

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

Институт машиностроения

(наименование института)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

(наименование)

15.04.01. Машиностроение

(код и наименование направления подготовки)

Производство и ремонт сварных конструкций газонефтехимического оборудования

(направленность (профиль)/ специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему: «Разработка технологии сварки и исследование качества сварных
соединений при монтаже трубопроводов и оборудования АЭС»

Студент

С.В. Коннов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

д.т.н., доцент В.В. Ельцов

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

Тольятти 2022

Содержание

Введение.....	4
Термины и определения.....	11
Сокращения.....	14
1. К вопросу выбора технологии сварки элементов ГЦТ Ду 850 при замене парогенераторов ПГВ-1000М на АЭС.....	16
1.1. Конструкция объекта исследования ПГ АЭС с ВВЭР-1000.....	16
1.2. Конструкция коллекторов теплоносителя ПГ АЭС с ВВЭР-1000	18
1.3. Зона узла приварки коллекторов к корпусу ПГ.....	20
1.4. Сведения о конструкционном сплаве - стали марки 10ГН2МФА.	21
1.5. Некоторые актуальные вопросы оценки прочности и ресурса элементов ответственного оборудования АЭС при термосиловом нагружении.....	25
1.6. Термообработка сварных соединений главного циркуляционного трубопровода Ду 850 при замене парогенераторов ПГВ-1000М на Южно-Украинской АЭС.....	29
2. Исследование структуры и свойств металла сварных соединений при сварке с термообработкой и без ее применения.....	37
2.1. Технические и технологические характеристики установок для термообработки трубопроводов главного циркуляционного контура АЭС.....	37
2.2. Последовательность выполнения операций при сварке сварного соединения ГЦТ Ду 850 трубопровода с патрубком реактора.....	41
2.3. Подогрев под сварку сварных соединений ГЦТ Ду 850.....	42
2.4. Термический отдых сварных соединений ГЦТ Ду 850.....	43
2.5. Термическая обработка сварных соединений ГЦТ Ду 850.....	43
2.6. Требования к параметрам технологического процесса термической обработки сварных соединений ГЦТ Ду 850 с патрубками корпуса реактора. Контроль температуры.....	48

2.7. Режимы нагрева под сварку, «термический отдых» и высокий отпуск сварных соединений ГЦТ Ду 850.....	54
3. Выбор оптимального способа сварки сварных соединений элементов главного циркуляционного трубопровода ГЦТ Ду 850.....	54
3.1. Разработка технологии сварки сварных соединений элементов главного циркуляционного трубопровода ГЦТ Ду 850.....	59
3.2. Выбор сварочного оборудования при разработке технологии сварки сварных соединений элементов главного циркуляционного трубопровода ГЦТ Ду 850.....	63
3.3. Выбор сварочных материалов при разработки технологии сварки сварных соединений элементов главного циркуляционного трубопровода ГЦТ Ду 850.....	72
3.4. Контроль качества сварных соединений при разработки технологии сварки элементов главного циркуляционного трубопровода ГЦТ Ду 850.....	79
4. Аттестация технологии сварки ААрДС в узкую разделку элементов ГЦТ Ду 850 на АЭС.....	79
4.1. Предварительные исследования.....	87
4.2. Исследовательская аттестация.....	96
Заключение	99
Список используемой литературы и используемых источников.....	102

Введение

Стратегия развития энергетического машиностроения на 2010 – 2020 г.г. (в перспективе до 2030 г.) [54] предусматривает вывод из эксплуатации и строительство новых объектов тепло- и электрогенерации. Часть действующих атомных электрических станций АЭС и тепловых электрических станций ТЭС планируется вывести из эксплуатации и ввести новые.

Каждый из типов АЭС имеют свои достоинства и недостатки. В отличие от ТЭС, у АЭС повышенные требования к обеспечению безопасной работы и эксплуатации. Стоимость строительства АЭС выше, чем ТЭС [48] за счёт наличия сложных и многоуровневых систем безопасности, обеспечивающих даже в случае максимальной проектной аварии: местного полного поперечного разрыва трубопровода [72] циркуляционного контура в реакторном отделении, исключение расплавления активной зоны и ее расхолаживание [42].

Одна из основных составляющих частей АЭС – трубопроводы, протяженность которых достигает нескольких километров. Наиболее ответственны главные трубопроводы, непосредственно связанные с технологическим процессом станции. Одним из основных трубопроводов АЭС является главный циркуляционный трубопровод ГЦТ.

Трубопровод Ду 850 мм ГЦТ с реакторами ВВЭР-1000 служит для транспортировки воды 1 контура от реактора к парогенераторам. Трубы изготавливаются из легированной стали перлитного класса марки 10ГН2МФА, плакированной изнутри сталью марки ЭИ-898 с помощью антикоррозионной ленточной наплавки. Толщина основного металла 65 мм, плакирующего слоя 5 мм, наружный диаметр трубы 990 мм.

С учётом специфики АЭС, стали и технологии их производства для обеспечения высокой эксплуатационной надежности разрабатываются не только комплексно, но и исходя из обеспечения реализации принципа

резервирования, то есть повышения надежности за счет избыточности свойств по отношению к минимально необходимому их уровню [19].

Развитие промышленности способствовало созданию нескольких актуальных технологий производства труб ГЦТ: 1 - изготовление труб из сплошного кузнечного слитка; 2 – изготовление труб из полой заготовки, полученной методом электрошлакового переплава; 3 – изготовление труб из полого слитка, отлитого в изложницу [1].

Актуальностью данной работы является разработка технологии сварки и исследование качества сварных соединений при монтаже трубопроводов и оборудования АЭС главного циркуляционного контура ГЦК реакторной установки ВВЭР.

В магистерской диссертации изложена технология сварки устанавливающая правила и требования к организации и проведению монтажа, ручной сварки (дуговой, аргодуговой и комбинированной), а также автоматической (аргодуговой сварки в узкие и щелевые разделки) термообработки и исследованию контролю качества сварных соединений при монтаже главного циркуляционного трубопровода ГЦТ Ду 850 с патрубками корпуса реактора, коллекторами парогенератора, трубами с коленом и главного циркуляционного насосного агрегата на энергоблоках типа ВВЭР.

Проведены исследования процессов технологии сварки [62] трубопровод и оборудования различными способами с применением различных сварочных материалов, которая была разработана ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» еще в 70-е годы.

С применением технологии ручной дуговой сварки было сварено и успешно эксплуатируется в России и за рубежом около 1000 стыков. Несмотря на многолетний положительный опыт применения ручной сварки, автоматизация сварки ГЦТ Ду850, с учетом постоянного роста количества монтируемых атомных энергоблоков и дефицита квалифицированных сварщиков, является на сегодняшний день одной из важнейших инновационных задач в отечественной атомной отрасли.

Основными параметрами при разработке технологии сварки, критериев определения области распространения результатов аттестации, методов контроля и видов испытаний, предусмотренных в данной диссертационной работе, базируются на национальных нормативных и руководящих документах по сварке оборудования и трубопроводов АЭУ и дополнены требованиями документов, которые устанавливают основные требования к сварочному оборудованию, сварочным материалам, подготовке и сборке под сварку, сварке, наплавке, термической обработке сварных соединений и наплавленных деталей (изделий), технике безопасности, а также к основным рекомендуемым типам сварных соединений и режимам сварки (наплавки), применяемых на объектах использования атомной энергии ОИАЭ.

В диссертационной работе изложены актуальные темы по обоснованию и разработке технологии сварки при монтаже трубопроводов и оборудования АЭС и получен сравнительный анализ по результатам трудоемкости сварочных работ и производительности с применением ручных и автоматических способов сварки и исследованием контроля качества сварных соединений при проведении сварочных работ главного циркуляционного трубопровода ГЦТ Ду850.

До настоящего времени основным способом соединения стыковых сварных соединений трубопроводов Ду 850 мм ГЦТ является ручная электродуговая сварка. Для сварки основного металла перлитного слоя шва применяют электроды марки ПТ-30. При этом корневая часть сварного шва высотой 6-8 мм выполняется без предварительного и сопутствующего подогрева с применением аргонодуговой сварки с присадочной проволокой марки Св-08Г2С диаметром 2 мм.

Несмотря на многолетний положительный опыт, применение ручной дуговой сварки для высокоответственных трубопроводов ГЦТ категории 1А следует признать нежелательным из-за зависимости качества металла шва от квалификации и состояния сварщиков-ручников. С учётом постоянного роста количества монтируемых атомных энергоблоков недостатком

квалифицированных ручников-сварщиков становится острой проблемой. Радикальным решением этой проблемы при монтаже ГЦТ ВВЭР является переход с ручной сварки на автоматическую.

За рубежом автоматическая аргодуговая сварка при монтаже и ремонте трубопроводов главного циркуляционного контура, изготавливаемых из аустенитных сталей начала применяться ещё в начале 80-х годов. Однако, технология сварки биметаллических трубопроводов (перлитная сталь 10ГН2МФА плакированной нержавеющей сталью), аналогичных применяемым для ГЦТ ВВЭР, никогда не разрабатывалась.

В СССР впервые разработкой технологии автоматической сварки биметаллических трубопроводов Ду 850 ГЦТ начали заниматься в конце 80-х годов прошлого века, когда ВНИИЭСО разработал и изготовил специализированный автомат для аргодуговой сварки АДГ-301УХЛ4, а «Энергомонтажпроект» и ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» разработали технологию и специальную сварочную проволоку Св-08Г1СН1МА для аргодуговой сварки стали 10ГН2МФА. Организацией «Ютехтеплоэнергомонтаж» была выполнена сварка натуральных макетов трубопроводов Ду 850 в разделки аналогичные применяемым для ручной сварки. Из этих макетов после проведения термообработки $650^{\pm 10}$ °С выдержка 6 часов и неразрушающего контроля изготавливались образцы для проведения аттестационных испытаний технологии сварки, на основании положительных результатов которых, было получено разрешение ГОСПРОМАТОМНАДЗОРА на применение автоматизированной технологии сварки с применением сварочной проволоки марки Св-08Г1СН1МА для выполнения монтажных сварных соединений энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000 [4].

В 90-е годы серьёзные исследования были выполнены в ИЭС им. Патона применительно к замене парогенераторов на Южно-Украинской АЭС [65], где была разработана и аттестована технология сварки элементов ГЦТ Ду 850 как в стандартную, так и в узкую разделки. Сварка выполнялась с использованием

полученных от ЕЭС после аварии на Чернобыльской АЭС специализированных сварочных автоматов AUTOTIG 600 РС фирмы «Полисуд», оснащенных специальными горелками, позволяющими вести сварку в узкую разделку. В качестве присадки использовалась модернизированная сварочная проволока Св-10ГН1МА с дополнительным содержанием Al – элемента-раскислителя. Неразрушающий контроль и аттестационные испытания показали высокое качество сварных соединений, на основании которых было оформлено разрешение на применение такой технологии на АЭС Украины [66].

Несмотря на положительные результаты, полученные в ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» и ИЭС им. Патона, все вышеназванные работы были прекращены после распада СССР и прекращения сооружения АЭС.

Начиная с 2010 года, в связи с ростом количества сооружаемых атомных энергоблоков, в ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» вновь начал активно проводить работы по автоматизации сварки сварных соединений Ду 850. При этом с самого начала учитывался такой важный недостаток автоматической аргонодуговой сварки перлитной стали марки 10ГН2МФА, как повышенная склонность к образованию в металле шва пористости, причина образования которой до сих пор не достаточно изучена.

Вероятнее всего образование пористости в данном случае происходит по реакции «кипения», которая может протекать, принимая упрощённую схему, по реакции: $2C + O_2 = 2CO$ из-за недостаточного количества элементов-раскислителей Si и Mn в проволоке Св-10ГН1МА [25]. С учетом ранее полученных положительных результатов [4], в ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» была изготовлена новая партия сварочной проволоки Св-10Г1СН1МА (Св-08Г1СН1МА), адаптированная к современным требованиям (в частности для сварки в узкие разделки). Благодаря более высокому содержанию Si и Mn в этой проволоке недопустимое образование пористости было надёжно предотвращено (рисунок 19).

Не менее важной проблемой, затрудняющей применение автоматической аргодуговой сварки деталей больших толщин является её низкая производительность, уступающая по коэффициенту наплавки даже ручной электродуговой сварке.

Поэтому главной целью работы является гармонизация процедур при разработке технологии сварки ручными и автоматическими способами сварки с учетом результатов анализа и систематизации опыта работ по разработке и аттестации сварочных технологий, которая содержит рекомендации и унифицирует методологию выполнения работ с учетом специфики применения, с последующим исследованием контроля качества сварных соединений при монтаже трубопроводов и оборудования АЭС.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка. Объем основной части работы состоит из 108 страниц машинописного текста.

Диссертация содержит 36 рисунков и 11 таблиц. Список литературы включает 72 наименования.

Термины и определения

В настоящей магистерской диссертации применены следующие термины с соответствующими определениями:

антикоррозионная наплавка: Нанесение на поверхность защищаемых конструкций слоя металла или сплава, посредством сварки плавлением, с целью защиты поверхности от коррозии.

водо-водяной энергетический реактор: Корпусной водо-водяной энергетический реактор с водой под давлением.

главный циркуляционный насосный агрегат: Насос, обеспечивающий циркуляцию теплоносителя контура реакторной установки.

дефектоскоп: Устройство для выявления дефектов (расслоений, раковин и т.д.) в материалах и изделиях методами неразрушающего контроля.

дефектоскоп капиллярный: Совокупность приборов капиллярного неразрушающего контроля, вспомогательных средств и образцов для испытаний, которыми осуществляют технологический процесс контроля.

дефектоскоп магнитный: Прибор, предназначенный для выявления дефектов типа нарушения сплошности материала объекта контроля с помощью метода магнитного неразрушающего контроля.

корпус ядерного реактора: Герметичный сосуд, предназначенный для размещения в нем активной зоны и других устройств, а также для организации безопасного охлаждения ядерного топлива потоком теплоносителя.

метрологическая характеристика средства измерений: Характеристика одного из свойств средства измерений, влияющая на результат измерений и на его погрешность.

настроечный (контрольный) образец (блок): Образец контролируемой детали (или ее части) с (или ее части) с естественными или искусственными дефектами, используемый для настройки и оценки параметров средств неразрушающего контроля при заданной технологии контроля (СТО ОПЖТ 19-2012).

неразрушающий контроль: Контроль соответствия параметров технических устройств, материалов, изделий, деталей, узлов, сварных соединений требованиям нормативных документов, при котором не нарушается пригодность объекта контроля к применению и эксплуатации.

термическая обработка: Процесс нормализации, нормализации с высоким отпуском или закалка с высоким отпуском, придающий металлу требуемый уровень механических свойств и остаточных напряжений, обеспечивающий необходимую структуру.

парогенератор: Теплообменный аппарат, производящий во втором контуре нерадиоактивный пар за счет теплоты первичного теплоносителя.

первый контур: Контур вместе с системой компенсации давления, по которому циркулирует теплоноситель через активную зону под рабочим давлением.

плакировка: Слой коррозионно-стойкого материала, предотвращающий контакт основного металла сосуда (трубопровода) с коррозионно-активной средой, заполняющей сосуд (трубопровод).

поверка средств измерений: Совокупность операций, выполняемых в целях подтверждения соответствия средств измерений метрологическим требованиям.

Ростехнадзор: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору.

средство измерений: Техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени.

термический отдых: Вид термообработки, при котором сварное соединение нагревают до 150-250 °С и затем выдерживают в течение 12 часов. При этом уменьшается содержание диффузионного водорода в сварных соединениях, а также несколько снижается уровень сварных напряжений.

