаемых атомных энергоблоков, в связи с чем начались активные разработки технологии автоматической сварки стыков трубопроводов с условным диаметром Ду 850 мм. При разработке такой технологии следует учитывать склонность стали 10ГН2МФА к образованию пористости в металле сварного шва. Причины такой пористости до конца не изучены, но предполагается, что существенную роль играет недостаток элементов-раскислителей Si и Mn.

Ещё одной трудностью при переходе на автоматическую аргонодуговую сварку неплавящимся электродом является снижение производительности по сравнению с ручной дуговой сваркой покрытыми электродами. Для повышения производительности может быть применено несколько способов.

Первый способ предусматривает использование сварки в узкую разделку, которая отличается от стандартной заводской разделки труб. Второй способ предусматривает применение технологии «горячая проволока» (Hot Wire). Третий способ предусматривает одновременную сварку несколькими сварочными головками. Четвёртый способ предусматривает повышение сварочного тока.

## 2.2 Обоснование выбора защитного газа и сварочной проволоки

При сварке неплавящимся электродом в инертных газах наиболее широко применяют аргон, гелий и их смеси [17], [24], [25]. С целью поиска оптимальной газовой защиты для автоматической аргонодуговой сварки неплавящимся электродом стали 10ГН2МФА со сварочной проволокой Св-08Г1НМА опробовали несколько вариантов [20]:

- чистый аргон,
- 70 % аргон + 30 % гелий,
- 50 % аргон + 50 % гелий,
- 30 % аргон + 70 % гелий.

При всех указанных вариантах газовой защиты обеспечивается стабильность дуги и высокое качество сварных швов. Однако при сварке в стандартную разделку в чистом аргоне защита дуги и сварочной ванны от воздуха более надежна, чем при использовании смеси гелия и аргона. Высокое содержание гелия в смеси приводит к повышению напряжения на дуге, в результате повышается температура сварочной ванны и как следствие увеличивается проплавление основного металла, а также жидкотекучесть сварочной ванны, что требует повышенного (до 1800 л/ч) расхода газовой смеси и способствует выгоранию легирующих элементов.

Анализ различных вариантов газовой защиты показал, что наиболее приемлемым для сварки стандартной разделки является чистый аргон. Этот выбор связан в первую очередь с надежностью защиты в чистом аргоне. Применение же гелия приводит к повышению жидкотекучести при сварке. При сварке в узкощелевую разделку для гарантированного сплавления наплавленного металла с кромками разделки целесообразнее применять смесь 30 % аргона + 70 % гелия или 50 % аргона + 50 % гелия [27].

Для аргонодуговой сварки стали 10ГН2МФА рекомендуется применять сварочную проволоку марки Св-10ГНМА, содержащую кремния не менее 0,22 мас. %. Технические условия ТУ 14-1-2869-79 на указанную проволоку

ограничивают содержание в ней кремния (не более 0,30 мас. %). При этом исключить возможность образования пористости в сварных швах при аргонодуговой сварке можно только при использовании сварочной проволоки с содержанием кремния 0,26...0,30 мас. % [1].

Поскольку указанная сварочная проволока в основном предназначена для сварки под флюсом, указанное содержание кремния в ней встречается крайне редко.

В связи с изложенным выше для обеспечения качества и требуемых свойств сварных соединений элементов ГЦТ Ду 850 из плакированной стали 10ГН2МФА, полученных ААрДС, требуется стандартная сварочная проволока с аналогичной системой легирования и содержанием кремния не менее 0,26...0,30 мас. %. В ходе маркетингового поиска такой сварочной проволоки сопоставляли сварочные проволоки-аналоги производства различных фирм, их химический состав и механические свойства наплавленного металла. Полученные результаты показали, что при ААрДС целесообразно использовать сварочную проволоку Св-08Г1НМА производства фирмы «Кродекс», которая отличается от базовой марки Св-10ГНМА оптимальным (до 0,45 мас. %) содержанием кремния, повышенным (до 1,5 мас. %) марганца и пониженным (до 0,7 мас. %) никеля.

Оценивая химический состав проволоки Св-08Г1НМА (ТУ 14-15-373-95), необходимо отметить, что в процессе сварки создаются предпосылки для снижения вероятности образования пористости в наплавленном металле, повышения его трещиностойкости и обеспечения требуемого уровня механических свойств (превышающего уровень свойств базовой проволоки).

Проведены предварительные исследования возможности использования сварочной проволоки Св-08Г1НМА для ААрДС элементов трубопроводов из стали 10ГН2МФА. С этой целью выполнены работы по выбору оптимальной газовой защиты при сварке неплавящимся электродом со сварочной проволокой Св-08Г1НМА, изучению механических свойств металла шва сварных соединений стали 10ГН2МФА, оценке качества и

структуры металла шва и ЗТВ стали 10ГН2МФА с учетом требуемой послесварочной термической обработки. В таблице 2 представлено сравнительное содержание химических элементов в проволоке, основном металле и наплавленном металле при применении проволоки Св-08Г1НМА. В таблице 3 представлены механические свойства металла сварного шва при использовании проволоки Св-08Г1НМА.

Таблица 2 - Сравнительное содержание химических элементов в проволоке, основном металле и наплавленном металле при применении проволоки Св-08Г1НМА

| Объект исследования  | C    | Si   | Mn   | Cr   | Ni   | Mo   | V    | S     | P     |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Сталь 10ГН2МФА       | 0,13 | 0,24 | 1,29 | 0,24 | 1,09 | 0,48 | 0,07 | 0,011 | 0,019 |
| Проволока Св-08Г1НМА | 0,09 | 0,66 | 1,70 | 0,10 | 0,68 | 0,95 | 0,02 | -     | -     |
| Металл шва           | 0,05 | 0,38 | 1,31 | 0,06 | 0,68 | 0,60 | 0,02 | 0,011 | 0,019 |

Таблица 3 – Механические свойства металла сварного шва при использовании проволоки Св-08Г1НМА

| Объект исследования | T исп., °C | $\sigma_r$ , МПа | $\sigma_b$ , МПа | $\delta_5$ , % | $\psi$ , % |
|---------------------|------------|------------------|------------------|----------------|------------|
| Металл шва          | +20        | 447...495        | 628...648        | 20...26        | 75         |
|                     | +350       | 437...454        | 587...591        | 26...29        | 73         |
| Сталь 10ГН2МФА      | +20        | 594              | 694              | 16             | 46         |
|                     | +350       | 595              | 689              | 18             | 53         |
| Требования НТД      | +20        | 343              | 539              | 16             | 55         |
|                     | +350       | 294              | 490              | 14             | 50         |

На основании вышеизложенного для выполнения автоматической аргонодуговой сварки неплавящимся электродом предлагается использовать сварочную проволоку Св-08Г1НМА и защитный газ – аргон. Полученные свойства сварного соединения полностью соответствуют предъявляемым требованиям. Исследования макро- и микроструктуры сварных соединений показали, что в металле шва и в ЗТВ отсутствуют поры, трещины, несплавления, шлаковые включения и другие дефекты. Для металла шва и ЗТВ после сварки и термообработки в основном характерна бейнитная структура, а также незначительное содержание ферритно-перлитной составляющей. Это обеспечивает хорошие механические свойства сварных соединений и их сопротивляемость развитию трещин.

### 2.3 Описание операций проектного технологического процесса

Предлагается выполнять сварку стыка главного циркуляционного трубопровода внешним диаметром трубы 990 мм, толщиной стенки трубы 70 мм и условным диаметром Ду 850 мм. Материал трубопровода – плакированная сталь 10ГН2МФА.

Форма разделки труб под сварку принята стандартной и представлена на рисунке 18.