Сокращения

ААрДС	Автоматическая аргонодуговая сварка
АЭС	Атомная электрическая станция
АЭУ	Атомная энергетическая установка
БГ	Блок горячей нитки
БХ	Блок холодной нитки
ВИК	Визуальный и измерительный контроль
ВВЭР	Водо-водяной энергетический реактор
ВО	Водородное охрупчивание
ГМО	Головная материаловедческая организация
ГЦК	Главный циркуляционный контур
ГЦНА	Главный циркуляционный насосный агрегат
ГЦТ	Главный циркуляционный трубопровод
КД	Конструкторская документация
КК	Капиллярный контроль
КСС	Контрольное сварное соединение
МКК	Межкристаллическая коррозия
НД	Нормативная документация
НДС	Напряженно-деформированное состояние
НМК	Неразрушающие методы контроля
НО	Настроечный образец
ОИАЭ	Объект использования атомной энергии
ОС ППР	Особо сложный проект производства работ
ОТК	Отдел технического контроля
ПГ	Парогенератор
ПКД	Производственная контрольная документация
ПОС	Проект организации строительства
ПТД	Производственно-технологическая документация
РАДС	Ручная аргонодуговая сварка

РЭДС	Ручная электродуговая сварка
РГК	Радиографический контроль
СС	Сварное соединение
ТИ	Технологическая инструкция
ЦЗ	Центральный зал
ЮУ АЭС	Южно – Украинская АЭС

1 К вопросу выбора технологии сварки элементов главного циркуляционного трубопровода гцт ду 850 на АЭС

1.1 Конструкция объекта исследования ПГ АЭС с ВВЭР-1000

В настоящее время наиболее распространенной в ядерной энергетике является атомная электростанция АЭС [44] с водно-водяным энергетическим реактором ВВЭР. Одним из важнейших основных узлов АЭС такого типа является ПГ.

ПГ типа ПГВ-1000 – это теплообменный аппарат, предназначенный для выработки сухого насыщенного пара давлением 6,4 МПа, влажностью 0,2% при температуре питательной воды 220°C за счет теплоты, получаемой от реактора, и обеспечения съема теплоты с активной зоны реактора во всех эксплуатационных режимах. Важной особенностью ПГ АЭС являются высокие требования по межконтурной плотности. Конструктивно ПГ представляют корпусные сосуды с несколькими тысячами труб. Теплоноситель первого контура проходит внутри теплообменных труб и нагревает воду до образования пара. При нарушении целостности теплообменной трубы теплоноситель попадает в пароводяной контур АЭС (турбина, конденсатор, подогреватели и т.п.) и далее во внешнюю среду, в случае срабатывания предохранительной арматуры. Эти особенности обуславливают высокие требования к конструкции [24], качеству изготовления и надежности эксплуатации ПГ [19].

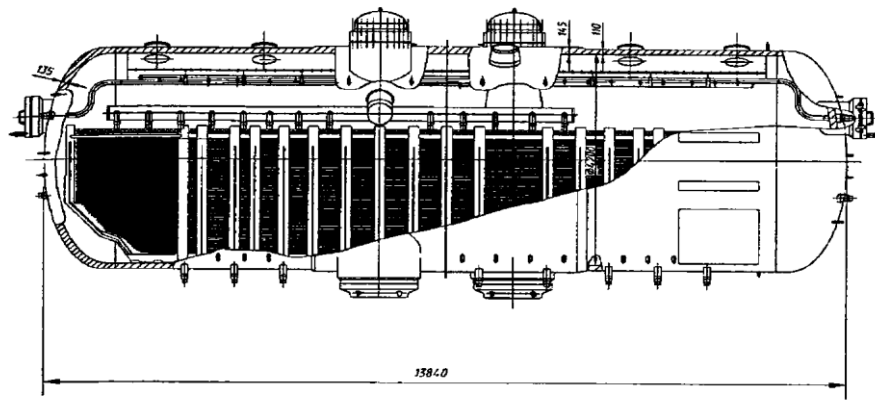
Краткая информация об энергоблоках АЭС с ВВЭР-1000 и об установленных на них ПГВ-1000, о наработке времени ПГ на разных АЭС представлена в таблице 1 [23].

ПГ типа ПГВ-1000 представляет собой горизонтальный однокорпусной теплообменный аппарат с естественной циркуляцией рабочего тела. Снизу к центральной части корпуса приварены входной и выходной коллекторы теплоносителя, имеющие одинаковую конструкцию.

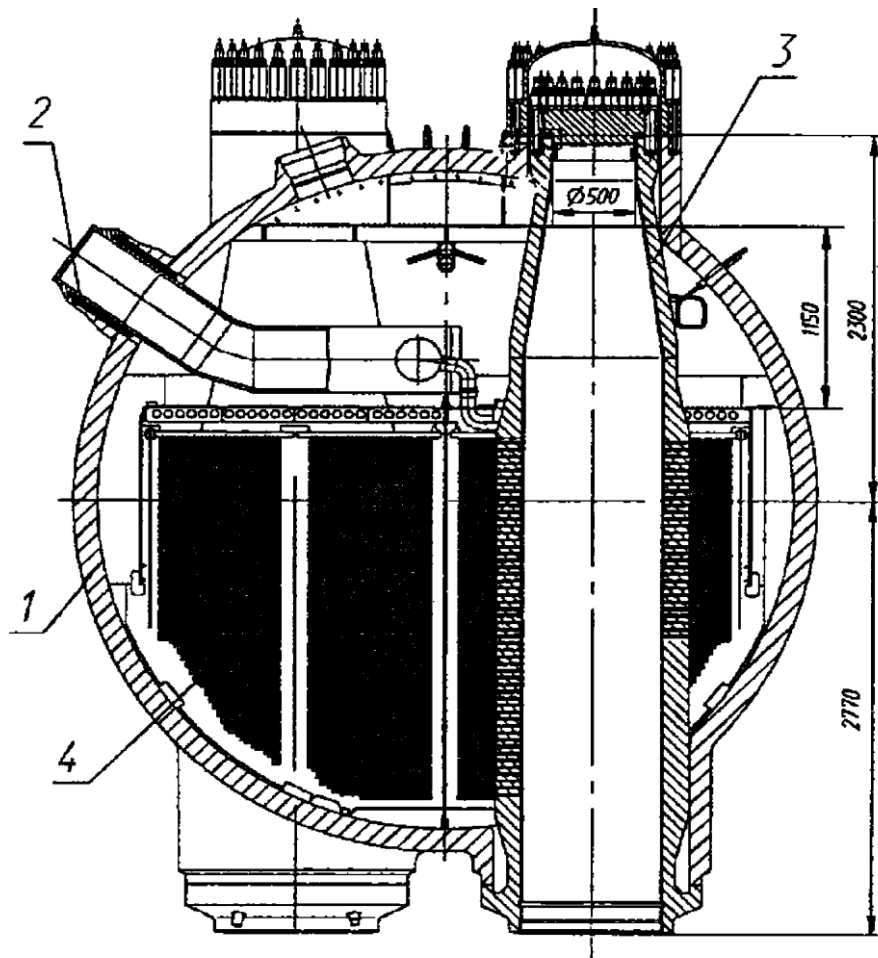
Таблица 1 – Энергоблоки АЭС с ВВЭР-1000, находящиеся в эксплуатации

Наименование АЭС, страна местонахождения	Номер энергоблока на АЭС	Год пуска блока	Год пуска работающих ПГ	Примечание
Нововоронежская (НВ) АЭС, Россия	5	1980	1989	Замена ПГ
Южно-Украинская (ЮУ) АЭС, Украина	1	1982	1989	Замена ПГ
	2	1985	1991	То же
	3	1989	1989	-
Калининская (Клн) АЭС, Россия	1	1984	1984	-
	2	1986	1986	-
Балаковская (Блк) АЭС, Россия	1	1985	1990	Замена ПГ
	2	1987	1987 и 1990	То же и ремонт
	3	1988	1988	Одного ПГ (ПГ-3)
	4	1993	1993	-
Запорожская (Зап) АЭС, Украина	1	1984	1989	Замена ПГ
	2	1985	1990	То же
	3	1986	1992	-
	4	1987	1987	-
	5	1989	1989	-
	6	1995	1995	-
Ровенская (Ровн) АЭС, Украина	3	1986	1986	-
Хмельницкая (Хм) АЭС, Украина	1	1987	1987	-
АЭС «Козлодуй», Болгария	5	1987	1987	-
	6	1993	1993	-
Ростовская (Рост) АЭС, Россия	1	2001	2001	-

Конструкция парогенератора ПГВ – 1000 показана на рисунке 1, а) и 1, б).



a)



1 – корпус; 2 – патрубок питательной воды; 3 – коллектор первого контура;
4 – трубный пучок.

Рисунок 1 – Продольный (а) и поперечный (б) разрезы парогенератора ПГВ-1000

1.2 Конструкция коллекторов теплоносителя ПГ АЭС с ВВЭР-1000

Коллекторы ПГ типа ПГВ-1000 представляют собой толстостенные вертикальные сосуды, закрепленные с двух концов в корпусе ПГ. Центральная часть коллекторов - цилиндр с внутренним диаметром 834 мм и толщиной стенки 171 мм (163 мм – из стали 10ГН2МФА и 8 мм - антикоррозионная наплавка, выполненная со стороны, омываемой теплоносителем), перфорированный отверстиями, в которых завальцованы концы труб 16x1,5 мм теплообменной поверхности. Торцы труб обвариваются в зоне антикоррозионной наплавки по всему периметру, трубы запрессовываются в коллектор с помощью взрыва.

Коллекторы расположены симметрично относительно вертикальной оси ПГ АЭС. К переходным кольцам коллекторов приварены трубопроводы для подвода и отвода теплоносителя. В верхней части коллекторы уплотняются съемными крышками, которые позволяют иметь доступ к местам завальцовки труб теплопередающей поверхности для ремонтных работ.

Наличие в стенке коллектора ПГ АЭС перфорации и неперфорированного «клина» – зоны сопряжения коллектора с корпусом ПГ оказывает существенное влияние на распределение напряжений в его стенках [3]. Исследования повреждений [16], выявленных на ПГ Запорожской АЭС и Южно-Украинской АЭС, показали, что:

- все выявленные трещины [67] зарождались в щелевом зазоре, образованном недовальцованной трубкой и стенкой коллектора, а их происхождение носило коррозионно-механический характер;

- большинство выявленных повреждений [68] располагалось по обеим сторонам «клина», характеризующихся повышенной неоднородностью поля напряжений в стенке коллектора.

Многолетний опыт эксплуатации [8] показал наиболее уязвимые места коллекторов ПГ АЭС: теплообменные трубки (ТОТ); перфорированная зона «ХК»; зона узла приварки «ГК» к ПГ (сварной шов №111).

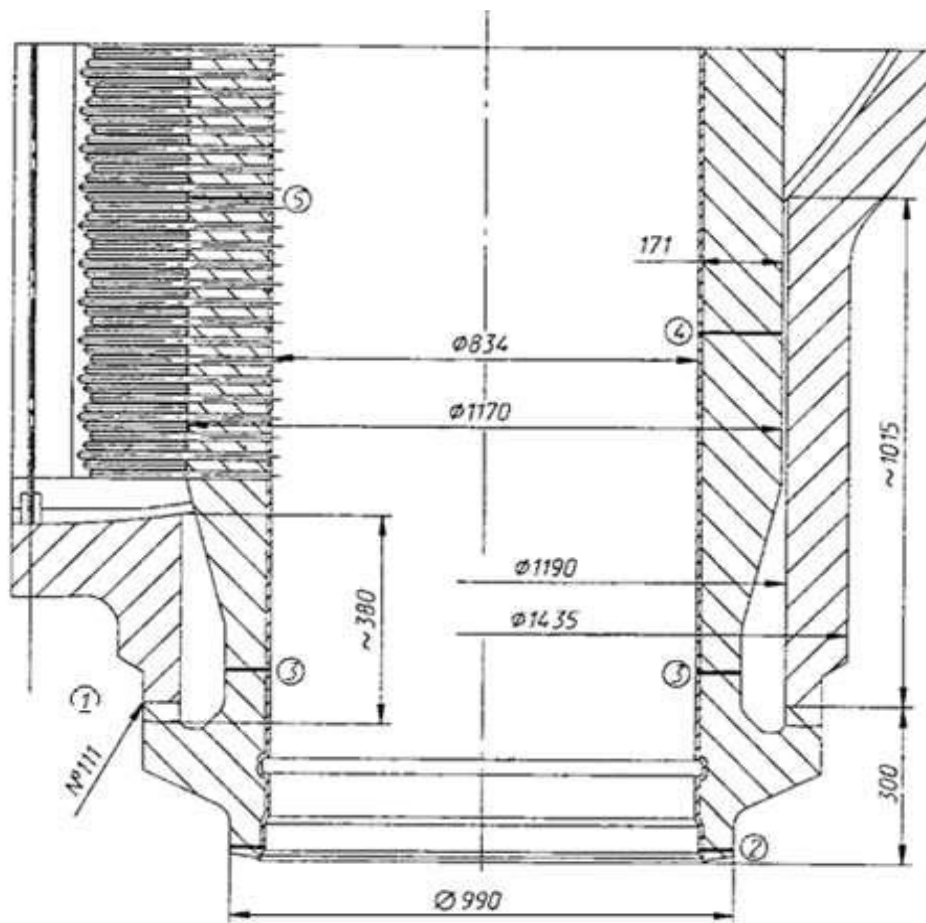
По результатам выхода из строя коллекторов была проведена модернизация узлов ПГВ-1000, в частности [4]:

- разневоливание (освобождения от заземления) верхней части коллекторов ПГ АЭС, находящихся в эксплуатации;
- довальцовка труб на выходе из коллекторов ПГ АЭС, находящихся в эксплуатации;
- для вновь изготавливаемых парогенераторов осуществлен переход на гидравлическую запрессовку труб при закреплении их в коллекторе, вместо запрессовки взрывом, что позволило исключить деформацию коллектора и многократно снизило уровень остаточных технологических напряжений;
- низкотемпературная обработка стенок коллектора ПГ АЭС в зоне неперфорированного «клина», что многократно снизило уровень остаточных технологических напряжений.

1.3 Зона узла приварки коллекторов к корпусу ПГ

Как уже отмечалось, коллекторы ввода и вывода теплоносителя приварены к центральной части корпуса ПГ. Сварка осуществляется сварным швом №111. На рисунке 2 изображена зона узла приварки коллектора к корпусу ПГ.

После присоединения коллекторов к корпусу ПГ образуется кольцевая зона, в которой скапливается шлам. Протекающие физико-химические процессы (гидролиз) приводят к снижению уровня водородного показателя рН. Массообмен в данной зоне ухудшен, поэтому она называется застойной.



1 – сварной шов №111; 2 – ГЦТ Ду 850; 3 – зона коллектора диаметром 834х90; 4 – зона коллектора диаметром 834×171, неперфорированная часть; 5 – зона коллектора, диаметром 834×171, перфорированная часть

Рисунок 2 – Район сварного шва №111

1.4 Сведения о конструкционном сплаве - стали марки 10ГН2МФА

Сталь марки 10ГН2МФА широко используется для производства оборудования АЭС: корпусов и коллекторов парогенераторов, компенсаторов давления, трубопроводов [20] и другого оборудования. Она относится к классу малолегированных сталей перлитного класса. Стали данного класса, несомненно, имеют свои достоинства и недостатки.