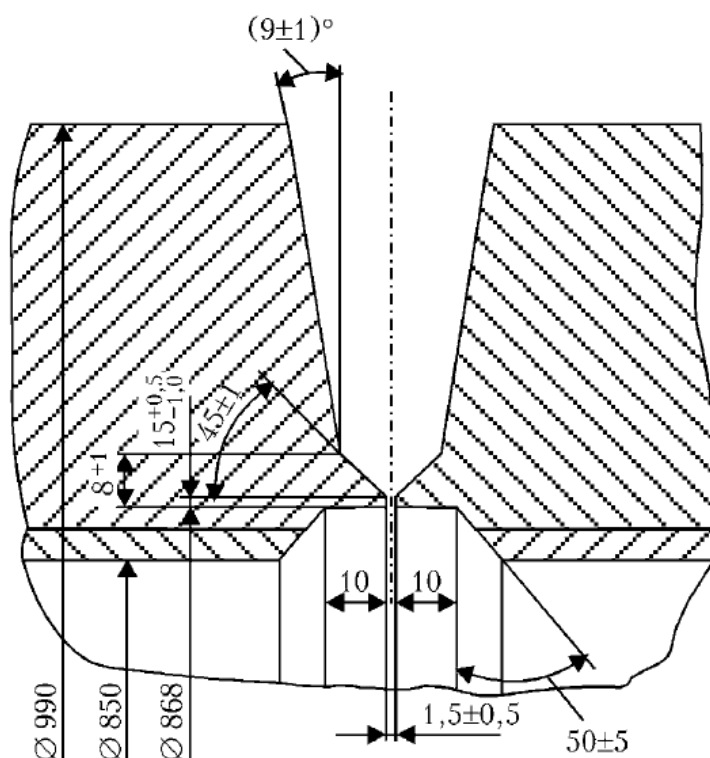


Рисунок 18 – Форма стандартной разделки под выполнение автоматической аргодуговой сварки неплавящимся электродом

Для сварки предлагается применять аппаратуру производства фирмы «Polysoude» (Франция) AutoTIG 600PC, представленную на рисунке 19.

Предварительный подогрев стыков под сварку выполняют с применением оборудования серии «Standart Europa», передвижной термостанции «WeldoTherm», которые представлены на рисунке 20. Температура предварительного подогрева составляет 150...200 °С, скорость повышения температуры должна быть не более 150 °С/час.





Рисунок 19 – Комплект оборудования AutoTIG 600PC для сварки стыков трубопроводов



Рисунок 20 - Оборудование серии «Standart Europa»: нагревательные элементы (а) и передвижная термостанция «WeldoTherm» (б)

Корневой слой шва предлагается выполнять вольфрамовым электродом ЭВТ-15 диаметром 3 мм с углом заточки 30°. Для того, чтобы сформировать требуемые размеры валика подачу присадочной проволоки предлагается вести в «хвост» ванны.

В таблице 4 представлены параметры режима сварки корневого слоя шва и последующих слоёв. В числителе показано значение параметров в импульсе сварочного тока, в знаменателе показаны значения параметров в паузе тока. Расход аргона составляет 20...25 л/мин.

Таблица 4 – Режимы автоматической импульсной аргодуговой сварки [26]

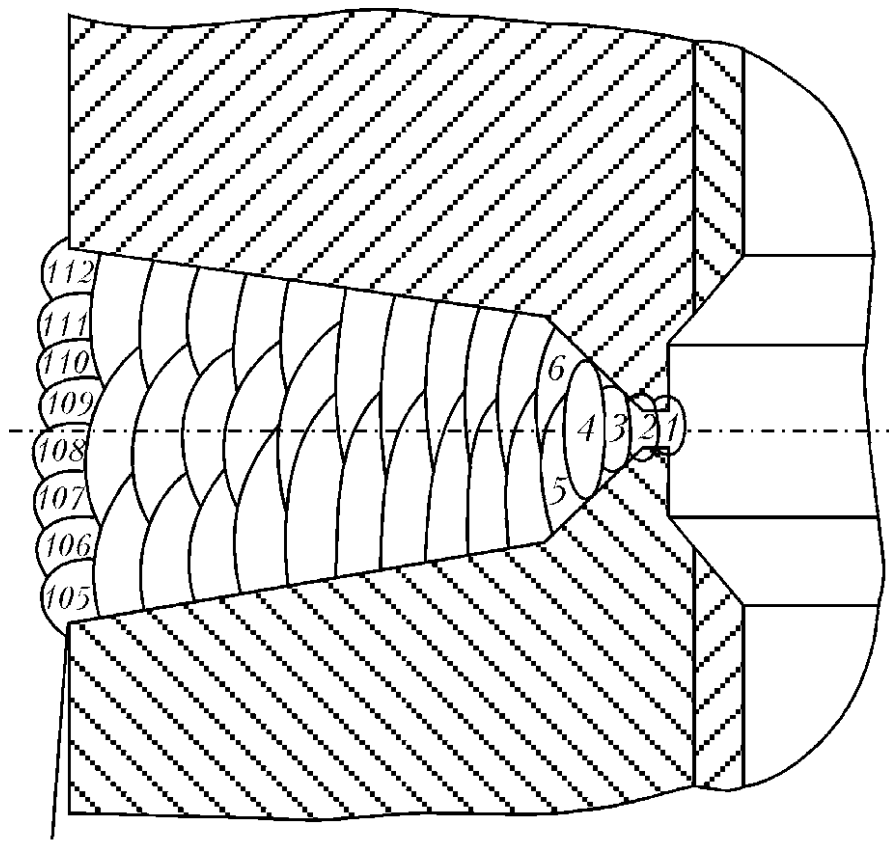
| Порядок заполнения    | $I_{св}$ , А | $U_d$ , В | $V_{св}$ , мм/мин | $V_{пр}$ мм/мин | $t_{и} / t_{п}$ , мс |
|-----------------------|--------------|-----------|-------------------|-----------------|----------------------|
| Корневой 1 «в хвост»  | 150/200      | 9,5       | 80                | 880/360         | 100/100              |
| Корневой 2 «в хвост»  | 160/90       | 10        | 86                | 880/360         | 100/100              |
| Корневой 3 «в голову» | 220/130      | 11        | 91                | 2000/1000       | 225/275              |
| Корневой 4 «в хвост»  | 250/150      | 11,5      | 89                | 2600/1300       | 225/275              |
| Заполняющий 5...8     | 300/180      | 11,5      | 89                | 3400/1620       | 225/275              |
| Заполняющий 9...104   | 340/200      | 12        | 110               | 3200/1620       | 225/275              |
| Усиления 105...112    | 260/110      | 11        | 80,3              | 1520/1000       | 175/325              |

При заполнении разделки подачу сварочной проволоки следует вести в «голову» сварочной ванны. На рисунке 21 показан порядок раскладки валиков. Перекрытие начала и конца прохода при сварке составляет 20...25 мм. В процессе заполнения разделки следует выполнять зачистку поверхности металла шва металлической щёткой и осуществлять внешний осмотр каждого прохода.

После окончания сварки следует провести термический отдых при температуре 150...250 °С в течение 6 часов.

Термическую обработку после сварки сварного шва после аргодуговой сварки предлагается не выполнять.

Исследовали макроструктуру контрольного сварного соединения. Использовали темплеты, вырезанные поперек сварного соединения. Изучали слоистое строение металла шва для выявления межслойных и межваликовых дефектов, а также кристаллическую макроструктуру металла швов для оценки их сплошности и однородности. Анализ макроструктуры металла сварного соединения на рисунке 22 показал, что в металле шва валики имеют однородное строение и приблизительно одинаковое сечение, а в ЗТВ постоянную ширину по всей высоте шва.



Линия зачистки усиления шва

Рисунок 21 – Схема раскладки валиков при сварке горизонтального стыка

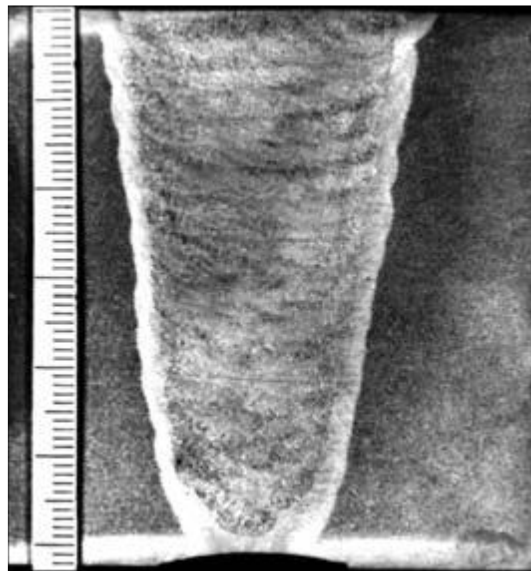


Рисунок 22 – Макроструктура контрольного сварного соединения

Это дает основание считать, что режим сварки на протяжении выполнения всего соединения был стабильный, дефектов между валиками и между слоями в металле шва, а также в зоне сплавления не выявлено, металл

шва плотный. Дефектов в виде трещин, нор, недопустимых скопления шлаковых включений и непроваров не обнаружено.

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что металл швов и ЗТВ удовлетворяет требованиям, предъявляемым к качеству сварных соединений.

Дальнейшее выполнение выпускной квалификационной работы предусматривает разработку оценочного блока [6] в котором предстоит оценить экологичность предложенных в работе решений и дать оценку на предмет обеспечения безопасности труда [2], [3].

Также при выполнении оценочного блока предстоит оценить возможный экономический эффект при внедрении предлагаемых решений в производство [8], [9].

### **3 Обеспечение безопасности и экологичности предлагаемых технических решений**

#### **3.1 Конструктивно-технологическая характеристика рассматриваемого объекта**

В настоящей выпускной квалификационной работе рассматривается вопрос повышения эффективности сварочных операций при выполнении сборки и сварки главного циркуляционного трубопровода атомных электростанций. Выполненный анализ состояния вопроса позволил обосновать выбор способа сварки, в качестве которого предлагается применить автоматическую аргодуговую сварку.

При осуществлении проектной технологии сварки предусматривается последовательное выполнение операций в соответствии с предлагаемым в работе технологическим процессом. Применение предлагаемых в настоящей выпускной квалификационной работе технических решений повлекло за собой изменение технологического. В свою очередь это может привести к возникновению новых опасных производственных факторов. Защита от этих факторов должна быть выполнена в настоящем разделе выпускной квалификационной работы.

Особенности выполнения операций проектного технологического процесса представлены в таблице 5. Первой операцией является подготовка кромок труб, которая выполняется с применением фаскосъемной машины и комплекта измерительных инструментов. Второй операцией является сборка и прихватка, которая выполняется с применением сборочных приспособлений, сварочного источника питания и газового оборудования. Третьей операцией является предварительный подогрев, который выполняется с использованием индукционных подогревателей стыка и термической станции. Четвёртой операцией является сварка, которая выполняется с применением сварочного источника питания, газового

оборудования и комплекта для автоматической сварки стыка. Пятой операцией является термическая обработка, которая выполняется с применением индукционных подогревателей стыка и термической станции. Шестой операцией является контроль качества, который выполняется с применением набора визуально-измерительного контроля, набора капиллярного контроля и рентгеновского аппарата.

Таблица 5 – Особенности выполнения операций проектного технологического процесса

| Наименование технологической операции в соответствии с проектным процессом | Привлекаемый для выполнения операции персонал | Перечень применяемого на операции технологического оборудования                              |
|--|---|--|
| подготовка кромок труб   | слесарь-сборщик                               | фаскосъёмная машина, комплект измерительного оборудования                                    |
| сборка и прихватка   | слесарь-сборщик, электросварщик               | сборочные приспособления, сварочный источник питания, газовое оборудование                   |
| предварительный подогрев   | Термист                                       | индукционные подогреватели стыка, термическая станция  |
| сварка   | Электросварщик                                | сварочный источник питания, газовое оборудование, комплект для автоматической сварки стыка   |
| термическая обработка  | термист                                       | индукционные подогреватели стыка, термическая станция  |
| контроль качества  | Дефектоскопист                                | набора визуально-измерительного контроля, набор капиллярного контроля, рентгеновский аппарат |

Представленные в таблице 5 особенности выполнения операций технологического процесса позволят в дальнейшем идентифицировать опасные производственные факторы и предложить методы защиты от них. Источниками негативных производственных факторов в рассматриваемом случае выступают: фаскосъёмная машина, комплект измерительного оборудования, сборочные приспособления, сварочный источник питания, газовое оборудование, индукционные подогреватели стыка, термическая станция, комплект для автоматической сварки стыка, набор капиллярного контроля, рентгеновский аппарат

### 3.2 Идентификация профессиональных и производственных рисков

Эксплуатация оборудования при выполнении операций проектного технологического процесса приводит к возникновению опасных и вредных производственных факторов. Наличие этих факторов обусловлено особенностями выполнения каждой операции технологического процесса, которые были рассмотрены выше. В таблице 6 представлены результаты идентификации возникающих профессиональных рисков.

Таблица 6 – Выявление и анализ источников возникновения производственных рисков

| Наименование операции в соответствии с проектным процессом | Формулировка вредного или опасного фактора, который возникает в процессе выполнения данной операции технологического процесса  |
|--|--|
| подготовка кромок труб                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- наличие на внешних поверхностях применяемого оборудования, приспособлений и инструмента острых кромок, заусенцев;</li> <li>- перемещающиеся в процессе выполнения подготовительной операции детали и узлы применяемого оборудования, приспособлений;</li> <li>- опасность замыкания на тело рабочего высокого напряжения, питающего производственное оборудование;</li> <li>- повышенная запылённость и загазованность воздуха рабочей зоны;</li> </ul>   |
| сборка и прихватка, сварка                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>– движущиеся машины и механизмы; подвижные части производственного оборудования,</li> <li>– повышенная запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны,</li> <li>– повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека,</li> <li>– повышенная температура поверхностей оборудования, материалов,</li> <li>– инфракрасное излучение в рабочей зоне сверх безопасных значений уровня инфракрасной радиации,</li> <li>– ультрафиолетовое излучение в рабочей зоне сверх безопасных значений</li> </ul> |
| предварительный подогрев, термическая обработка            | <ul style="list-style-type: none"> <li>– повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека,</li> <li>– повышенная температура поверхностей оборудования, материалов,</li> <li>– инфракрасное излучение в рабочей зоне сверх безопасных значений уровня инфракрасной радиации,</li> </ul>  |
| контроль качества  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- наличие на внешних поверхностях применяемого оборудования, приспособлений и инструмента острых кромок, заусенцев;</li> <li>– рентгеновское излучение в рабочей зоне сверх безопасных значений</li> </ul>  |

К опасным факторам следует отнести такие профессиональные риски, действие которых стать причиной резкого ухудшения состояния персонала или его гибели. К вредным факторам следует отнести такие профессиональные риски, действие которых может стать причиной возникновения профессиональных заболеваний.

Выявленные негативные факторы ранее возникали в других технологических процессах, являются известными и могут быть устранены.

Дальнейшие работы предусматривают обоснование выбора стандартных методик и технических средств. В крайнем случае, необходимо будет предусмотреть разработку специализированных методик.

### **3.3 Методики и технические средства для устранения профессиональных рисков**

Следует принимать во внимание, что при выполнении сварочных и наплавочных работ содержание вредных веществ в цехе превышает действующие санитарные нормы в 7...10 раз, что подтверждается рядом отечественных и зарубежных исследователей. Поэтому при организации рабочих мест сварщика следует особое внимание уделять общей и местной вентиляции. Также работа сварочных машин сопряжена с риском получения удара электрическим током, так как первичное напряжение на сварочных установках составляет 220 В или 380 В (для случая питания сварочной установки от трёх фаз).

В таблице 7 представлены необходимые мероприятия по защите персонала. Для обеспечения защиты персонала от возникающих негативных производственных факторов не требует разработки специальных методик и технических средств.

Индивидуальная защита работников обеспечивается также за счёт оснащения их средствами индивидуальной защиты.