Основными достоинствами сталей перлитного класса являются:

– применение перлитных сталей в атомной энергетике существенно снижает стоимость вырабатываемой электроэнергии (по сравнению с использованием для тех же целей аустенитных нержавеющей сталей);

– продукты коррозии перлитных сталей не содержат кобальта [7].

Недостаток сталей перлитного класса: их коррозионная стойкость ниже, чем стойкость аустенитных [11] хромоникелевых сталей [52], поэтому необходимо применять меры по уменьшению негативного воздействия условий, в которых эксплуатируется выполненное из данного класса сталей оборудование АЭС. Важность своевременного внедрения противокоррозионных мероприятий неоспорима. На вопрос какие именно мероприятия и в какие сроки необходимо внедрять можно ответить лишь после глубокого и всестороннего анализа негативного влияния различных факторов: как состава и структуры стали, так и эксплуатационных характеристик.

Состав [12] и механические свойства стали марки 10ГН2МФА [63] по техническим условиям приведены в таблице 2 и 3 [23].

Таблица 2 – Химический состав стали марки 10ГН2МФА по ТУ 108-766-86

Массовая доля элементов, %											
C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	V	Al	Ti	Cu
0.08-0.12	0.17-0.37	0.80-1.10	≤ 0.02	≤ 0.02	≤ 0.030	1.80-2.30	0.40-0.70	0.03-0.07	0.005-0.035	≤ 0.015	≤ 0.30

Таблица 3 – Механические свойства стали 10ГН2МФА при температуре 293К

Временное сопротивление разрыву, σ_B , МПа	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа	Модуль упругости, $E \times 10^5$, МПа	Относительное удлинение, δ , %	Относительное сужение, ψ , %
539	343	2,13	16	55

В процессе изготовления и эксплуатации ПГ АЭС в конструкционных материалах [22] изменяются структура и механические свойства [13],

накапливаются микро и макро-повреждения. По данным исследований стали марки 10ГН2МФА в температурном диапазоне 250-300°C вследствие процесса деформационного старения происходит существенное снижение долговечности при циклическом нагружении. Таким образом, в ХК при 280°C не исключается интенсивный процесс деформационного [32] старения, охрупчивающий наклепанный феррит, это в определенной степени объясняет феномен разрушения [21] только ХК.

Все величины, представленные в таблице 2, являются характеристиками деформации металла.

Деформация - изменение размеров и формы тела под действием внешних усилий. Деформации подразделяют на упругие, пластические и остаточные.

Упругая деформация – деформация, исчезающая после окончания действия приложенных сил. При упругой деформации смещения точек объекта от положений равновесия обратимы.

Пластическая деформация – составляющая остаточной деформации, не вызывающая изменение объема и остающаяся после окончания действия приложенных сил. При пластической деформации перемещения точек на значительное расстояние от положений равновесия необратимы.

Остаточная деформация – деформация, остающаяся после окончания действия приложенных сил.

Пластическое деформирование металла вызывает изменение ряда свойств одновременно с изменением его формы и размера. Пластичность обеспечивает конструкционную прочность деталей под нагрузкой и нейтрализует влияние концентраторов напряжений.

Простой и наиболее распространенный метод определения механических характеристик материалов - испытание образцов на растяжение.

При растяжении образец удлиняется, а его поперечное сечение непрерывно уменьшается. Истинное напряжение определяется делением действующей в определенный момент нагрузки на площадь, которую образец

имеет в этот момент. Истинные напряжения в повседневной практике не определяют, а пользуются условными напряжениями [69], считая, что поперечное сечение F_0 образца остается неизменным.

На рисунке 3 изображена качественная диаграмма растяжения в координатах: нагрузка P – удлинение Δl образца, которая характеризует поведение металла при деформировании от начального момента нагружения до разрушения.

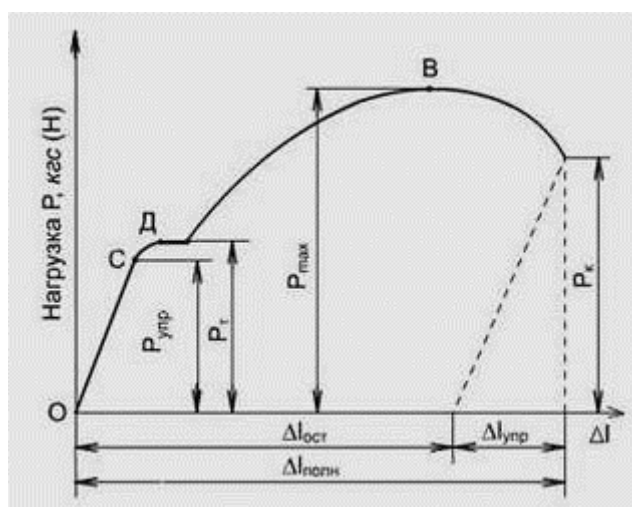


Рисунок 3 – Диаграмма растяжения

На диаграмме 4 выделяют три участка:

– участок упругой деформации: до нагрузки $P_{упр}$. Если образец нагрузить в пределах $P_{упр}$, затем полностью разгрузить, то никаких последствий нагружения не обнаружится. Такой характер деформирования называется упругим;

– участок равномерной пластической деформации: от нагрузки $P_{упр}$ до P_{max} . При нагружении образца более $P_{упр}$ появляется остаточная пластическая деформация, вместе с тем идет упрочнение металла. При дальнейшем нагружении пластическая деформация увеличивается, равномерно распределяясь по всему объему образца;

- участок сосредоточенной пластической деформации: от нагрузки R_{max} до R_k . При достижении максимального значения нагрузки R_{max} в наиболее слабом месте появляется местное утонение образца – шейка, в которой в основном сосредотачивается пластическая деформация. Несмотря на уменьшение нагрузки, растягивающие напряжения в шейке повышаются и при нагрузке R_k происходит разрушение образца;
- отмеченные нагрузки $R_{упр}$, R_T , R_{max} , R_k на диаграмме растяжения 4 используются для определения основных характеристик прочности:
 - предел упругости, $\sigma_{упр}$ - наибольшее напряжение при различных видах деформации, при котором еще не обнаруживается остаточная деформация;
 - предел текучести (условный), $\sigma_{0,2}$ – это напряжение, которому соответствует пластическая деформация 0,2%;
 - предел текучести (физический), σ_T – наименьшее условное напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения нагрузки;
 - временное сопротивление, σ_{max} , σ_B , характеризует максимальную несущую способность материала, его прочность, предшествующую разрушению.

1.5 Некоторые актуальные вопросы оценки прочности и ресурса элементов ответственного оборудования АЭС при термосиловом нагружении

В современных условиях атомная энергетика вносит весомый вклад в экономику Украины – около 50 % всей производимой в настоящее время электроэнергии вырабатывается на четырех атомных станциях с 15 действующими энергоблоками, оснащенными реакторами типа ВВЭР-1000 и ВВЭР-440 [18, с. 41].

Однако атомные электростанции АЭС [70] являются потенциальными техногенноопасными объектами аварии [71] на которых могут привести к непоправимым последствиям. В связи с этим контроль за состоянием технологического оборудования и своевременного устранения его повреждений являются основными условиями надежности [40] 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 [18, с. 41].

В реакторах ВВЭР-1000 в наиболее жестких условиях эксплуатации работают парогенераторы (ПГ) типа ПГВ-1000 [22, 24]. В них дефекты чаще всего образуются в теплообменных трубках. В 1998-2001 г.г. в узлах сварного соединения №111 «горячего коллектора» с патрубком ПГ №1 и 2 блока №1 Южно-Украинской АЭС, ПГ №1 и 3 блока №5 Ново-Воронежской АЭС были обнаружены трещиноподобные дефекты [15].

Проведенные на стадии проектирования в соответствии с требованиями ПНАЭ Г-7-002-86 [32] прочностные расчеты этого узла ПГ свидетельствовали о возможности его безопасной эксплуатации в пределах расчетного срока 30 лет. После обнаружения первых случаев повреждения данного узла при длительности эксплуатации гораздо ниже указанного срока были выполнены повторные расчеты в соответствии с принятыми нормами, а также дополнительные исследования [33], в том числе материаловедческие [15], но они не дали однозначного ответа на вопрос о причинах возникновения повреждений.

Поскольку все обнаруженные повреждения (трещины) были локализованы практически в одном и том же месте на узлах, изготовленных по разным технологиям, можно заключить, что существует общая причина разрушений, а в проведенных ранее расчетах недостаточно полно учитывались особенности нагружения, деформирования и повреждения материала в области узла приварки.

В связи с этим были выполнены уточненные оценка напряженно-деформированного состояния НДС сварного узла и расчет ресурса его работы с более полным учетом реальных условий эксплуатации [51, 55, 56, 57].

Основными отличительными моментами проведенного исследования были:

- уточнение нагрузок на узел с учетом изгибающего момента из-за некомпенсированного термического расширения петли главного циркуляционного контура (ГЦК);

- трехмерная расчетная модель узла сварного соединения, которая позволила учесть влияние корпуса ПГ и установить существенную немонотонность напряженно-деформированного состояния сварного узла в окружном направлении;

- применение оригинальных программных средств, повышающих точность определения НДС;

- сопоставление результатов расчетов с данными натурных измерений с помощью специально разработанной многоканальной системы тензо- и термометрии [51] с целью подтверждения корректности расчетных схем и гипотез;

- применение для оценки ресурса критерия исчерпания пластичности металла при повторно-статическом нагружении с учетом влияния среды.

При построении расчетных моделей узла сварного соединения и задании условий нагружения необходимо было из множества факторов корректно учесть ключевые. В качестве основных расчетных режимов нагружения выбраны: гидроиспытания ГИ на плотность с давлением теплоносителя в первом контуре $p_1 = 18$ МПа, во втором – $p_2 = 8$ МПа (далее 18/8 МПа); ГИ на прочность при давлениях 25/11 МПа и нормальные условия эксплуатации (НУЭ) при давлении 16/6 МПа. Детальный анализ поведения рассматриваемой конструкции при разогреве и расхолаживании с использованием инженерных и численных методов расчета свидетельствует о наличии дополнительного

существенного фактора нагружения данного сварного узла изгибающим моментом, что связано с некомпенсированным термическим расширением элементов петли ГЦК.

С целью получения уточненной оценки изгибающего момента выполнено численное моделирование поведения полной ветви первого контура реактора, включая все ее элементы (корпус реактора, «горячая» и «холодная» ветвь главного циркуляционного трубопровода, главный циркуляционный насос, корпус ПГ, коллекторы, опоры), с учетом нагружения давлением и температуры с помощью вышеуказанного специализированного вычислительного комплекса для расчетов трубопроводов сложной пространственной конфигурации, базирующегося на методе начальных параметров [17]. Полученные уточненные данные о величине изгибающего момента при различных режимах нагружения использовались при расчете НДС узла.

Определение НДС узла ПГ основывалось на положениях линейной теории упругости и теории малых упругопластических деформаций для трехмерных изотропных и кусочно-неоднородных тел. Решение краевых задач осуществлялось методом конечных элементов на основе смешанных вариационных SPACE [50].

Было проведено тщательное обоснование применяемых расчетных схем и точности получаемых решений. Сопоставление результатов расчетов с данными натурных измерений НДС на наружной поверхности узла приварки в области сварного шва свидетельствует о правомерности использованных моделей узла ПГ и расчетных схем [57]. Измерения выполнялись с применением специально разработанной многоканальной системы тензо- и термометрии элементов конструкций. Регистрирующая система, созданная на современной элементной базе, обеспечивала непрерывное измерение, накопление и хранение результатов и использовалась для регистрации упругих деформаций и температуры узла приварки «горячего» коллектора к патрубку парогенератора ПГВ-1000 в течение длительного периода времени между планово-предупредительными ремонтами [51].

Анализ результатов расчетов показал, что наиболее неблагоприятное влияние на НДС узла сварного соединения № 111 оказывает давление во втором контуре (в корпусе ПГ), при этом значительно повышается уровень растягивающих напряжений. Давление в первом контуре снижает уровень максимальных растягивающих напряжений на поверхности «кармана» от давления во втором контуре. Изгибающий момент, вызванный некомпенсированным термическим расширением элементов петли первого контура, существенно повышает уровень максимальных растягивающих напряжений у поверхности «кармана» и асимметрию распределения напряжений по азимуту (Рисунок 4).

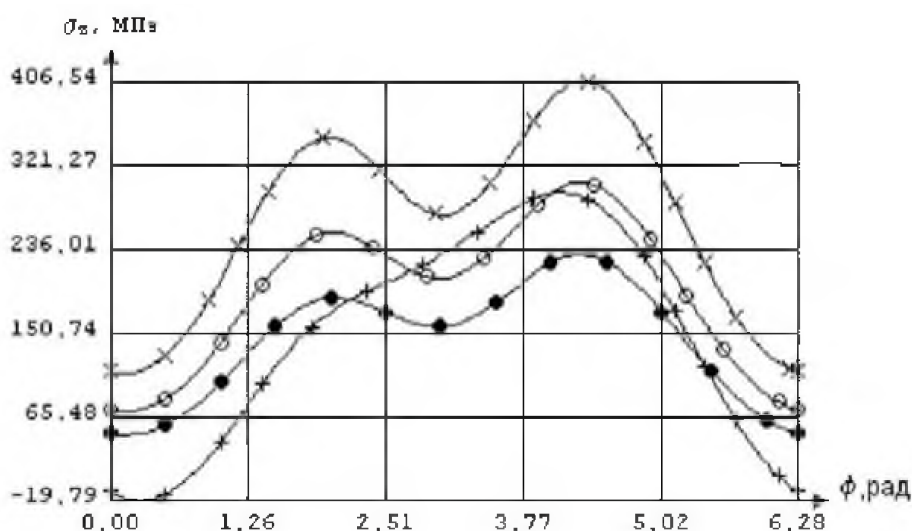


Рисунок 4 – Распределение по окружности напряжений σ_z на внутренней стенке патрубка ПГ на высоте 20 мм от дна «кармана», вызванное совместным действием давления и изгибающего момента: + - $p_1 = 16$ МПа, $p_2 = 6$ МПа, $M = 2,279$ МН×м; X - $p_1 = 25$ МПа, $p_2 = 11$ МПа, $M = 1,082$ МН×м; O - $p_1 = 18$ МПа, $p_2 = 8$ МПа, $M = 0,977$ МН×м; • - $p_1 = 16$ МПа, $p_2 = 6$ МПа, $M = 0,827$ МН × м (окружная координата отсчитывается от более длинной стороны патрубка против часовой стрелки)

Наибольший уровень напряжений на поверхности «кармана» имеет место в области по окружности с координатой $\phi = 4,1...4,3$ рад ниже линии сопряжения галтели с внутренней цилиндрической поверхностью патрубка ПГ, что соответствует расположению дефектов, наблюдавшихся на ПГ в 1998-

2001 г. На максимальный уровень напряжений также влияют термические напряжения, которые возникают из-за градиента температур в узле при нормальных условиях эксплуатации вследствие разности температур теплоносителя в первом и втором контурах, а также в результате продувки «кармана» узла [55].

В работе [56] показано, что при ГИ на прочность [28] и плотность максимальные напряжения с учетом концентрации напряжений у дефектов от механической обработки и сварки превышают предел текучести, что приводит к пластической деформации, накопление которой при повторных циклах нагружения снижает ресурс пластичности металла, особенно с учетом влияния среды, и стимулирует зарождение трещин.

Таким образом, чтобы обеспечить безопасную эксплуатацию оборудования и трубопроводов в такой сложной и наукоемкой отрасли, как атомная, необходимо решить ряд важных проблем, в частности обеспечение конструкционной целостности и продление срока службы наиболее ответственного оборудования и трубопроводов АЭС [64], в первую очередь корпусов реакторов и парогенераторов, путем проведения значительного объема исследований при тесном сотрудничестве и координации усилий не только украинских, но и российских, а также западных ученых.

1.6 Термообработка сварных соединений главного циркуляционного трубопровода Ду 850 при замене парогенераторов ПГВ-1000М на Южно-Украинской АЭС

В процессе работы блоков АЭС с ядерными реакторами ВВЭР–1000 наиболее часто выходят из строя парогенераторы ПГВ–1000М. Основная причина — повреждения (питтинг, микротрещины), образующиеся на наружной поверхности теплообменных трубок диаметром 13×1,5 мм из нержавеющей стали 08Х18Н10Т, обусловленные коррозией под напряжением.

Поскольку пока практически не существует эффективных способов их ремонта, то после «глушения» допустимого их количества, вышедшие из строя

ПГ заменяют, что включает проведение комплекса технологических операций. Наиболее сложные и дорогостоящие из них – это стыковка, сварка [53], термообработка и контроль качества сварных соединений главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) Ду 850 с коллектором ПГ в монтажных условиях. При исключении из работы более 10% таких трубок КПД значительно снижается, и работа реакторной установки становится малоэффективной. В связи с этим АЭС вынуждена заменять вышедшие из строя ПГ.

Работа по замене парогенераторов состоит из трех этапов:

- отсоединение технологических трубопроводов и демонтаж парогенераторов, подлежащих замене;
- подготовка опорных конструкций, технологических трубопроводов;
- обработка кромок главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ);
- монтаж ПГ с подсоединением и сваркой технологических трубопроводов.

Самая сложная операция при этом — стыковка, сварка [29] и термическая обработка сварных соединений ГЦТ с ПГ, которые относят к первому контуру АЭС. Цикл операции составляет около 20 суток. Трубопроводы ГЦТ Ду 850 и коллектор ПГ изготовлены из легированной стали перлитного класса марки 10ГН2МФА по ТУ 108.1197-83, плакированной по внутренней поверхности аустенитной сталью марки ЭИ-898 (04Х20Н10Г2Б). Толщина основного перлитного металла составляет 60 мм, плакировки – 5 ... 7 мм.

Сварку кольцевых стыков соединений ГЦТ Ду 850 с патрубками ПГ, а также антикоррозионную наплавку выполняют по технологии, разработанной ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» (Москва) в соответствии с ТИ 24.125.30.2.5.2.90.00118. Применяют комбинированную сварку. Корень шва выполняют ручной аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом с

применением присадочной сварочной проволоки Св–08Г2С. Для заполнения разделки ручной электродуговой сваркой применяют электроды ПТ–30. Сборку и сварку производят с предварительным и сопутствующим подогревами до 120–250 °С. Антикоррозионную двухслойную наплавку выполняют ручным дуговым способом. Первый слой наплавляется электродами ЗИО–8, второй — ЭА 898/21Б.

С целью снижения остаточных сварочных напряжений, стабилизации структуры и улучшения свойств металла шва и ЗТВ сварные соединения ГЦТ Ду850 подвергают послесварочной термической обработке (высокий отпуск 620–650 °С).

Термическая обработка стыков трубопроводов ГЦТ с штуцерами парогенератора представляет собой сложную операцию. Конструктивные особенности узла, малая длина прямого участка патрубка в сочетании со значительными перепадами толщины металла [39] в нем осложняют выполнение местной термообработки.

В качестве источника нагрева была выбрана среднечастотная индукционная нагревательная установка фирмы «АФТ–Элотерм» мощностью 400 кВт. Установка состоит из блока питания массой 10,5 т, модуля управления массой 0,8 т, силовых кабелей 10×95 мм², рабочего водоохлаждаемого кабеля-индуктора и кабелей управления. Размещение этого оборудования требует больших площадей, источника воды для охлаждения с расходом не менее 110 л/мин. Вода должна иметь электрическое сопротивление не ниже 4 кОм, жесткость не более 8,5 мгекв/л и температуру 18–22 °С. Энергоснабжение установки осуществляется двумя источниками трехфазного тока мощностью по 620 кВт·А. Равномерность нагрева термически обрабатываемой зоны достигали, применяя специальную конструкцию укладки рабочего водоохлаждаемого индуктора (рисунок 5), что привело к очень большим трудовым затратам.

Термообработку сварных соединений ГЦТ этим оборудованием выполняли при монтаже блоков ВВЭР–1000 и заменах ПГ при предыдущих ремонтах.

ОАО «ЮТЭМ» совместно с ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработана методика термической обработки сварного соединения ГЦТ с патрубком ПГ радиационным способом нагрева с применением оборудования фирмы «Велдотерм» «Стандарт Европа 82/6». Тепловой расчет произведен с учетом требований ТИ 2731.25150.00012, разработанной ОАО НПО «ЦНИИТМАШ».

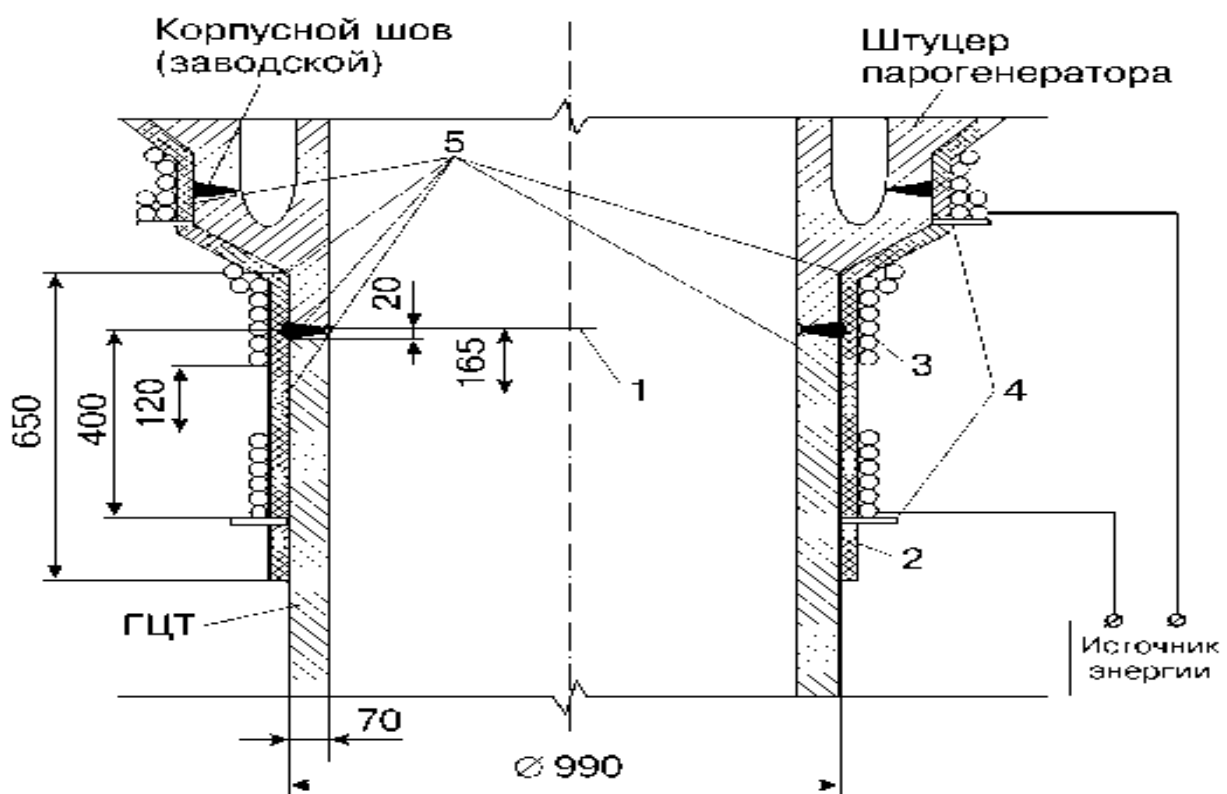


Рисунок 5 – Схема укладки водоохлаждаемого индуктора: 1 – сварное соединение; 2 – теплоизоляция; 3 – водоохлаждаемый индуктор; 4 – штыри для крепления индуктора; 5 – места установки термопар.

«Стандарт Европа 82/6» представляет собой однокорпусный агрегат массой 490 кг с шестью независимыми каналами, автоматически регулирующими температуру подогрева. Максимальная потребляемая мощность 82 кВт. К каждому каналу можно подключить по пять керамических

электронагревателей мощностью 2,7 кВт каждый. Нагреватели имеют различные размеры, что дает возможность легко подобрать любую контролируемую зону нагрева.

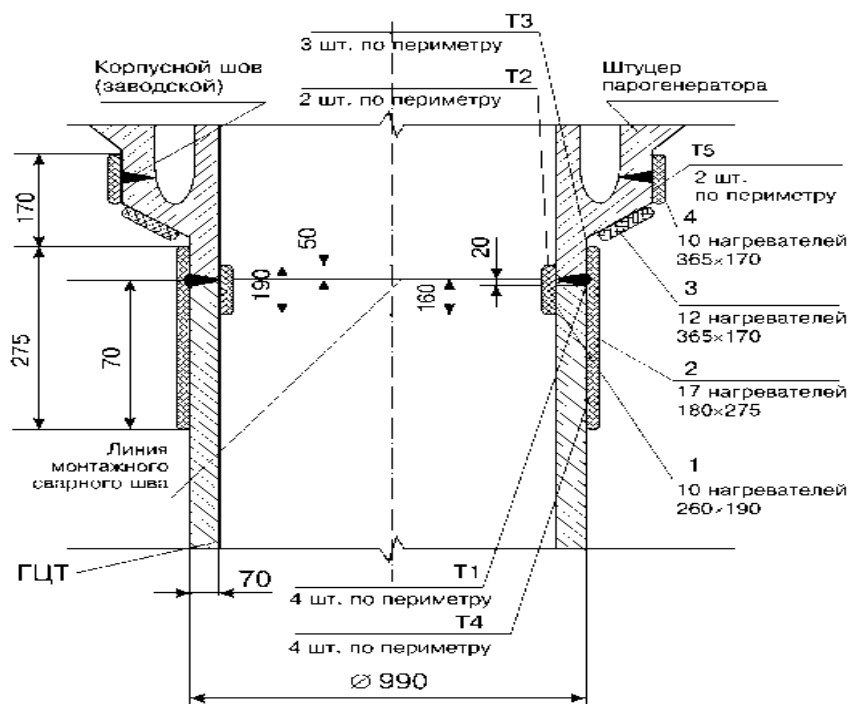
Согласно ТИ 2731.25150.00012, в процессе термообработки сварного соединения ГЦТ с ПГ обязательным требованием является контроль температуры подогрева в шести точках (рисунок 6).

При разработке технологии была выбрана схема зонального нагрева. Конструкцию сварного соединения, подлежащую термической обработке, разбивается на четыре зоны с автономной регулировкой режимов термообработки (рисунок 6).

Основная зона 2 состоит из 17 керамических нагревателей 180×275 мм и подключается к четырём каналам установки.

Для равномерного разогрева сварного соединения по всей толщине трубы производится внутренний подогрев десятью нагревательными элементами (260×190 мм), собранными в блоки на специальном приспособлении из двух полуколец (рисунок 6).

Установку полуколец в трубе производится при помощи разжимных штанг. Зоны нагрева 3 и 4 выполняются соответственно из десяти и двенадцати нагревателей, размерами 365×170 мм. Нагреватели подключаются к двум установкам «Стандарт Европа 82/6» с использованием 11 независимо регулируемых каналов: первая зона нагрева – 4, вторая – 2, третья – 3 и четвертая зона – 2 канала.



температура: 1, 2, 3 – зоны равномерного нагрева до температуры: 1, 2, 3 – зоны равномерного нагрева до температуры 620 – 650 °С; 4 – зоны нагрева до температуры 500 °С; T1 – T5 – места установки термопар для контроля режимов термообработки.

Рисунок 6 – Схема расположения нагревателей и точки контроля

К трубе нагреватели крепятся при помощи шпилек из проволоки Св-08Г2С, приваренных контактной сваркой приспособлением, поставляемым с оборудованием (рисунок 7).

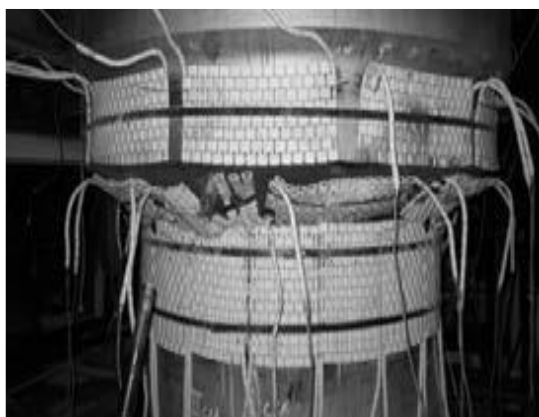


Рисунок 7 – Расположение нагревателей на приспособление для нагрева внутренней стороны сварного соединения.

Контроль и регулировку режимов нагрева выполняются термометрами, изготовленными из термоэлектродов диаметром 0,5 мм со статической характеристикой К (ТХА). На каждую зону нагрева устанавливают по две термопары — рабочую и дублирующую. Термопары подключают к регистрирующим потенциометрам и параллельно к программаторам, установленным на оборудовании, которые автоматически регулируют режимы нагрева.

Тепловую изоляцию сварного соединения в зоне термической обработки выполняют в два слоя: первый слой из керамических матов толщиной 25 мм, второй — из базальтовых полотнищ толщиной 50 мм, армированных проволокой. Термическую обработку проводят по режиму высокого отпуска (рисунок 8).

Скорость нагрева до температуры 450 °С составляет 100 °С/ч. Для равномерного прогрева трубы и патрубка по всей толщине сварное соединение выдерживают при температуре 450 °С в течение 1 ч. Скорость нагрева до температуры 620–660 °С соблюдается в пределах 50 °С/ч. Длительность выдержки при температуре отпуска 620 – 660 °С составляет 7–8 ч.

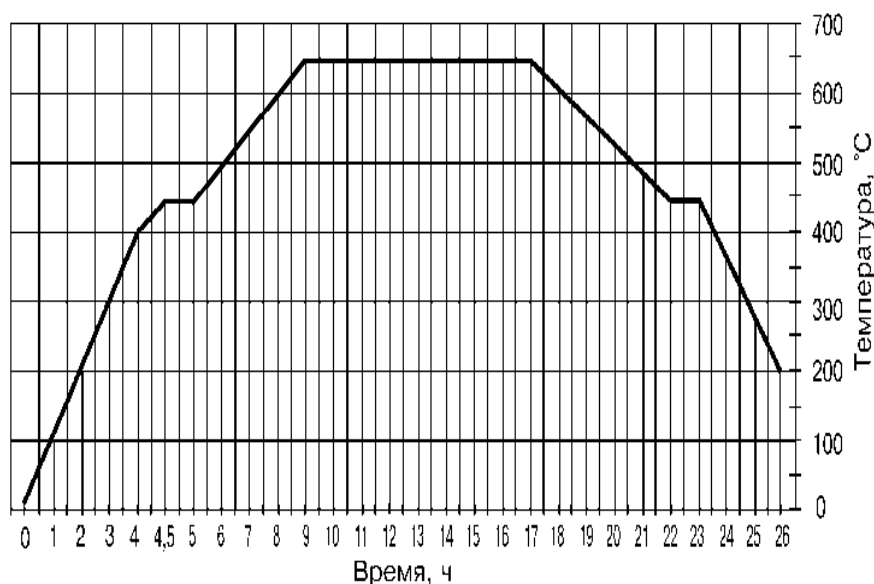


Рисунок 8 – Диаграмма выполнения термообработки по режиму высокого отпуска

Ширина зоны равномерного нагрева при температуре отпуска составляет 160 мм в сторону трубопровода и 70 мм в сторону коллектора парогенератора (рисунок б).