Таблица 7 – Предлагаемые методики и технические средства для обеспечения производственной безопасности

| Формулировка вредного или опасного фактора, который возникает в процессе выполнения данной операции технологического процесса | Перечень организационных мероприятий и технических средств, обеспечивающих устранение вредного производственного фактора  | Средства индивидуальной защиты                   |
|---|---|--|
| 1) острые кромки, заусенцы и шероховатость на поверхностях заготовок, инструментов и оборудования                             | 1) организация и проведение периодического инструктажа работников на предмет соблюдения техники безопасности<br>2) оснащение рабочих мест предупреждающими плакатами и табличками                       | Специальная одежда, перчатки, защитные очки      |
| 2) движущиеся машины и механизмы; подвижные части производственного оборудования  | 1) оснащение рабочих мест предупреждающими плакатами и табличками<br>2) устройства защитного отключения привода станков<br>3) ограничение проникновения персонала в опасную зону применением ограждений | Специальная одежда, перчатки, защитные очки      |
| 3) повышенная запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны  | устройства местного удаления загрязненного воздуха и общеобменной вентиляции  | Индивидуальные средства защиты дыхательных путей |
| 4) повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека                 | 1) контроль изоляции и заземления<br>2) организация и проведение периодического инструктажа работников на предмет соблюдения техники безопасности<br>3) защитное заземление, защитное отключение        | Специальная одежда, перчатки, резиновые коврики  |
| 5) повышенная температура поверхностей оборудования, материалов   | 1) организация и проведение периодического инструктажа работников на предмет соблюдения техники безопасности<br>2) оснащение рабочих мест предупреждающими плакатами и табличками                       | Специальная одежда, перчатки                     |
| 6) инфракрасное излучение в рабочей зоне сверх безопасных значений уровня инфракрасной радиации                               | 1) ограничение проникновения персонала в опасную зону применением ограждений<br>2) защитные экраны  | Специальная одежда, перчатки, защитные маски     |
| 7) ультрафиолетовое излучение в рабочей зоне сверх безопасных значений  | 1) ограничение проникновения персонала в опасную зону применением ограждений<br>2) защитные экраны  | Специальная одежда, перчатки, защитные маски     |

Для обеспечения защиты персонала от возникающих негативных производственных факторов не требует разработки специальных методик и технических средств. Индивидуальная защита работников обеспечивается также за счёт оснащения их средствами индивидуальной защиты: специальная одежда, перчатки, защитные очки, индивидуальные средства защиты дыхательных путей, резиновые коврики.

### 3.4 Пожарная безопасность рассматриваемого технологического объекта

Проведение работ по сварке и наплавке связано с нагревом до высокой температуры, наличием брызг расплавленного металла и светового излучения высокой интенсивности. В результате этого функционирование рассматриваемого в настоящей выпускной квалификационной работе технического объекта связано с риском возникновения пожара. Для защиты предприятия от возможного возникновения пожара следует идентифицировать опасные факторы возможного пожара на рассматриваемом производственном участке, что показано в таблице 8. Анализ данных в таблице 8 позволяет установить, что возможный пожар, который может произойти на рассматриваемом производственном участке, относится к классу «Е». Этот класс пожара предполагает горение материалов и веществ при наличии опасного напряжения.

Таблица 8 – Идентификация классов и опасных факторов пожара

|  |  |
|--|--|
| Наименование участка                           | Участок, на котором осуществляется сборка и сварка   |
| Наименование оборудования                      | сварочное оборудование, сборочное оборудование, станки для механической обработки,   |
| Классификация по виду горящего вещества        | пожары, которые происходят за счет воспламенения и горения веществ и материалов на электроустановках, запитанных электрическим напряжением (Е)   |
| Наименование основных опасных факторов пожара  | Резкое повышение температуры на участке и вокруг него; выделение при горении токсичных продуктов и угарного газа; выделение аэрозолей, снижающих видимость на участке и вокруг него.               |
| Наименование вторичных опасных факторов пожара | Короткие замыкания на оборудовании, запитанном высоким электрическим напряжением; действие на людей, находящихся в районе возгорания продуктов разложения составов, используемых для пожаротушения |

Основными негативными факторами возможного пожара являются тепловой поток, разлетающиеся искры, повышенная температура воздуха, открытое пламя, токсические продукты термического разложения и горения, плохая видимость вследствие задымления, снижение концентрации

кислорода в воздухе. Кроме основных факторов пожара следует указать на сопутствующие проявления пожара, к которым относят нарушение целостности изоляции и порчу электрического оборудования, отравление персонала используемыми при тушении химическими веществами, порчу оборудования используемыми при тушении химическими веществами.

. В таблице 9 приведены технические средства по устранению основных и сопутствующих факторов пожара.

Таблица 9 – Технические средства, обеспечивающие устранение опасных факторов при пожаре

|   |  |
|---|--|
| Первичные средства пожаротушения                            | Емкость с песком, переносные углекислотные огнетушители.                           |
| Мобильные средства пожаротушения                            | Специализированные расчеты (вызываются)  |
| Стационарные установки системы пожаротушения                | Нет необходимости  |
| Средства пожарной автоматики                                | Установки пожарной сигнализации, пожарного оповещения                              |
| Пожарное оборудование                                       | Пожарный кран  |
| Средства индивидуальной защиты и спасения людей при пожаре  | План эвакуации   |
| Пожарный инструмент (механизированный и немеханизированный) | Ведро конусное, лом, лопата штыковая   |
| Пожарные сигнализация, связь и оповещение                   | Кнопка оповещения, звуковые оповещатели, речевые оповещатели, световые оповещатели |

В качестве первичных средств тушения применяются: огнетушители, ящик с песком, кошма. В качестве средств индивидуальной защиты применяется план эвакуации.

В качестве пожарного инструмента применяется топор, багор и лопата. В качестве средств оповещения применяются речевые, световые и звуковые оповещатели.

Предложенные в настоящем разделе технические средства и мероприятия позволяют максимально снизить риск возникновения пожара и своевременно устранить негативные факторы при его возникновении.

### 3.5 Вопросы обеспечения экологической безопасности

Реализация предлагаемых в настоящей выпускной квалификационной работе технических решений приводит к возникновению негативного антропогенного действия на окружающую среду. При этом следует обеспечить защиты основных элементов нашего ареала обитания: атмосферы, гидросферы и литосферы от негативного воздействия, которое возникает при выполнении операций проектного технологического процесса. На основании анализа операций технологического процесса могут быть предложены технические средства и организационные мероприятия, применение которых позволит устранить влияние на окружающую среду негативного антропогенного фактора или уменьшить его влияние до приемлемого уровня. Предлагаемые средства для этого представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Предложенные мероприятия по уменьшению антропогенного действия на окружающую среду при реализации проектной технологии

|                      |  |
|----------------------|--|
| Наименование объекта | Производственный участок сборки и сварки с установленным на нём технологическим оборудованием  |
| Атмосфера            | Установка в вентиляционную систему цеха специальных улавливающих фильтров, обеспечивающих задержку выделяющихся при сварке и работе оборудования вредных веществ   |
| Гидросфера           | Обеспечить отсутствие протечек масла из гидравлических систем применяемого оборудования. В случае обнаружения таких протечек своевременно их устранять   |
| Литосфера            | Размещение на территории предприятия специализированных емкостей для селективного сбора производственного мусора. Проведение инструктажа работников на предмет соблюдения мероприятий по сбору промышленного мусора и отходов. |

Особое внимание следует уделить организации селективного сбора мусора, который в значительных количествах накапливается на производственных участках. Раздельный сбор отходов позволяет выполнять эффективный рециклинг, что не только уменьшает нагрузку на окружающую среду, но и позволяет получать значительный экономический эффект за счёт экономии ресурсов.

## **4 Экономическое обоснование предлагаемых в выпускной квалификационной работе решений**

### **4.1 Анализ исходной информации по базовой и проектной технологиям**

В настоящей выпускной квалификационной работе рассматривается вопрос повышения эффективности сварочных операций при выполнении сборки и сварки главного циркуляционного трубопровода атомных электростанций. Выполненный анализ состояния вопроса позволил обосновать выбор способа сварки, в качестве которого предлагается применить автоматическую аргодуговую сварку.

Первой операцией является подготовка кромок труб, которая выполняется с применением фаскосъемной машины и комплекта измерительных инструментов. Второй операцией является сборка и прихватка, которая выполняется с применением сборочных приспособлений, сварочного источника питания и газового оборудования. Третьей операцией является предварительный подогрев, который выполняется с использованием индукционных подогревателей стыка и термической станции. Четвёртой операцией является сварка, которая выполняется с применением сварочного источника питания, газового оборудования и комплекта для автоматической сварки стыка. Пятой операцией является термическая обработка, которая выполняется с применением индукционных подогревателей стыка и термической станции. Шестой операцией является контроль качества, который выполняется с применением набора визуально-измерительного контроля, набора капиллярного контроля и рентгеновского аппарата.

В таблице 11 представлены исходные данные для проведения экономических расчётов по рассматриваемым вариантам технологии сборки и сварки с учётом рыночной стоимости используемого оборудования и вспомогательных затрат.