В процессе отпуска температура в районе корпусного стыка (зона 4) согласно требованиям инструкции ОАО НПО «ЦНИТМАШ» не должна превышать 500 °С. Ее контролируют по отдельному режиму.

Охлаждение зоны термообработки после отпуска до температуры 450 °С проводят со скоростью 40 °С/ч, до температуры 250 °С — не более 80 °С/ч. Дальнейший процесс остывания до температуры окружающей среды проходит под слоем изоляции.

Сварное соединение до и после термообработки подвергают радиографическому, ультразвуковому контролю и контролю методом цветной дефектоскопии. После проведения термообработки дополнительно измеряют твердость металла шва и ЗТВ.

Как показывает опыт, примененный радиационный метод термообработки с использованием оборудования «Стандарт Европа 82/6» имеет ряд преимуществ перед индуктивным, при котором используют оборудование «АФТ–Элотерм»:

- энергозатраты на выполнение термообработки уменьшились более чем в 2 раза;
- не требуется больших площадей для размещения оборудования и источника охлаждающей воды;
- источником питания может служить стандартная силовая сборка трехфазного тока;
- установка нагревателей и их подключение занимает значительно меньше времени, чем намотка водоохлаждаемых индукторов. Подготовку сварного соединения для термообработки установкой «Стандарт Европа 82/6» выполняют четыре термиста в течение 18 ч, тогда как намотка индукторов и их подключение к оборудованию «АФТ – Элотерм» занимает более 1,5 суток;

– автоматическое независимое регулирование режимов термообработки отдельных зон выполняется автоматически. При индуктивном методе тепловложение в разных зонах регулируют количеством витков индуктора, поэтому в процессе термической обработки приходится уменьшать или увеличивать количество витков или расстояние между ними в разных зонах нагрева;

– длительность цикла термообработки радиационным методом с установкой и снятием нагревателей составляет 2,5 суток по сравнению с 4 – 4,5 суток при термообработке индуктивным методом.

– Персонал ОАО «ЮТЭМ» провел большую работу по обучению термистов и внедрению нового оборудования по термической обработке.

Оборудованием «Стандарт Европа 82/6» специалисты ОАО «ЮТЭМ» выполнили не только термическую обработку четырех стыков ГЦТ при замене двух парогенераторов на ЮУАЭС, но и более 10 тысяч сварных соединений трубопроводов разных размеров при монтаже котлоагрегата производительностью 670 т пара в час на Старобешевской ТЭС. Приобретенный опыт дает возможность специалистам ОАО «ЮТЭМ», применяя оборудование фирмы «Велдотерм», обеспечивать гарантированное качество термической обработки радиационным методом.

2 Исследование структуры и свойств металла сварных соединений при сварке с термообработкой и без ее применения

2.1 Технические и технологические характеристики установок для термообработки трубопроводов главного циркуляционного контура АЭС

Для нагрева под сварку, проведения «термического отдыха» и высокого отпуска сварных соединений Ду 850 с патрубками корпуса реактора используются индукционные нагревательные установки повышенной частоты производства Российской Федерации [61, с. 39].

Для проведения нагрева под сварку и термическую обработку сварных соединений ГЦК необходимо иметь две установки: одну – основную, вторую – резервную. Резервная установка используется для немедленного подключения в случае отказа основной [61, с. 39].

Индукционная нагревательная установка повышенной частоты состоит из источника питания (инвертора), блока конденсаторов, устройства регулирования и контроля температуры и гибкого водоохлаждаемого кабеля в термостойкой изоляции в качестве индуктора [61, с. 39].

Для обеспечения стабильного режима нагрева стыков при термообработке источники электропитания целесообразно подсоединять к отдельным силовым трансформаторам, к которым не должны подключаться другие потребители. Колебания напряжения питающей сети не должны превышать $\pm 5\%$ от номинального значения. Необходимо предусматривать резервное питание, характеристики которого должны быть аналогичны основной питающей сети.

Технические данные:

- Напряжение питания, В – 3х380;
- Напряжение повышенной частоты, В – 800;
- Выходная частота, Гц – 1000 – 2400;
- Мощность, кВт – 250;

– Диаметр гибкого водоохлаждаемого кабеля, мм – 30 – 40.

При использовании многопостовых источников питания (выпрямителей, преобразователей) последние должны обеспечивать отсутствие влияния отдельных сварочных постов друг на друга. При использовании многопостовых систем: многопостовой выпрямитель – балластные реостаты это возможно при наличии источника питания (выпрямителя) с вольт - амперными характеристиками (ВЛХ), обеспечивающей соотношение U/I_n , равным (4-6) В (при номинальной нагрузке) [61].

Преобразователь повышенной частоты рекомендуется располагать на расстоянии не более 60 м от нагреваемого объекта, а конденсаторную батарею и шкаф управления – на расстоянии не более 15 м от него [61, с. 40].

При условии обеспечения режимов термической обработки, допускается применение других типов оборудования, нагревательных устройств и схем их размещения. При этом по согласованной с разработчиком программе, до проведения окончательного отпуска проводятся пробные нагревы макетов или сварных узлов штатного изделия, с перегревом до температуры не более 500 °С [61, с. 40].

При термообработке сварных соединений трубопровода Ду 850 с патрубками корпуса реактора применяют осевой вентилятор (рисунок 9) типа 06-300 N 8 с шестью стальными лопастями (расход воздуха от 16000 м³ /ч до 24000 м³ /ч, давление 250 Па, мощность двигателя 3,0 кВт) [61, с. 40].

Допускается использовать другой тип вентилятора, техническая характеристика которого близка к вышеуказанному.

Воздушный поток от вентилятора направляется диффузором (рисунок 10), который изготавливается из листовой стали толщиной от 1,0 мм до 1,5 мм и состоит из раструба (поз.2) и конуса (поз.3), удерживаемого в раструбе с помощью распорок (поз.4) [61, с. 40].

Для предотвращения подстуживания нагреваемой зоны потоком воздуха внутри трубопровода устанавливаются теплоизоляционные перегородки (рисунок 10) [61, с. 40].

Перегородка состоит из металлического кольца (поз.3), металлических пластин (поз.6), металлических прутков (поз.5), теплоизоляционных стенок (поз.1), между которыми проложена каолиновая вата (поз.2). Для крепления перегородок внутри трубопровода используются болты (поз.4) [61, с. 40].

Все детали перегородки, соприкасающиеся с внутренней поверхностью трубы Ду 850 должны быть изготовлены из коррозионностойких сталей аустенитного класса [61, с. 40].

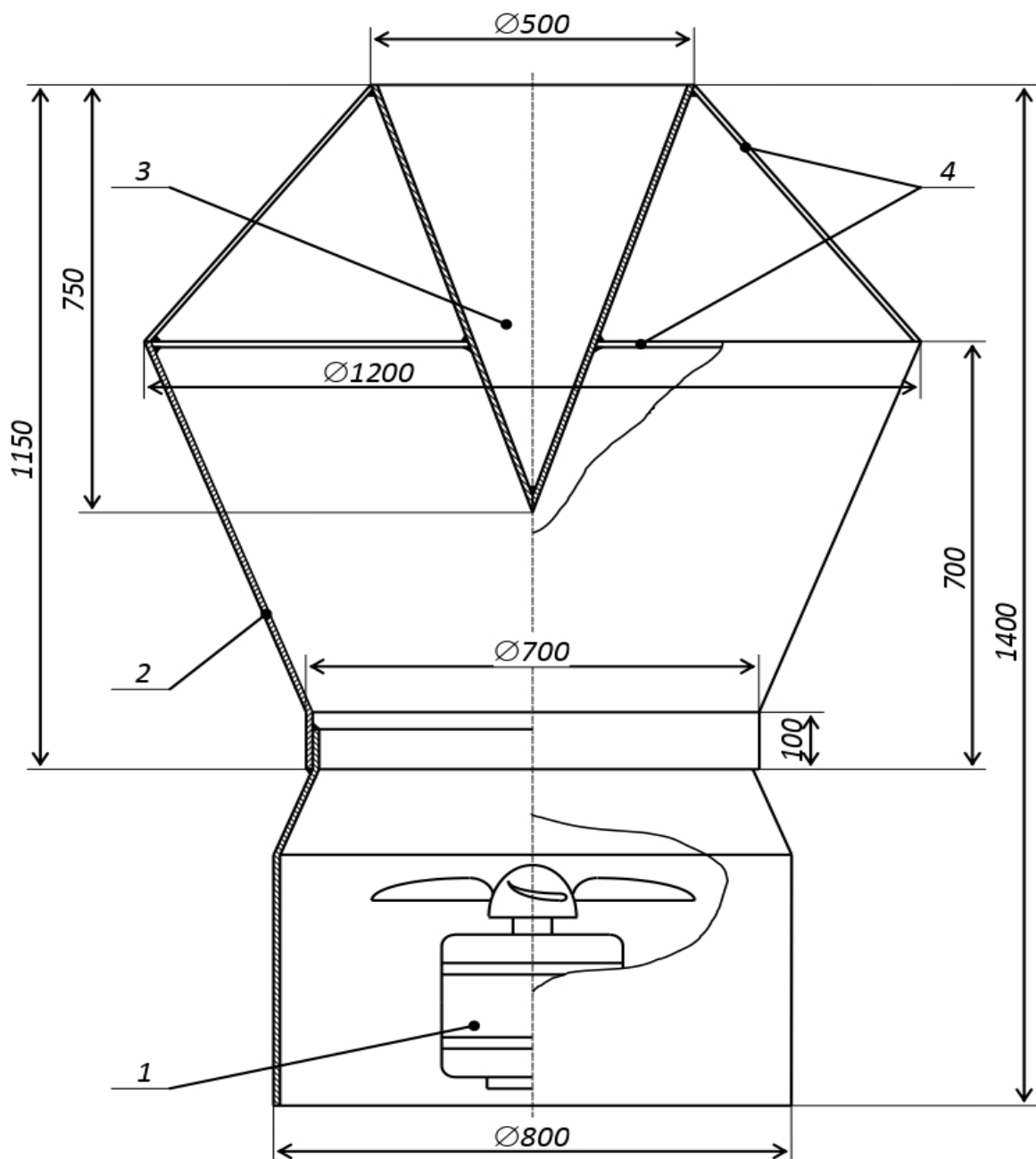
Для снижения тепловых потерь наружная поверхность сварного соединения теплоизолируется. В качестве теплоизоляционных материалов рекомендуется использовать:

- муллитокремнеземистый войлок МКРВ-200;
- муллитокремнеземистый фетр МКРФ-100;
- муллитокремнеземистый картон МКРК-500;
- кремнеземистая ткань КТ-11, КТ-11-С8/3-ТО;
- каолиновая вата ВКВ; стеклолента;
- муллитокремнеземистый рулонный материал МКРР-130;
- минеральная вата М100, М125.

Допускается использовать другие теплоизоляционные материалы, обладающие аналогичными характеристиками.

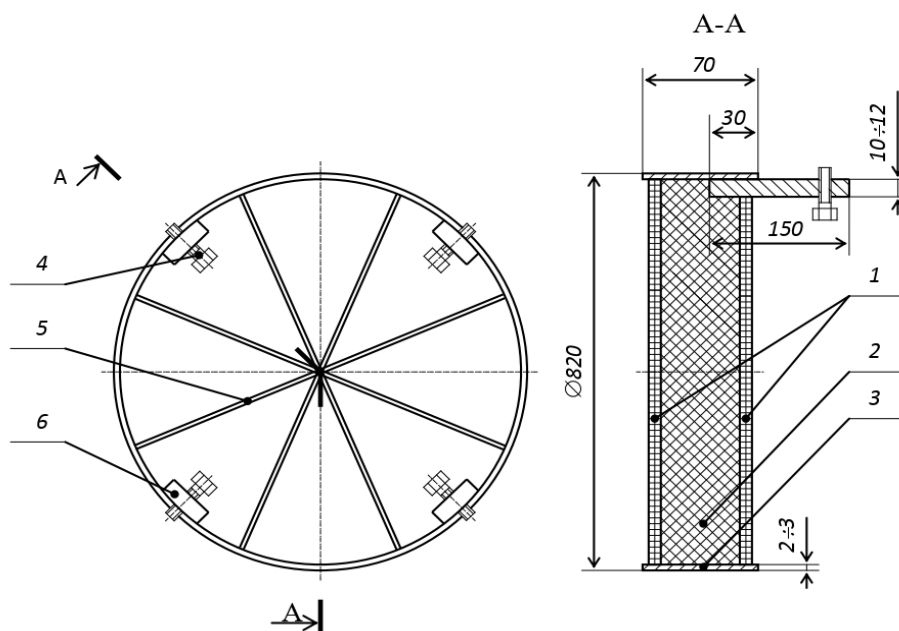
Перед началом работ по подогреву и термообработке, а также в процессе выполнения работ необходимо проводить контроль оборудования, приборов, технологической оснастки [61, с. 43].

Оборудование должно быть укомплектовано средствами измерения, прошедшими метрологическую поверку.



1 – осевой вентилятор; 2 – раструб; 3 – конус (листовое железо, толщиной от 1 до 1,5 мм); 4 – распорки (диаметром 10-15мм).

Рисунок 9 – Осевой вентилятор с диффузором



- 1 – муллитокремнеземистый картон; 2 – минеральная вата; 3 – кольцо сварное;
 4 – болт М12х100; 5 – пруток диаметром 5мм; 6 – металлическая пластина.

Рисунок 10 – Теплоизоляционная перегородка

2.2 Последовательность выполнения операций при сварке сварного соединения ГЦТ Ду 850 трубопровода с патрубком реактора.

Выполнение сварных соединений плакированного трубопровода Ду 850 главного циркуляционного трубопровода с патрубками корпуса реактора производится по следующей схеме операций [61, с. 43]:

- заварка корня шва;
- контроль корня шва (ВИК, КК, РГК) [35, 37, 36];
- в случае необходимости ремонт корня шва;
- подогрев;
- сварка (50 % глубины разделки);
- контроль на наличие дефектов СС (ВИК, РГК) [35, 36];
- при необходимости выборка дефектов;
- заварка дефектов + сварка до 100 % заполнения глубины разделки;
- промежуточный отпуск;

- снятие усилия механическим способом с наружной стороны заподлицо;
- контроль СС (ВИК, КК, РГК, УЗК) [35, 37, 36, 38];
- при необходимости – выборка дефектов;
- подогрев под заварку дефектов + ремонтные операции;
- «термический отдых»;
- контроль качества СС (ВИК, КК, РГК, УЗК) [35, 37, 36, 38];
- окончательный отпуск;
- неразрушающий контроль (ВИК, КК, РГК, УЗК) [35, 37, 36, 38];
- наплавка;
- неразрушающий контроль наплавки и сварного соединения (ВИК, КК, УЗК) [35, 37, 38].

В местах стыковки трубопровода с патрубками корпуса реактора подогрев перед сваркой, заварка корня шва и основной этап сварки (заполнение стыка) должны проводиться одновременно на стыках противоположных, т.е. пояс зоны патрубков реактора должен быть нагрет симметрично, равномерно, с противоположных сторон. Время сварки противоположных патрубков с трубопроводом должно быть одинаковым. Не допускается существенных опережений на одном из стыков [57, с. 43].

2.3 Подогрев под сварку сварных соединений ГЦТ Ду 850.

После получения разрешения службы технического контроля на сварку приступить к подогреву под сварку [61, с. 44].

Включить установку. Установить по показаниям ваттметра потребляемую мощность в пределах от 30 кВт до 40 кВт.

Выходные параметры преобразователя настроить на режим работы с нагрузкой (индуктором) по показаниям фазометра, вольтметра, амперметра.

Фазометр должен показывать величину $\cos \varphi$, близкую к единице (0,9...1), а ток и напряжение должны составлять его номинальные значения.

Нагреть сварное соединение до температуры 250 °С (показания термопреобразователей ВК1, ВК2, ВК3, ВК4, ВК6) и отключить напряжение, подаваемое на индуктор. Начать сварку. При охлаждении металла до 150 °С остановить сварку и повторить нагрев [61, с. 44].

Аналогичные требования предъявляются к подогреву при выполнении послойной механической зачистки шва. В процессе нагрева осуществлять контроль за работой термопреобразователей и самопишущего прибора – правильной записью температур на диаграммной ленте. В случае обнаружения неисправных термопреобразователей, заменить их на дублирующие. Поддерживать температуру в указанном интервале температур в течение процесса заполнения шва до начала промежуточного отпуска [61, с. 44].

2.4 Термический отдых сварных соединений ГЦТ Ду 850.

«Термический отдых» проводится в случае, если после проведения промежуточного отпуска выявлены дефекты, требующие подогрева для их устранения. После заварки (с подогревом) дефектов зону СС теплоизолировать. Нагреть зону СС (показания термопреобразователей ВК1, ВК2, ВК3, ВК4, ВК6) до температуры от 150 °С до 250 °С и сделать выдержку в течение 12 часов. Охлаждать под слоем теплоизоляции с записью на диаграммную ленту до комнатной температуры (от 28 °С до 35 °С) [61, с. 45].

2.5 Термическая обработка сварных соединений ГЦТ Ду 850.

Теплоизолировать зону СС.

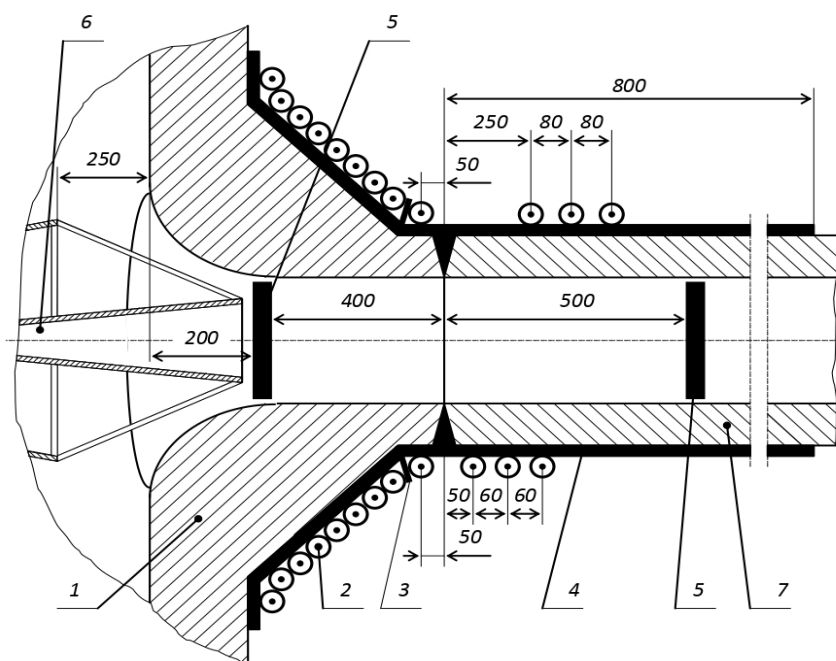
Работы по подогреву под сварку и термообработке должны проводиться при температуре окружающего воздуха не ниже плюс 10°С.

Работы по подогреву под сварку и термообработке в случае укрупнения блоков ГЦТ в цехе предмонтажных работ должны проводиться при температуре окружающего воздуха не ниже плюс 5°С.

Перед термической обработкой наружную поверхность сварного соединения следует зачистить для устранения наплывов и резких переходов от шва к основному металлу в соответствии с требованиями рабочей конструкторской документации.

Сварные соединения ГЦТ выполняют последовательно: корпус реактора, парогенератор (горячая нитка), ГЦНА, парогенератор (холодная нитка), ГЦТ. В зависимости от поставочных блоков ГЦТ очередность выполнения монтажных сварных соединений в каждом конкретном случае определяется отдельно и согласовывается с ГМО, заводом-изготовителем и генпроектировщиком.

Смонтировать индуктор в соответствии с рисунком 11.



1 – патрубок реактора; 2 – водоохлаждаемый индуктор; 3 – штыри;
4 – теплоизоляция; 5 – теплоизоляционные перегородки; 6 – осевой
вентилятор с диффузором; 7 – трубопровод Ду850

Рисунок 11 – Схема сварного соединения патрубка реактора с трубопроводом, подготовленного к термообработке

Включить индуктор. Подобрать нужную емкость по показаниям фазометра (стрелка должна показывать величину, близкую к единице,

желательно в сторону емкостной нагрузки), добиваться оптимального энергетического режима и согласованной работы преобразователя с нагрузкой [61, с. 46].

Включить вентилятор в зоне патрубка корпуса реактора. Режим термической обработки провести в соответствии с графиком (Рисунок 3.5).

Осуществлять контроль за работой термопреобразователей. В случае обнаружения неисправностей термопреобразователей заменить их на дублирующие [61, с. 47].

Ориентировочная величина потребляемой мощности на этапе нагрева до 500 находится в пределах от 80 кВт до 120 кВт; на этапе нагрева до температуры выдержки находится в пределах от 120 кВт до 150 кВт.

В процессе выдержки при заданной температуре отпуска мощность снижается примерно на 20 – 25 % от максимального значения.

По окончании выдержки отключить вентилятор и охлаждать стык со скоростью не более 50 °С/ч до температуры 300 °С. Ниже 300 °С скорость охлаждения не регламентируется. Охлаждение СС естественное под слоем теплоизоляции с записью процесса охлаждения на диаграммную ленту до температуры 100 °С.

Произвести демонтаж теплоизоляции, нагревательной оснастки, термопреобразователей.

2.6 Требования к параметрам технологического процесса термической обработки сварных соединений трубопровода Ду 850 с патрубками корпуса реактора. Контроль температуры.

Контроль и запись температуры выполняют с помощью двенадцатиточечного самопишущего прибора. Класс точности прибора должен быть не хуже 0,5. На указанном приборе рекомендуется применять скорость движения диаграммной ленты 20 мм/ч или 60 мм/ч с интервалом записи температуры 12 с [61, с. 47].

Рекомендуется использовать приборы с диапазоном измерения температуры от 0 °С до 800 °С и термопреобразователи ТХА, имеющие номинальную статическую характеристику ХА (К) [61, с. 47].

Приборы для контроля и регистрации температуры и термопреобразователи должны быть утвержденного типа, поверены в порядке, установленном в ПР 50.2.006, и иметь действующие свидетельства о поверке (и/или знаки поверки) [61, с. 47].

Термопреобразователи типа ТХА выполняют из хромелевой и алюмелевой проволоки диаметром от 0,5 мм до 1,5 мм, длиной от 2 метров до 3 метров. Они армируются фарфоровой соломкой или бусами и заканчиваются термоспаем. Термоспай получается путем обварки концов термоэлектродов аргонодуговой сваркой без присадочной проволоки. Поверхность горячего спая при необходимости должна быть зачищена от окисной пленки. К показывающим приборам термопреобразователи подключают многожильным компенсационным проводом с жилами медь-константан длиной не более 20 м [61, с. 48].

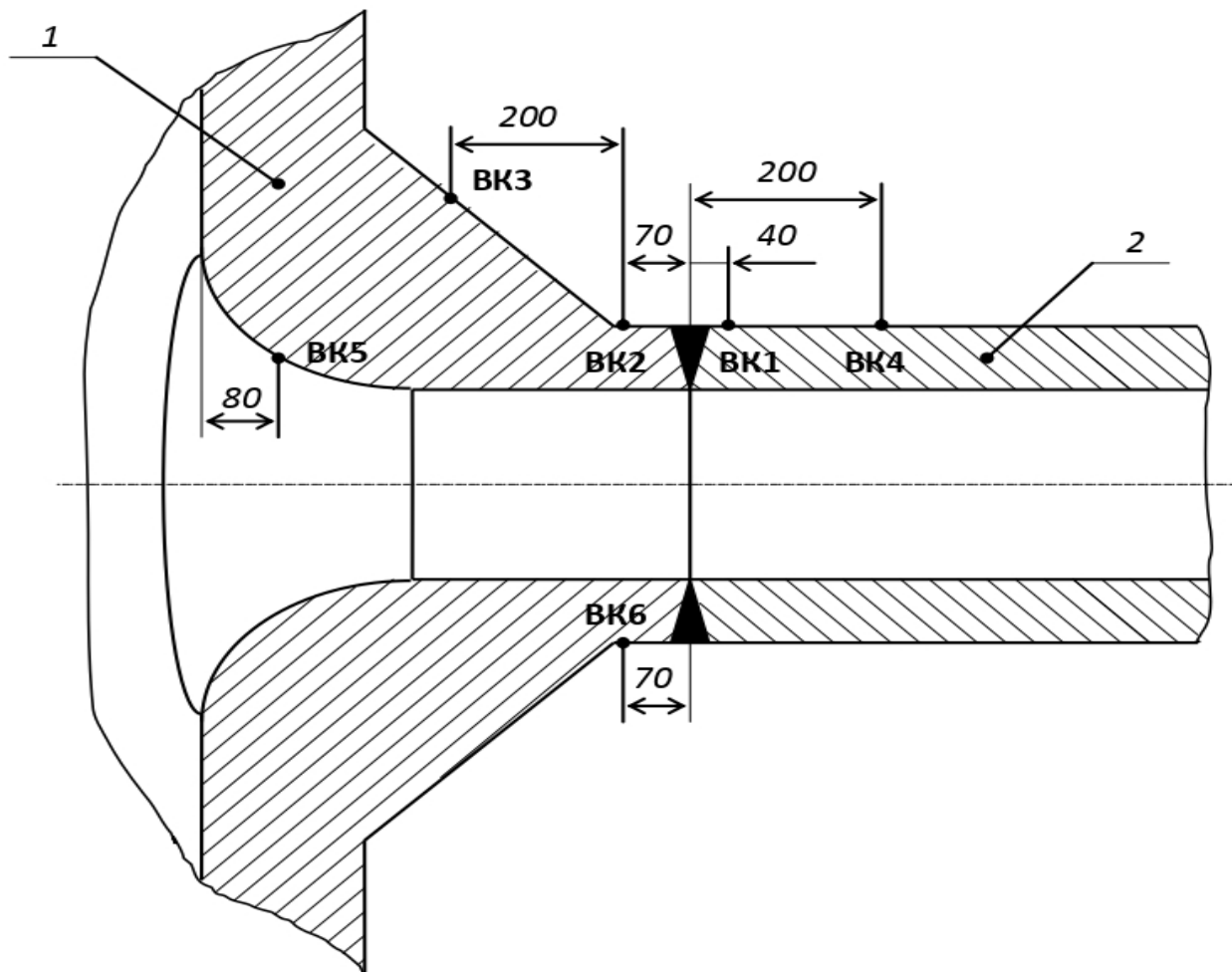
В процессе работы следует обеспечить нахождение холодного спая термопреобразователя при комнатной температуре (от 28 °С до 35 °С).

Не допускать сворачивания бухтой (кольцами) компенсационных проводов.

Следить за обеспечением надежного контакта в соединениях цепи термопреобразователь – самопишущий прибор.

Запрещается выключение самопишущего прибора с начала термической операции вплоть до ее окончания.

Термопреобразователи располагают на поверхности изделия. В каждой точке устанавливают два термопреобразователя (основной и дублирующий), расстояние между которыми по окружности составляет от 20 мм до 30 мм. На диаграммную ленту прибора записывают показания основных термопреобразователей. Дублирующие должны включаться в работу в случае обнаружения неисправности основных термопреобразователей [61, с. 48].



1 - патрубок реактора; 2 - трубопровод Ду 850; VK1÷VK6 – термопреобразователи.

Рисунок 12 – Схема расположения термопреобразователей на сварном соединении патрубка реактора с трубопроводом Ду 850

Крепление термопреобразователей на поверхности металла осуществляется одним из общепринятых способов (приварка, зачеканка с помощью приваренных бобышек из аустенитной стали марки 08X18H10T или аналогичной, и др.). Приварку производят электродуговой сваркой без предварительного подогрева с использованием электродов марок [61, с. 48]:

- ЦТ-10 или ЭА-395/9 – при приварке к наружной поверхности трубы (перлитная сталь);

– ЦТ-15К или ЭА-898/21Б – при приварке к плакирующему слою (внутренняя поверхность трубы).

Установку термопреобразователей на сварном соединении патрубка корпуса реактора с трубопроводом Ду 850 проводить согласно схеме, показанной на рисунке 12 [61, с. 48].

После завершения термической обработки места крепления термопреобразователей следует зачистить заподлицо с основным металлом до шероховатости 0,63 по ГОСТ 2789 и провести капиллярный контроль [37] на отсутствие трещин и других дефектов. После зачистки мест крепления термообразователей допускаются участки с не полностью удаленным аустенитным металлом шва на поверхностях трубопровода и патрубках корпуса реактора [61, с. 48].

Для измерения и записи температуры могут быть использованы аналогичные приборы для контроля и регистрации температуры и термопреобразователи, с метрологическими характеристиками не хуже и обеспечивающих необходимые пределы и точность измерений [61, с. 49].

2.7 Режимы нагрева под сварку, «термический отдых» и высокий отпуск сварных соединений ГЦТ Ду 850.

Для сварных соединений плакированного трубопровода Ду 850 ГЦТ с патрубками корпуса реактора при монтаже выполняются: предварительный подогрев под сварку, промежуточный и окончательный отпуска и «термический отдых» (в случае необходимости) [61, с. 49].

Нагрев под сварку.

Сварку осуществляют с предварительным подогревом до температуры 250 °С и сопутствующим подогревом в интервале температур от 150 °С до 250 °С [61, с. 50].

Скорость нагрева не должна превышать 150 °С/ч.

Сварка ведется при выключенных нагревательных устройствах.

Не допускается остывания зоны сварного соединения трубопровода Ду 850 с патрубком реактора ниже 150 °С.

Термический отдых.

Для сварных соединений трубопровода с патрубком реактора «термический отдых» применяется только при ремонтных операциях после заварки дефектов с подогревом в стыке до проведения окончательного отпуска. «Термический отдых» выполняется при температуре от 150 °С до 250 °С, скорость нагрева не должна превышать 150 °С/ч, продолжительность 12 ч. Охлаждение после «термического отдыха» – под слоем теплоизоляции с записью процесса на диаграммную ленту до комнатной температуры.

Промежуточный отпуск.

Применяется на сварном соединении трубопровода с патрубком реактора после окончательной заварки стыка, не допуская его охлаждения ниже 150 °С. Температура (640±20) °С, продолжительность 3 часа. Скорость нагрева и охлаждения в соответствии со схемой режима отпуска (рисунок 13). Перерыв между промежуточным и окончательным отпусками не ограничен.

Схемы режимов окончательного и промежуточного высоких отпусков сварных стыков Ду 850 ГЦТ с патрубком корпуса реактора приводятся на рисунке 13 [61, с. 50].