Таблица 11 – Исходные данные для проведения экономических расчётов по рассматриваемым вариантам технологии

| Экономический показатель                             | Принятое в расчётной формуле буквенное обозначение показателя | Единица измерения экономического показателя | Значение экономического показателя применительно к базовой и проектной технологиям |                      |
|--|---|---|--|----------------------|
|  |   |   | Базовая технология   | Проектная технология |
| «Число рабочих смен в сутках                         | $K_{см}$  | -   | 2  | 2                    |
| Разряд работников                                    | $P_p$   | -   | IV   | IV                   |
| Часовая тарифная ставка                              | $Cч$  | Р/час                                       | 250  | 250                  |
| Коэффициент доплат                                   | $K_{доп}$   | %   | 12   | 12                   |
| Коэффициент отчислений на дополнительную ЗП          | $K_d$   | -   | 1,88   | 1,88                 |
| Коэффициент отчислений на социальные нужды           | $K_{сн}$  | %   | 34   | 34                   |
| Коэффициент выполнения нормы                         | $K_{вн}$  | -   | 1,1  | 1,1                  |
| Стоимость оборудования                               | $Ц_{об}$  | руб.  | 500 тыс.   | 1300 тыс.            |
| Норма амортизации оборудования                       | $K_a$   | %   | 21,5   | 21,5                 |
| Мощность оборудования                                | $M_{уст}$   | кВт   | 20   | 30                   |
| Коэффициент транспортно-заготовительных расходов     | $K_{т-з}$   | %   | 5  | 5                    |
| Стоимость электрической энергии                      | $Ц_{э-э}$   | Р/ кВт                                      | 3,4  | 3,4                  |
| Коэффициент полезного действия                       | $K_{пд}$  | -   | 0,7  | 0,85                 |
| Коэффициент затрат на монтаж и демонтаж оборудования | $K_{мон}$<br>$K_{дем}$  | %   | 3  | 5                    |
| Площадь под оборудование                             | $S$   | $m^2$                                       | 20   | 20                   |
| Стоимость эксплуатации площадей                      | $C_{эксп}$  | (Р/ $m^2$ )/год                             | 2000   | 2000                 |
| Цена производственных площадей                       | $Ц_{пл}$  | Р/ $m^2$                                    | 30000  | 30000                |
| Норма амортизации площади                            | $На.пл.$  | %   | 5  | 5                    |
| Коэффициент дополнительной производственной площади  | $K_{пл}$  | -   | 3  | 3                    |
| Коэффициент эффективности капитальных вложений       | $E_n$   | -   | 0,33   | 0,33                 |
| Коэффициент цеховых расходов                         | $K_{цех}$   | -   | 1,5  | 1,5                  |
| Коэффициент заводских расходов» [11]                 | $K_{зав}$   | -   | 1,15   | 1,15                 |

Дальнейшие расчёты с использованием представленных выше данных предполагают оценку затрат на осуществление технологического процесса по проектному и базовому вариантам.

## 4.2 Оценка фонда времени работы оборудования

При выполнении операций проектного технологического процесса и базового технологического процесса происходит работа оборудования в течение заданного времени. Величина заработной платы и вспомогательных затрат рассчитываются с учётом фонда времени работы оборудования, который следует рассчитать по исходным данным, представленным выше. Также следует принимать во внимание, что время работы оборудования позволяет рассчитать амортизационные отчисления и затраты на производственные площади. В проектом технологическом процессе и базовом технологическом процессе предусматривается выполнение операций в течение одинакового количества смен. Поэтому годовой фонд времени для проектного технологического процесса по отношению к годовому фонду времени базового технологического процесса не изменится.

Количество рабочих дней для одного года принимаем равным  $D_p=277$ , при этом продолжительность рабочей смены составляет  $T_{см}=8$  часов. Также следует принимать во внимание уменьшение рабочей смены на величину  $T_{п}=1$  час в предпраздничные дни, количество которых для одного календарного года составляет  $D_{п}=7$  дней. Для количества рабочих смен  $K_{см}=2$  рассчитываем годовой фонд времени:

$$F_H = (D_p \cdot T_{см} - D_{п} \cdot T_{п}) \cdot K_{см} . \quad (1)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину:  $F_H = (277 \cdot 8 - 7 \cdot 1) \cdot 2 = 4418$  часов. Значение эффективного фона рабочего времени следует вычислить с учётом задаваемых потерь рабочего времени  $B=7\%$ :

$$F_3 = F_H(1 - B/100). \quad (2)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину:  $F_3 = 4418 \cdot (1 - 7/100) = 4108$  часов.

### 4.3 Оценка штучного времени при выполнении операций проектного и базового вариантов технологии

Величину штучного времени, которое будет затрачиваться на выполнение операций проектного технологического процесса и базового технологического процесса, рассчитываем с учётом нормирования труда по выполняемым операциям согласно технологической карте. Штучное время  $t_{шт}$  включает в себя затраты времени на выполнение основных операций проектного и базового технологического процессов (машинное время  $t_{маш}$ ), подготовительных и вспомогательных операций (вспомогательное время  $t_{всп}$ ), личный отдых (время отдыха  $t_{отд}$ ), подготовительно-заключительное время  $t_{п-з}$  и времени на мелкий ремонт и обслуживание оборудования (время обслуживания  $t_{обсл}$ ):

$$t_{шт} = t_{маш} + t_{всп} + t_{обсл} + t_{отд} + t_{п-з} . \quad (3)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину:  $t_{шт.баз} = 13,2 \cdot (100\% + 10\% + 5\% + 5\% + 1\%) = 16$  часов и  $t_{шт.проектн.} = 9,9 \cdot (100\% + 10\% + 5\% + 5\% + 1\%) = 12$  часов.

Размер годовой программы  $\Pi_r$  рассчитывается с учётом рассчитанных выше штучного времени для проектного и базового вариантов технологии, а также с учётом ранее определённого годового фонда времени работы оборудования:

$$\Pi_r = F_{\text{в}} / t_{шт} . \quad (4)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину:  $\Pi_{r.баз.} = 4108/16 = 256$  стыков для базового технологического процесса и  $\Pi_{r.пр.} = 4108/12 = 342$  стыка для проектного технологического процесса. На основании анализа потребности отрасли в рассматриваемом оборудовании принимаем размер годовой программы для проектного варианта технологии и базового варианта технологии  $\Pi_r = 200$  стыков в год.



Требуемое количество технологического оборудования определяем с учётом ранее рассчитанного штучного времени для проектного варианта технологии и базового варианта технологии. При этом следует учесть коэффициент выполнения нормы  $K_{\text{вн}} = 1,03$ . Выполняем расчёт:

$$n_{\text{расч}} = t_{\text{шт}} \cdot \Pi_{\Gamma} / (F_{\text{э}} \cdot K_{\text{вн}}). \quad (5)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину:  $n_{\text{расч}} = 16 \cdot 200 / (4108 \cdot 1,03) = 0,8$  для базового варианта технологического процесса;  $n_{\text{расч}} = 12 \cdot 200 / (4108 \cdot 1,03) = 0,6$  для проектного варианта технологического процесса.

В дальнейшем при выполнении экономических расчётов количество оборудования для выполнения операций базового технологического процесса принимаем  $n=1$ . Количество оборудования для выполнения операций проектного технологического процесса принимаем  $n=1$ . На основании этого выполним расчёт коэффициента загрузки оборудования  $K_{\text{з}}$  для базового и проектного вариантов технологии:

$$K_{\text{з}} = n_{\text{расч}} / n. \quad (6)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину:  $K_{\text{з}} = 0,8/1 = 0,8$  для базового варианта технологического процесса и  $K_{\text{з}} = 0,6/1 = 0,6$  для проектного варианта технологического процесса.

Значение величины коэффициента загрузки оборудования  $K_{\text{з}}$  для проектного и базового вариантов технологического процесса в дальнейшем понадобятся для расчёта капитальных затрат на построение технологии.

При расчётах следует принимать во внимание, что производительность в проектной технологии по сравнению с базовой технологией значительно увеличилась. Это приводит либо к уменьшению количества применяемого оборудования, либо к уменьшению коэффициента загрузки оборудования. В настоящей выпускной квалификационной работе уменьшается количество используемого оборудования.