Для сварного стыка режим промежуточного и окончательного отпусков выполняется по показаниям термопреобразователей ВК1, ВК2, ВК4 и ВК6.

Для достижения заданной температуры отпуска скорость нагрева изделий до 500 °С не должна превышать 100 °С/ч, далее от 500 °С до 640 °С – не более 50 °С/ч [61, с. 50].

Температура отпуска (640±20) °С, продолжительность окончательного отпуска 7 ч [61, с. 50].

Время выдержки при отпуске следует исчислять по показанию последнего термопреобразователя, установленного в зоне контролируемого нагрева, достигшему минимально допустимой заданной температуры [61, с. 50].

Охлаждение от 640 °С до 300 °С выполняется со скоростью не более 50 °С/ч, далее – не регламентируемое, под слоем теплоизоляции.

Демонтаж теплоизоляции производится при температуре стыка не более 100 °С.

Запись температуры при охлаждении осуществляется до 100 °С.

Ширина зоны нагрева в интервале температур (640±20) °С от оси шва составляет: в сторону патрубка реактора не менее 70 мм (контроль по термопреобразователям ВК2, ВК6, рисунок 12); в сторону трубопровода не менее 200 мм (контроль по соответственно установленным термопреобразователям ВК1, ВК4, рисунок 12).

Температура стенки корпуса реактора на входе в патрубок (показания термопреобразователя ВК5, рисунок 13) не должна превышать 230 °С до окончания выдержки при включенном вентиляторе.

По окончании выдержки выключить вентилятор. В процессе охлаждения температура термопреобразователя ВК5 повышается и достигает значений температуры на термопреобразователях ВК1, ВК2, ВК3, ВК4, ВК6 (в интервале температур от 450 °С до 250 °С), что допускается.

Температура наружной поверхности патрубка корпуса реактора во время выдержки (по показаниям термопреобразователя ВК3) ориентировочно находится в интервале от 350 °С до 500 °С.

В каждой точке устанавливается два термопреобразователя – основной и дублирующий, расстояние между которыми по окружности составляет от 20 мм до 30 мм. В процессе выхода на заданную температуру окончательного отпуска нагрев до температуры 500 °С считать контрольным.

Если разброс показаний основных термопреобразователей превышает 35 °С, следует сделать выдержку в течение часа, добиться уменьшения разброса температуры не более 35 °С и продолжить нагрев со скоростью не выше 50 °С/час. Если разброс показаний температуры основных термопреобразователей не удастся уменьшить, следует охладить стык, выявить и устранить причину отклонения, затем возобновить нагрев.

В случае нарушения контроля температуры при отпуске или возникновения другой неисправности, в результате которой произойдет вынужденная остановка и в процессе ликвидации неисправности температура металла понизится, разрешается продолжить термообработку от фактической температуры на стыке в соответствии с режимом, при этом должно учитываться (суммироваться) время выдержки прерванного отпуска.

В процессе вынужденной (аварийной) остановки охлаждение сварного соединения следует выполнять под слоем теплоизоляции, вплоть до комнатной температуры. Не более, чем на двух термопреобразователях, установленных в зоне отпуска (ВК1, ВК2, ВК4 и ВК6) при термообработке допускается в процессе выдержки снижение нижнего предела температуры отпуска до значения 600 °С. Суммарная продолжительность отклонений не должна превышать 2-х часов. Окончательный отпуск на СС ГЦТ с корпусом реактора является заключительным.

Для нагрева под сварку, проведения «термического отдыха» и высокого отпуска сварных соединений Ду 850 с патрубками корпуса реактора используются индукционные нагревательные установки повышенной частоты производства Российской Федерации.

Для проведения нагрева под сварку и термическую обработку сварных соединений ГЦК необходимо иметь две установки: одну – основную, вторую – резервную. Резервная установка используется для немедленного подключения в случае отказа основной.

Индукционная нагревательная установка повышенной частоты состоит из источника питания (инвертора), блока конденсаторов, устройства регулирования и контроля температуры и гибкого водоохлаждаемого кабеля в термостойкой изоляции в качестве индуктора.

Технические данные:

- напряжение питания, В – 3х380;
- напряжение повышенной частоты, В – 800;
- выходная частота, Гц – 1000 – 2400;

- мощность, кВт – 250;
- диаметр гибкого водоохлаждаемого кабеля, мм – 30 – 40.

Преобразователь повышенной частоты рекомендуется располагать на расстоянии не более 60 м от нагреваемого объекта, а конденсаторную батарею и шкаф управления – на расстоянии не более 15 м от него.

При условии обеспечения режимов термической обработки, допускается применение других типов оборудования, нагревательных устройств и схем их размещения. При этом по согласованной с разработчиком программе, до проведения окончательного отпуска проводятся пробные нагревы макетов или сварных узлов штатного изделия, с перегревом до температуры не более 500 °С.

Перед проведением термообработки выходные параметры преобразователя необходимо настроить на режим работы с нагрузкой (индуктором) по показаниям фазометра, вольтметра, амперметра. Фазометр должен показывать величину $\cos \varphi$, близкую к единице (0,9...1), а ток и напряжение должны составлять его номинальные значения.

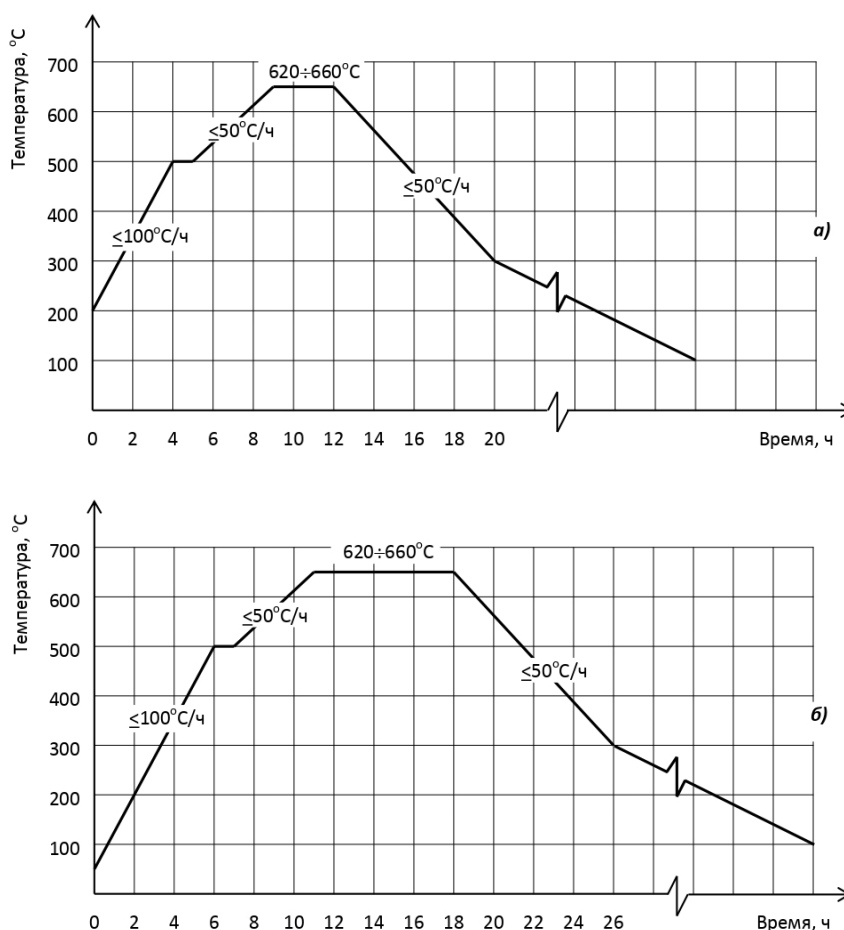
Нагреть сварное соединение до температуры 250 °С (показания термопреобразователей ВК1, ВК2, ВК3, ВК4, ВК6) и отключить напряжение, подаваемое на индуктор. Начать сварку. При охлаждении металла до 150 °С остановить сварку и повторить нагрев.

В процессе нагрева необходимо осуществлять контроль за работой термопреобразователей и самопишущего прибора – правильной записью температур на диаграммной ленте. В случае обнаружения неисправных термопреобразователей, заменить их на дублирующие.

Контроль и запись температуры выполняют с помощью двенадцатиточечного самопишущего прибора. Класс точности прибора должен быть не хуже 0,5. На указанном приборе рекомендуется применять скорость движения диаграммной ленты 20 мм/ч или 60 мм/ч с интервалом записи температуры 12 с.

Поддерживать температуру в указанном интервале температур в течение процесса заполнения шва до начала промежуточного отпуска (рисунок 13).

После завершения термической обработки места крепления термопреобразователей следует зачистить заподлицо с основным металлом до шероховатости 0,63 по ГОСТ 2789 [10] и провести капиллярный контроль на отсутствие трещин и других дефектов. После зачистки мест крепления термообразователей допускаются участки с не полностью удаленным аустенитным металлом шва на поверхностях трубопровода и патрубках корпуса реактора.



а) – промежуточный отпуск; б) – окончательный отпуск

Рисунок 13 – Схема режимов отпуска сварных соединений трубопровода Ду 850 ГЦТ с патрубком корпуса реактора

3 Выбор оптимального способа сварки сварных соединений элементов главного циркуляционного трубопровода ГЦТ Ду 850.

3.1 Разработка технологии сварки сварных соединений элементов главного циркуляционного трубопровода ГЦТ Ду 850.

В настоящее время основным способом сварки сварных соединений элементов ГЦТ Ду 850 с патрубками ПГ является ручная дуговая сварка (РД) покрытыми электродами и ручная аргонодуговая сварка (РАД) вольфрамовым электродом с присадкой [17, 58]. Корневые швы выполняются РАД с присадочной сварочной проволокой Св-08Г2С диаметром 2...3 мм, а заполнение разделки – электродами ПТ-30 диаметром 4,0 мм. Сборку и сварку осуществляют с предварительным и сопутствующим подогревом до температуры 120...150 °С. Для наплавки промежуточного плакирующего слоя применяют электроды ЗИО – 8, второго слоя – электроды ЭА – 898 / 21Б; допускается так же выполнение обоих слоев на всю толщину электродами марки ЦЛ – 25 / 1 [66, с. 41].

Однако применение РДС и РАДС при соединении элементов ГЦТ Ду 850 с коллекторами ПГ, относящихся к I категории сварных соединений оборудования и трубопроводов группы А [41, 42, 43], связано не только со значительными трудозатратами и длительным циклом сварочных работ, но и с необходимостью обеспечения требуемого качества сварных соединений [58]. В связи с этим целесообразно для выполнения указанных сварных соединений применять механизированную сварку [66, с. 41].

Традиционный способ ручной аргонодуговой сварки РАДС по сравнению с другими способами является процессом с низкой производительностью. Однако этот способ сварки имеет свои преимущества, например высокое качество сварного шва, отсутствие шлака и окисления на поверхности сварного 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 аргодуговую сварку (ААрДС) [45, 46].

Для достижения трещиностойких сварных соединений ААрДС является наиболее надежным способом сварки. Благодаря ААрДС получают корень шва с оптимальной геометрией [47], при этом не требуется послесварочная машинная обработка, шлифовка, зачистка и пр [66, с. 42].

Анализ существующих способов механизированной сварки показал, что для сварки элементов ГЦТ Ду 850 наиболее эффективной является ААрДС. Технология ААрДС способствует снижению трудоемкости сварочных работ и сокращению сроков их выполнения, обеспечивает высокое и стабильное качество сварных соединений и снижение дозы радиационного воздействия на персонал при выполнении сварочных работ. Опыт применения ААрДС для изготовления трубопроводов Ду 850 из стали 08X18H10T при сооружении АЭС с реакторами ВВЭР-440 подтверждает высокое качество сварных соединений и эффективность указанной технологии сварки [2, 66, с. 42].

Начиная с 2010 года, в связи с ростом количества сооружаемых атомных энергоблоков, в ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» вновь начал активно проводить работы по автоматизации сварки сварных соединений Ду 850.

При разработке методики проведения опытно-технологических работ исходят из следующих основных положений:

- все работы по отработке технологии сварки выполняются в полном соответствии с правилами и нормами, применяемыми в атомной энергетике [41, 42, 43];

- технология сварки ААрДС разрабатывается применительно к проектной разделке кромок (рисунок 14) в соответствии с требованиями ПНАЭ Г-7-009-89 [42], поскольку в настоящее время отсутствует специализированное портативное оборудование для механической обработки

на монтаже патрубков коллекторов ПГ под узкую разделку кромок (ПГ поставляется заводом-изготовителем со стандартной разделкой кромок на патрубках);

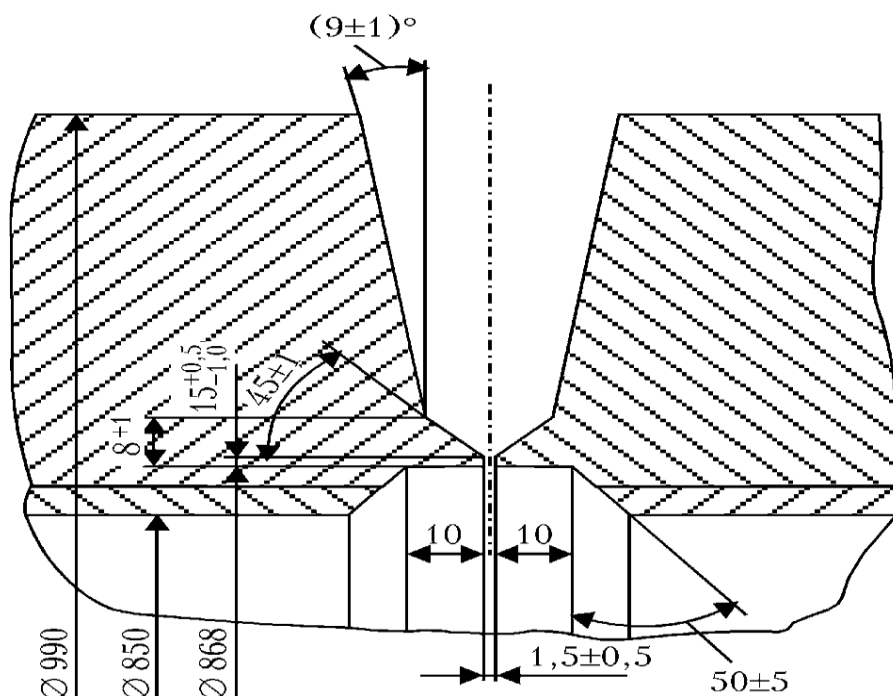


Рисунок 14 – Схема стандартной разделки кромок сварных соединений, полученных способом ААрДС неплавящимся электродом с применением сварочной проволоки

- ААрДС должна применяться для выполнения горизонтальных швов на вертикальной плоскости;
- выбираются необходимые сварочные материалы;
- уточняется температура предварительного и сопутствующего подогрева;
- определяется оптимальный тепловой режим сварки;
- уточняется режим послесварочной термообработки;
- проводится отработка выбранной технологии сварки и изучаются физико-механические показатели контрольных сварных соединений;
- обобщаются результаты и готовятся технологические рекомендации.

Не менее важной проблемой, затрудняющей применение автоматической аргодуговой сварки деталей больших толщин является её низкая производительность, уступающая по коэффициенту наплавки даже ручной электродуговой сварке.

Эта проблема может быть в принципе может быть решена следующими технологическими мероприятиями:

- Переход на сварку в узкие и щелевые разделки [4, 65, 66].
- Использование технологии «горячая проволока» (Hot wire) [49].
- Одновременное использование двух и более сварочных головок.
- Повышение параметров сварки и прежде всего сварочного тока.