#### 4.4 Расчёт заводской себестоимости при осуществлении операций технологического процесса по рассматриваемым вариантам

Выполнение операций проектного технологического процесса и операций базового технологического процесса происходят с применением расходных материалов, затраты на которые рассчитываются в зависимости от коэффициента транспортно-заготовительных расходов  $K_{ТЗ}$ , цены материалов  $C_M$  и нормы расходов материалов  $N_p$  по формуле:

$$M = C_M \cdot N_p \cdot K_{ТЗ} . \quad (7)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину:  $M=(277 \cdot 4,4 + 60 \cdot 42) \cdot 1,05=3926$  рублей для операций базового технологического процесса; для операций проектного технологического процесса:  $M=(277 \cdot 3,4 + 60 \cdot 31) \cdot 1,05 = 2763$  рублей.

Величина основной заработной платы рассчитывается на основании штучного времени  $t_{шт}$ , часовой тарифной ставки  $C_ч$  и коэффициента доплат  $K_d$ , который для рассматриваемой выпускной квалификационной работы принимается равным  $K_d = 1,88$ :

$$Z_{осн} = t_{шт} \cdot C_ч \cdot K_d. \quad (8)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину:  $Z_{осн} = 16 \cdot 200 \cdot 1,88 = 6016$  рублей для базового варианта технологического процесса и  $Z_{осн} = 12 \cdot 200 \cdot 1,88 = 4512$  рублей для проектного варианта технологического процесса.

Величина дополнительной заработной платы  $Z_{доп}$  рассчитывается в зависимости от рассчитанной выше основной заработной платы  $Z_{осн}$  и коэффициента доплат  $K_{доп}$ , который для рассматриваемой выпускной квалификационной работы принимается равным  $K_{доп} = 12 \%$ :

$$Z_{доп} = Z_{осн} \cdot K_{доп} / 100. \quad (9)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину:  $Z_{доп} = 6016 \cdot 12 / 100 = 722$  рублей для операций

базового технологического процесса и  $Z_{\text{доп}} = 4512 \cdot 12 / 100 = 541$  рублей для операций проектного технологического процесса.

Величина фонда заработной платы ФЗП рассчитывается как сумма основной заработной платы  $Z_{\text{осн}}$  и дополнительной заработной платы  $Z_{\text{доп}}$ . Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину:  $\text{ФЗП} = 6016 + 722 = 6738$  рублей для операций базового технологического процесса и  $\text{ФЗП} = 4512 + 541 = 5053$  рублей для операций проектного технологического процесса.

Отчисления на социальные нужды  $O_{\text{сн}}$  рассчитываем с учётом коэффициента отчислений на социальные нужды  $K_{\text{сн}}$ , который для рассматриваемой выпускной квалификационной работы принимается равным  $K_{\text{сн}} = 34 \%$ :

$$O_{\text{сн}} = \text{ФЗП} \cdot K_{\text{сн}} / 100. \quad (10)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину:  $O_{\text{сн}} = 6738 \cdot 34 / 100 = 2290$  рублей для операций базового технологического процесса и  $O_{\text{сн}} = 5053 \cdot 34 / 100 = 1718$  рублей для операций проектного технологического процесса.

Величину затрат на оборудование  $Z_{\text{об}}$  определяем расчётным путём на основании амортизационных отчислений  $A_{\text{об}}$  и затрат на электрическую энергию  $P_{\text{э}}$ :

$$Z_{\text{об}} = A_{\text{об}} + P_{\text{э}}. \quad (11)$$

При вычислении амортизационных отчислений  $A_{\text{об}}$  следует учитывать норму амортизации  $H_a$ , которая для рассматриваемой выпускной квалификационной работы составляет  $H_a = 21,5 \%$ . Также в расчёт включено машинное время  $t_{\text{маш}}$ , которое ранее было рассчитано для операций проектной и базовой технологий. В формулу включены также эффективный годовой фонд времени работы оборудования  $F_{\text{э}}$  и цена оборудования  $\Pi_{\text{об}}$ .

$$A_{\text{об}} = \frac{\Pi_{\text{об}} \cdot H_a \cdot t_{\text{маш}}}{F_{\text{э}} \cdot 100}. \quad (12)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину:  $A_{об.} = 500000 \cdot 21,5 \cdot 16 / 4108 / 100 = 418$  рублей по базовому варианту технологии, по проектному варианту технологии:  $A_{об.} = 1300000 \cdot 21,5 \cdot 12 / 4108 / 100 = 816$  рублей.

Затраты на электрическую энергию при выполнении операций по проектному технологическому процессу рассчитываются с учётом мощности оборудования  $M_{уст}$ , КПД оборудования, машинного времени  $t_{маш}$  и стоимости электрической энергии для предприятий  $C_{э}$ :

$$P_{э} = M_{уст} \cdot t_{маш} \cdot C_{э} / \text{КПД}. \quad (13)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину:  $P_{э} = 20 \cdot 16 \cdot 3,4 / 0,85 = 1280$  рублей для базового варианта технологического процесса,  $P_{э} = 30 \cdot 12 \cdot 3,4 / 0,85 = 1440$  рублей для проектного технологического процесса.

После подстановки рассчитанных выше значений в формулу (11) вычисляем затраты на оборудование:  $Z_{об} = 418 + 1280 = 1698$  рублей по базовому технологическому процессу и  $Z_{об} = 816 + 1440 = 2256$  рублей по проектному технологическому процессу.

Размер технологической себестоимости  $C_{тех}$  определяется исходя из ранее определённых значений затрат на материалы  $M$ , отчислений на социальные нужды  $O_{сн}$ , фонда заработной платы ФЗП и затрат на оборудование  $Z_{об}$ :

$$C_{тех} = M + \text{ФЗП} + O_{сн} + Z_{об}. \quad (14)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину:  $C_{тех} = 3926 + 6738 + 2290 + 1698 = 14652$  рублей для базового варианта технологического процесса, и для проектного технологического процесса  $C_{тех} = 2763 + 5053 + 1718 + 2256 = 11790$  рублей.

Размер цеховой себестоимости  $C_{цех}$  определяется исходя из ранее определённой технологической себестоимости  $C_{тех}$ , коэффициента цеховых расходов  $K_{цех}$  и основной заработной платы  $Z_{осн}$ :

$$C_{\text{цех}} = C_{\text{тех}} + Z_{\text{осн}} \cdot K_{\text{цех}}. \quad (15)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину:  $C_{\text{цех}} = 14652 + 1,5 \cdot 6016 = 14652 + 9024 = 23676$  рублей для базового технологического процесса и для проектного технологического процесса  $C_{\text{цех}} = 11790 + 1,5 \cdot 4512 = 11790 + 6768 = 18558$  рублей.

Размер заводской себестоимости  $C_{\text{зав}}$  определяется исходя из ранее определённой цеховой себестоимости  $C_{\text{цех}}$ , коэффициента заводских расходов и основной заработной платы  $Z_{\text{осн}}$ :

$$C_{\text{зав}} = C_{\text{цех}} + Z_{\text{осн}} \cdot K_{\text{зав}}. \quad (16)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину  $C_{\text{зав}} = 23676 + 1,15 \cdot 6016 = 23676 + 6918 = 30594$  рублей для базового варианта технологии, и для проектного технологического процесса  $C_{\text{зав}} = 18558 + 1,15 \cdot 4512 = 18558 + 5188 = 23746$  рублей.

В таблице 12 представлена калькуляция заводской стоимости.

Таблица 12 – Исходные данные и расчёт заводской стоимости при выполнении операций согласно базового технологического процесса и согласно проектного технологического процесса

| Показатель                       | Условное обозначение | Калькуляция, руб. |                   |
|----------------------------------|----------------------|-------------------|-------------------|
|                                  |                      | Базовый вариант   | Проектный вариант |
| 1. «Затраты на материалы         | <i>M</i>             | 3926              | 2763              |
| 2. Фонд заработной платы         | <i>ФЗП</i>           | 6738              | 5053              |
| 3. Отчисления на соц. нужды      | <i>Осн</i>           | 2290              | 1718              |
| 4. Затраты на оборудование       | <i>Зоб</i>           | 1698              | 2256              |
| 5. Технологическая себестоимость | <i>Стех</i>          | 14652             | 11790             |
| 6. Цеховые расходы               | <i>Рцех</i>          | 9024              | 6768              |
| 7. Цеховая себестоимость         | <i>Сцех</i>          | 23676             | 18558             |
| 8. Заводские расходы             | <i>Рзав</i>          | 6918              | 5188              |
| 9. Заводская себестоимость» [12] | <i>Сзав</i>          | 30594             | 23746             |

Данные, представленные в таблице 12, позволяют судить о высокой эффективности проектной технологии, которая позволяет уменьшить заводскую себестоимость относительно базовой технологии. Дальнейшие работы направлены на определение величины капитальных вложений при реализации проектной технологии и реализации базовой технологии

## 4.5 Капитальные затраты при реализации проектного и базового вариантов технологии

Вычисляем капитальные затраты  $K_{\text{общ. б.}}$  на реализацию технологического процесса по базовому варианту. Расчёт следует выполнять с учётом коэффициента загрузки оборудования  $K_p$  и остаточной стоимости оборудования  $\text{Ц}_{\text{об. б.}}$ .

Величину остаточной стоимости оборудования определяем с учётом рыночной стоимости аналогичного нового оборудования  $\text{Ц}_{\text{перв.}}$ , срока службы оборудования  $T_{\text{сл}}$  и нормы амортизационных отчислений  $N_a$ :

$$\text{Ц}_{\text{об. б.}} = \text{Ц}_{\text{перв.}} - (\text{Ц}_{\text{перв.}} \cdot T_{\text{сл}} \cdot N_a / 100). \quad (17)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину  $\text{Ц}_{\text{об. б.}} = 500000 - (50000 \cdot 2 \cdot 21,5 / 100) = 285000$  рублей.

Капитальные затраты по базовой технологии могут быть рассчитаны как:

$$K_{\text{общ. б.}} = \text{Ц}_{\text{об. б.}} \cdot K_{з. б.} \quad (18)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину  $K_{\text{общ. б.}} = 1 \cdot 285000 \cdot 0,8 = 228000$  рублей.

Расчёт капитальных затрат  $K_{\text{общ. пр.}}$  при реализации проектной технологии требует учёта капитальных вложений в производственные площади  $K_{\text{пл. пр.}}$ , сопутствующих затрат  $K_{\text{соп}}$  и капитальных затрат на оборудование  $K_{\text{об. пр.}}$ :

$$K_{\text{общ. пр.}} = K_{\text{об. пр.}} + K_{\text{пл. пр.}} + K_{\text{соп.}} \quad (19)$$

Величина капитальных затрат на оборудование для реализации проектного варианта технологического процесса рассчитывается с учётом коэффициента транспортно-заготовительных расходов, значение которого для настоящей выпускной квалификационной работы составило  $K_{\text{ТЗ}}=1,05$ , цены оборудования  $\text{Ц}_{\text{об}}$  и коэффициента загрузки оборудования  $K_з$ :

$$K_{\text{об. пр.}} = \text{Ц}_{\text{об. пр.}} \cdot K_{\text{ТЗ}} \cdot K_{з. пр.} \quad (20)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину  $K_{об.пр.} = 1300000 \cdot 1,05 \cdot 0,6 = 819000$  рублей.

Величина сопутствующих затрат  $K_{соп}$  рассчитывается с учётом расходов на демонтаж  $P_{дем}$  оборудования по базовому технологическому процессу и монтаж  $P_{мон}$  оборудования по проектному технологическому процессу.

Расходы на демонтаж с учётом коэффициента расходов на демонтаж оборудования  $K_{дем} = 0,05$  рассчитываются как

$$P_{дем} = Ц_{об. б.} \cdot K_{д.} \quad (21)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину  $P_{дем} = 500000 \cdot 0,05 = 25000$  рублей.

Расходы на монтаж с учётом коэффициента расходов на монтаж оборудования  $K_{мон} = 0,05$  рассчитываются как

$$P_{монт} = Ц_{об. пр.} \cdot K_{м.} \quad (22)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину  $P_{монт} = 1300000 \cdot 0,05 = 45000$  рублей.

Величина сопутствующих расходов определяется как

$$P_{соп} = P_{дем} + P_{монт}. \quad (23)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину  $P_{соп} = 25000 + 45000 = 70000$  рублей.

Далее с использованием подставленных в формулу (19) значений получили общие капитальные затраты  $K_{общ. пр.} = 819000 + 70000 = 889000$  рублей.

Расчёт дополнительных капитальных вложений  $K_{доп}$  проводим с учётом капитальных затрат для проектной технологии  $K_{общ.пр}$  и капитальных затрат по базовой технологии  $K_{общ.б}$ :

$$K_{доп} = K_{общ.пр} - K_{общ.б}: \quad (24)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину  $K_{\text{доп}} = 889000 - 228000 = 661000$  рублей.

Величину удельных капитальных вложений определяем с учётом годовой программы  $\Pi_{\Gamma}$ :

$$K_{\text{уд}} = K_{\text{общ}} / \Pi_{\Gamma} . \quad (25)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину  $K_{\text{уд}} = 228000/200 = 1140$  рублей за единицу продукции по базовой технологии и  $K_{\text{уд}} = 889000/200 = 4445$  рублей за единицу продукции по проектной технологии.

#### 4.6 Показатели экономической эффективности

Для выполнения экономического обоснования настоящей выпускной квалификационной работы рассчитаем основные показатели эффективности.

Снижение трудоемкости  $\Delta t_{\text{шт}}$  рассчитывается как

$$\Delta t_{\text{шт}} = (t_{\text{шт б}} - t_{\text{шт пр}}) \cdot 100 \% / t_{\text{шт б}} . \quad (26)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину  $\Delta t_{\text{шт}} = (16-12) \cdot 100 \% / 16 = 25 \%$ .

Повышение производительности  $\Pi_{\Gamma}$  рассчитывается как

$$\Pi_{\Gamma} = 100 \cdot \Delta t_{\text{шт}} / (100 - \Delta t_{\text{шт}}) . \quad (27)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину  $\Pi_{\Gamma} = 100 \cdot 25 / (100 - 25) = 33 \%$ .

Уменьшение технологической себестоимости  $\Delta C_{\text{тех}}$  рассчитывается как

$$\Delta C_{\text{тех}} = (C_{\text{тех.б.}} - C_{\text{тех.пр.}}) \cdot 100\% / C_{\text{тех.б.}} . \quad (28)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину  $\Delta C_{\text{тех}} = (14652 - 11790) \cdot 100\% / 14652 = 20 \%$ .

Размер условно-годовой экономии  $\Pi_{\text{ож}}$  рассчитывается как

$$\Pi_{\text{ож}} = \mathcal{E}_{\text{уг}} = (C_{\text{зав.б.}} - C_{\text{зав.пр.}}) \cdot \Pi_{\Gamma} . \quad (29)$$



Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину  $P_{ож} = (30594 - 23746) \cdot 400 = 1369600$  рублей.

Длительность срока окупаемости предлагаемых мероприятий  $T_{ок}$  составляет:

$$T_{ок} = K_{доп} / \mathcal{E}_{уг}. \quad (30)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину  $T_{ок} = 661000 / 1369600 = 0,3$  года.

Величина годового экономического эффекта  $\mathcal{E}_г$  рассчитывается как

$$\mathcal{E}_г = \mathcal{E}_{уг} - E_n \cdot K_{доп}. \quad (31)$$

Представленные выше исходные значения позволяют получить расчётную величину  $\mathcal{E}_г = 1369600 - 0,33 \cdot 661000 = 1,15$  млн. рублей.

Таким образом, с учётом особенностей выполнения операций технологического процесса по проектному варианту и базовому варианту был выполнен расчёт основных экономических показателей производства.

Проведенные экономические расчёты позволяют судить о высокой эффективности предлагаемых в настоящей выпускной квалификационной работе решениях. Производительность труда повышается на 33 %. Уменьшение технологической себестоимости составило 20 %. При этом за счёт повышения производительности труда и снижения издержек удалось получить годовой экономический эффект в размере 1,15 млн. рублей. Средства, затраченные на внедрение предлагаемых в настоящей выпускной квалификационной работе решений, будут окуплены за 0,3 года.

## Заключение

В настоящей выпускной квалификационной работе рассматривается вопрос повышения эффективности сварочных операций при выполнении сборки и сварки главного циркуляционного трубопровода атомных электростанций.

Базовая технология сборки и сварки циркуляционного трубопровода предусматривает применение ручной дуговой сварки и ручной аргонодуговой сварки неплавящимся электродом.

Первым недостатком является малая производительность ручной дуговой сварки, которая не может быть повышена за счёт форсирования режимов или применения новых сварочных электродов. Вторым недостатком является вредность условий труда сварщика, которому приходится работать в атмосфере сварочного аэрозоля и излучения от дуги. Третьим недостатком следует указать увеличение расхода сварочных материалов из-за затрат на огарки, кроме того, необходимость прерывания горения дуги при смене электрода приводит к снижению производительности и качества сварки. Четвёртым недостатком является малая стабильность качества сварки, имеющая прямую зависимость от квалификации сварщика.

Выполненный анализ состояния вопроса позволил обосновать выбор способа сварки, в качестве которого предлагается применить автоматическую аргонодуговую сварку.

Первой операцией является подготовка кромок труб, которая выполняется с применением фаскосъемной машины и комплекта измерительных инструментов. Второй операцией является сборка и прихватка, которая выполняется с применением сборочных приспособлений, сварочного источника питания и газового оборудования. Третьей операцией является предварительный подогрев, который выполняется с использованием индукционных подогревателей стыка и термической станции. Четвёртой операцией является сварка, которая выполняется с применением сварочного

источника питания, газового оборудования и комплекта для автоматической сварки стыка. Пятой операцией является термическая обработка, которая выполняется с применением индукционных подогревателей стыка и термической станции. Шестой операцией является контроль качества, который выполняется с применением набора визуально-измерительного контроля, набора капиллярного контроля и рентгеновского аппарата.

Выполнение операций проектного технологического процесса, который был представлен в исполнительском разделе настоящей выпускной квалификационной работы, приводит к возникновению негативных производственных факторов и негативных экологических факторов. Выполненная идентификация этих негативных факторов позволила предложить стандартные методики и технические средства для защиты персонала и окружающей среды.

Проведенные экономические расчёты позволяют судить о высокой эффективности предлагаемых в настоящей выпускной квалификационной работе решений. Производительность труда повышается на 33 %. Уменьшение технологической себестоимости составило 20 %. При этом за счёт повышения производительности труда и снижения издержек удалось получить годовой экономический эффект в размере 1,15 млн. рублей. Средства, затраченные на внедрение предлагаемых в настоящей выпускной квалификационной работе решений, будут окуплены за 0,3 года.

Таким образом, внедрение предлагаемых в настоящей выпускной квалификационной работе решений в производство позволяет получить доказанный расчётным путём экономический эффект.

На основании вышеизложенного следует считать поставленную цель выпускной квалификационной работы достигнутой.

Результаты рекомендуются к внедрению на предприятиях, которые выполняют работы по строительству и ремонту технологических трубопроводов на атомных станциях.

## Список используемой литературы и используемых источников

1. Белкин С. А., Иванова И. В., Борисенко М. М. Свойства сварных соединений трубопровода Ду 850 мм главного циркуляционного контура АЭС, выполненных автоматической аргодуговой сваркой // Энергетическое строительство. 1992. № 5. С. 50–55.
2. Белов С. В. Охрана окружающей среды. М. : Машиностроение, 1990. 372с.
3. Горина Л. Н. Обеспечение безопасных условий труда на производстве: учебное пособие. Тольятти : ТолПИ, 2000. 68 с.
4. Зорев Н. Н., Астафьев А. А., Тимофеев М. М. Разработка, исследование и комплексная оценка свойств технологичных сталей перлитного класса, соответствующих требованиям международных стандартов, и разработка технологии производства с оформлением для применения в реакторостроении (отчёт по комплексной теме А-62). М. : НПО ЦНИИТМаш, 1973. 358 с.
5. Касаткин О. Г., Царюк А. К., Скульский В. Ю. Односторонняя сварка плакированных трубопроводов атомных энергетических установок // Автоматическая сварка. 2012. № 12. С. 11–16.
6. Климов А. С. Выпускная квалификационная работа бакалавра: учебно-метод. пособие по выполнению выпускной квалификационной работы бакалавра. Тольятти : ТГУ, 2021. 62 с.
7. Колоколов Е. И., Томилин С. А., Жидков М. Е. Ликвационная неоднородность и свариваемость стали 10ГН2МФА // Глобальная ядерная безопасность. 2019. № 4. С. 27–36.
8. Краснопевцева И. В. Экономическая часть дипломного проекта : метод. указания. Тольятти : ТГУ, 2008. 38 с.
9. Кудинова Г. Э. Организация производства и менеджмент : метод. указания к выполнению курсовой работы. Тольятти : ТГУ, 2005. 35 с.

10. Кузмин Н. А. Исследование влияния наплавки из аустенитной стали на раскрытие трещины в трубопроводе Ду 850 из перлитной стали // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2016. № 1. С. 42–49.

11. Куран Р. И., Цыба В. И., Царюк А. К. Термообработка сварных соединений главного циркуляционного трубопровода Ду 850 мм при замене парогенераторов ПГВ-1000М на Южно-Украинской АЭС // Сварщик. 2004. № 1. С. 32–34.

12. Мазур А. А., Маковецкая О. К., Пустовойт С. В. Экономико-статистический обзор мирового и регионального рынков сварочных материалов // Автоматическая сварка. 2019. № 9. С. 45–51.

13. Махненко В. И., Махненко О. В., Великоиваненко Е. А. Учёт порообразования при термической обработке сварных узлов из сталей, склонных к образованию трещин отпуска // Автоматическая сварка. 2013. № 3. С. 3–6.

14. Подрезов Н. Н., Доронин Ю. В., Хегай Л. С. О свариваемости теплоустойчивых сталей, применяемых в атомной энергетике // Глобальная ядерная безопасность. 2014. № 3. С. 49–53.

15. Полосков С. И., Букаров В. А., Ищенко Ю. С. Особенности заполнения разделки при автоматической орбитальной сварке неповоротных стыков труб // Сварочное производство. 2003. № 8. С. 3–11.

16. Полосков С. И., Ищенко Ю. С., Букаров В. А. Минимизация вероятности образования наружных дефектов швов в процессе автоматической орбитальной сварки // Сварочное производство. 2003. № 10. С. 6–13.

17. Смирнов И. В. Сварка специальных сталей и сплавов : учебное пособие. Тольятти : ТГУ, 2007. 301 с.

18. Старченко Е. Г., Казанцев А. Г., Ходаков В. Д. О возможности увеличения допустимого времени термообработки сварных соединений стали

10ГН2МФА при проведении ремонтных работ // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. 2008. № 4. С. 22–25.

19. Харченко В. В., Степанов Г. В., Романов С. В. Некоторые актуальные вопросы оценки прочности и ресурса элементов ответственного оборудования АЭС при термосиловом нагружении // Проблемы прочности. 2004. № 1. С. 140–146.

20. Царюк А. К., Скульский В. Ю., Волков В. В. К вопросу выбора технологии сварки элементов ГЦТ Ду 850 мм при замене парогенераторов ПГВ-1000М на АЭС // Автоматическая сварка. 2005. № 10. С. 41–47.

21. Царюк А. К., Скульский В. Ю., Касперович И. Л. Разработка и аттестация технологии ААрДС в узкую разделку элементов ГЦТ Ду850 на АЭС // Автоматическая сварка. 2006. № 5. С. 24–31.

22. Явойский В. И., Рубенчик Ю. И., Окенко А. П. Неметаллические включения и свойства стали. М. : Металлургия, 1980. 176 с.

23. Henon B., Malhotra S. Remote welding and the Monticello recirculation pipe replacement project // Nuclear engineering international. 1985. № 11. P. 23–37.

24. Dixon K. Shielding gas selection for GMAW of steels // Welding and Metal Fabrication. 1999. № 5. P. 8–13.

25. Leitner R. E., Mcelhinney G. H., Pruitt E. L. An investigation of pulsed GTA welding variables // Welding Journal. 1973. № 9. P. 405–410.

26. Lothongkum, G. Viyanit E., Bhandhubanyong P. TIG pulse welding parameters of the AISI 316L stainless steel plate at the 6–12h positions // J. Mater. Proc. Technology. 2001. Vol. 91/92. P. 312–316.

27. Lucas W. Survey on the application of pulsed currents with the TIG process // Welding World. 1980. № 3/4. P. 61–66.