Наиболее радикальным способом повысить производительность является переход на сварку в узкие разделки поэтому разрабатываемая технология сварки базировалась на однозначно принятую в развитых промышленных странах технологию аргодуговой сварки в узкие разделки, которые также иногда называются щелевыми (рисунок 3.7).

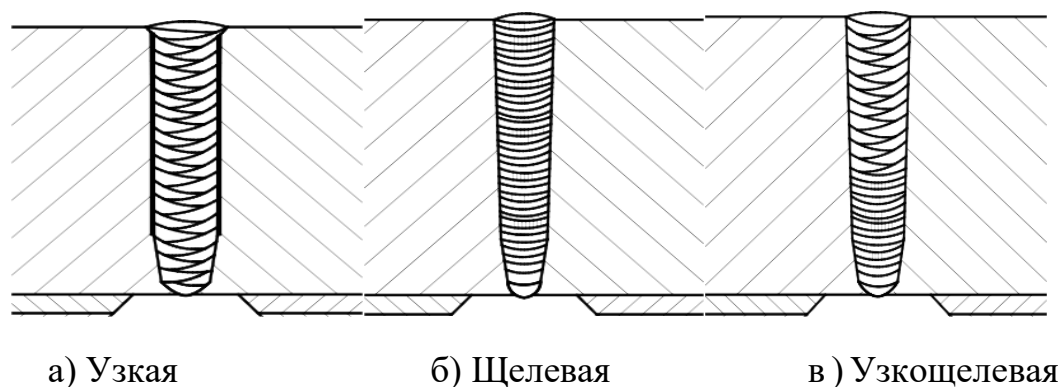


Рисунок 15 – Схемы узких (щелевых) разделок и способов их заполнения с использованием автоматической аргодуговой сварки

В этом докладе предлагается упорядочить терминологию: к «узким» разделкам относить разделки, заполнение которых производится с раскладкой валиков «влево-вправо» рисунок 15 (а), а «щелевыми» разделками называть разделки, заполнение которых идёт одним валиком от одной кромки

до другой, которую за рубежом также называют технологией Bridge – мост рисунок 15 (б).

Поскольку процесс усадки и снижения раскрытия разделки изучен недостаточно было определено, что наиболее рациональным на этой стадии разработок, является применение комбинированной разделки, которую мы называем «узкощелевой», при этом нижняя часть разделки заполняется по технологии «мост», а верхняя часть по технологии «влево-вправо» рисунок 15 (в).

Для разработки технологии сварки ААрДС использовали стыковые соединения пластин размером 350×80 мм толщиной 40 мм из стали 10ГН2МФА со стандартной разделкой кромок (рисунок 15). В качестве присадки применяли сварочную проволоку Св-08Г1НМА диаметром 0,9 мм. ААрДС стыковых сварных соединений осуществляли в нижнем положении.

Как показали выполненные исследования, сварка с горячей проволокой имеет существенно более высокую производительность (таблица 4 и рисунок 16). В дальнейшем все исследования технологии сварки велись с подогретой сварочной проволокой.

Таблица 4 – Сравнение показателя производительности сварки с «горячей» и «холодной» присадочными проволоками.

Диаметр трубы (Ду) мм	850	
Толщина, мм	70	
Материал трубы	10ГН2МФА + антикоррозионная наплавка	
Ось трубы	вертикальная	
Сварочные установки	Сварочные установки POLYCAR-MP (Полисуд)	H52NGT (Арксмаинс) Холодная проволока (Cold wire)
Количество проходов	41	76
Суммарное время сварки, мин /час	1582/26,3	2280/38
Параметры сварки: Ток, А	230-370/110-190 (имп./пауза)	280-295/235 (шаг/пауза)
Скорость сварки, мм/мин	60-75	25-34
Скорость подачи проволоки, мм/мин (проволока Ø 0,8 мм)	2800-3900/1450-1800 (имп./пауза)	600

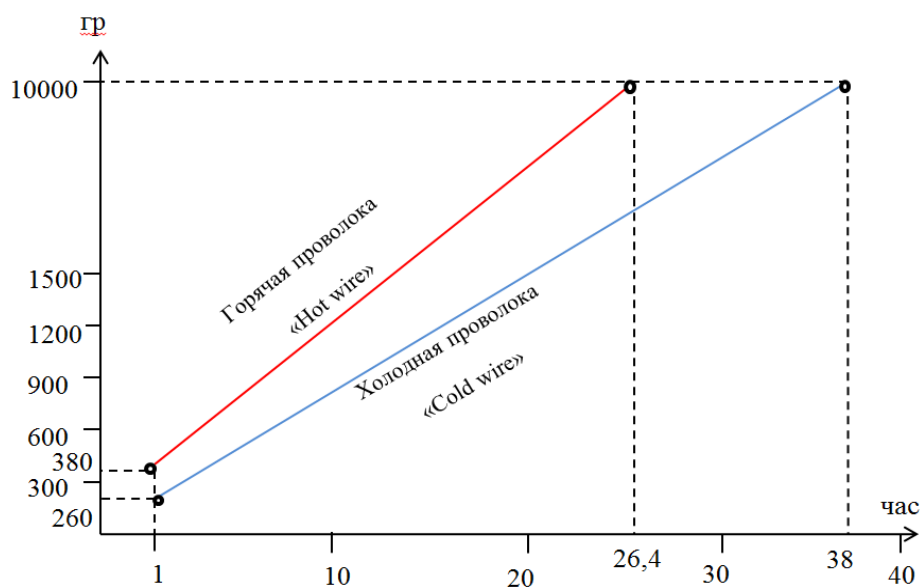


Рисунок 16 – Коэффициент наплавки (г/ч) при сварке с «горячей» и «холодной» проволоками

3.2 Выбор сварочного оборудования при разработке технологии сварки сварных соединений элементов главного циркуляционного трубопровода ГЦТ Ду 850

Для повышения производительности процесса и качества металла шва ведущие зарубежные производители сварочного оборудования «Полисуд» (Франция) и «Либуриди» (Канада) уже достаточно давно изготавливают сварочные автоматы с дополнительными устройствами, позволяющими вести сварку с подогревом присадочной проволоки (технология «Hot wire»). Располагая сварочным автоматом POLYCAR-MP (Полисуд) мы имели возможность выполнить сравнение технологий с холодной и горячей проволокой.

Увеличение числа сварочных головок (до 2-х и более) при сварке не только позволяет существенно повысить производительность процесса, но и обеспечить равномерную усадку и деформацию по всему периметру свариваемых трубных блоков, что исключительно важно при выполнении корневых проходов.

Благодаря этим преимуществам технология автоматической аргодуговой сварки с использованием нескольких сварочных головок уже давно применяется при сварке деталей роторов паровых турбин, которые находятся в поворотном положении на специальном столе-вращателе (рисунок 17).

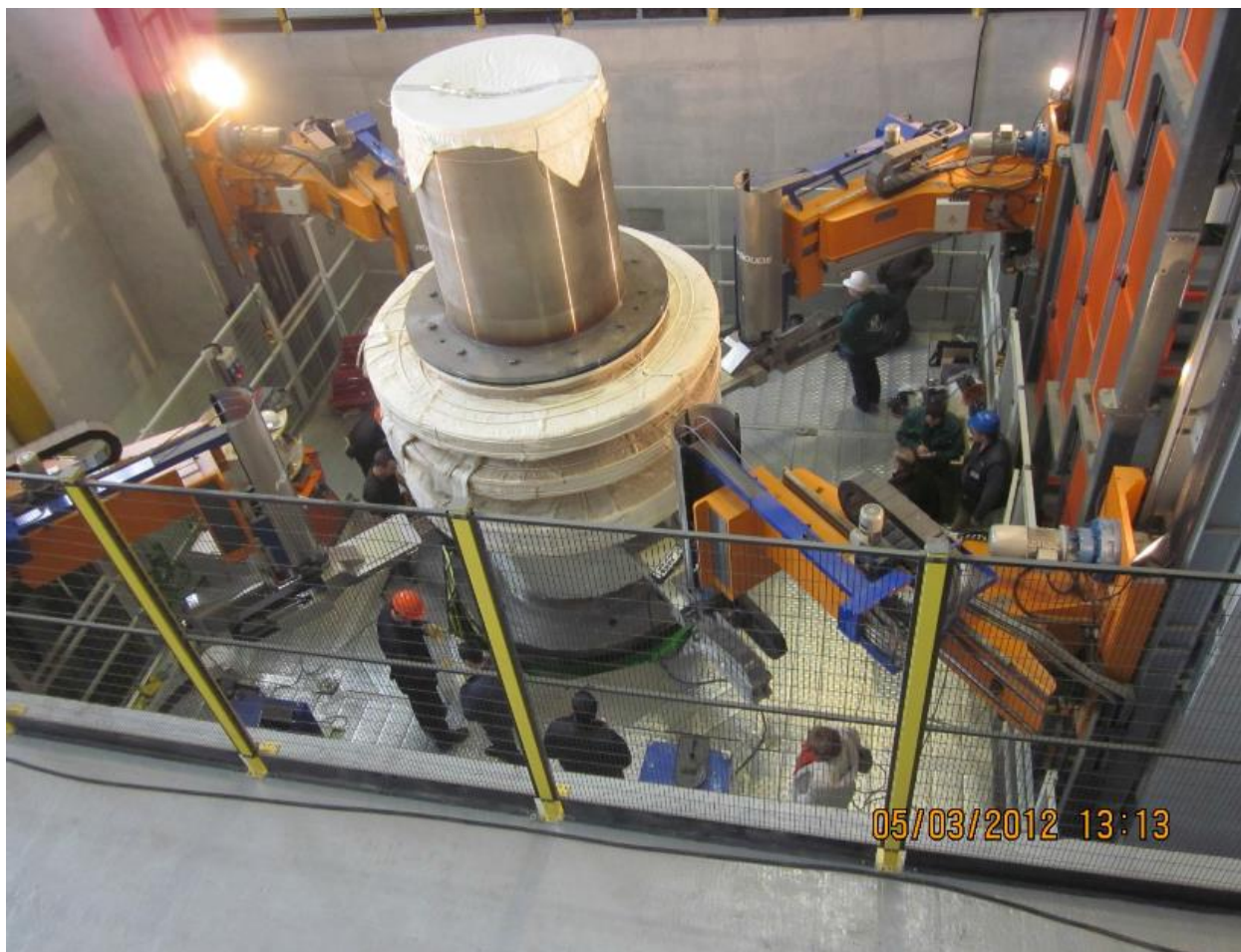


Рисунок 17 – Сварка ротора тихоходной турбины четырьмя сварочными головками в узкую разделку в поворотном положении

Применение сварки с несколькими сварочными головками для орбитальной сварки в неповоротном положении также начинает находить применение, прежде всего при схемах «вверх-влево-вправо», однако размещение двух головок в разных зонах сварки создаёт большие затруднения из-за намотки питающих кабелей, что безусловно должно учитываться при организации процесса.

Все перечисленные мероприятия в конечном итоге приводят к необходимости вести сварку на повышенных параметрах сварочного тока (до 400 А), что необходимо учитывать при выборе источника питания. Кроме того при сварке на повышенных параметрах режима становится исключительно важной стойкость вольфрамового электрода, который должен с помощью специальных устройств эффективно охлаждаться. Особенно это касается сварки высокопрочных легированных сталей в узкие и щелевые разделки, ведущейся с подогревом при высоких температурах.

В ОАО НПО «ЦНИИТМАШ», применительно к отечественным биметаллическим трубопроводам Ду850 ГЦТ, при содействии зарубежных фирм «Полисуд» и «Аркмашинз», разработчиков специализированного сварочного оборудования, разработана технология автоматической аргонодуговой сварки в узкую и щелевую разделки (рисунок 19). При разработке технологии в качестве присадочной проволоки для сварки перлитной части шва применяется новая, разработанная в ОАО НПО «ЦНИИТМАШ», сварочная проволока Св-10Г1СН1МА диаметром 0,8 мм. В качестве защитного газа, в том числе и для защиты корневого прохода («поддув»), использовался аргон.

С использованием разработанной технологии было сварено три натуральных макета, которые были изготовлены из штатных биметаллических труб Ду 850, а сварка велась в разделки представленные на рисунке 18. В качестве сварочного оборудования для сварки макетов 1 и 3 применялся автомат POLYCAR-MP («Полисуд»), оснащённый устройством для подогрева сварочной проволоки, а макета 2 – сварочный автомат H52NGT «Аркмашинз», у которого устройство для подогрева отсутствовало. Для сварки макетов 1 и 2 использовалась технология односторонней сварки, то есть сначала выполнялась сварка плакирующего слоя [47] с использованием в качестве присадки сварочной проволоки Св-04Х19Н11М3, затем выполнялся переходный слой с присадкой Св-08Г2С и, наконец, заполнение разделки выполнялось с использованием сварочной проволоки Св-10Г1СН1МА. Макет

З выполнялся по «классической» технологии: сначала сваривалась перлитная часть с использованием автоматической сварки, а затем изнутри выполнялась антикоррозионная наплавка на корневой участок перлитного шва электродом ЗИО-8 (первый слой) и ЭА-898/21Б (второй слой). Параметры режима сварки макета №1 представлены в таблице 5.

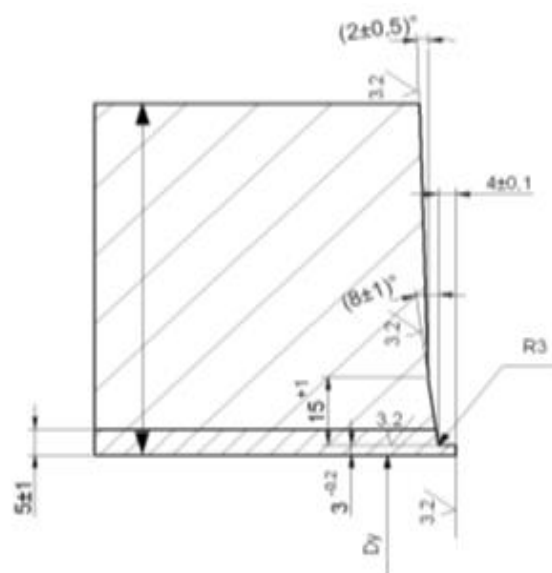


Рисунок 18 (а) – Односторонняя сварка с применением автомата фирмы «Полисуд»

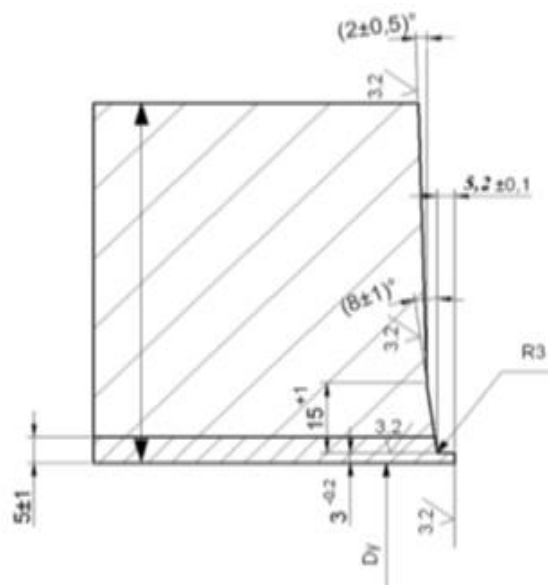


Рисунок 18 (б) – Односторонняя сварка с применением автомата фирмы «Аркс машинс»

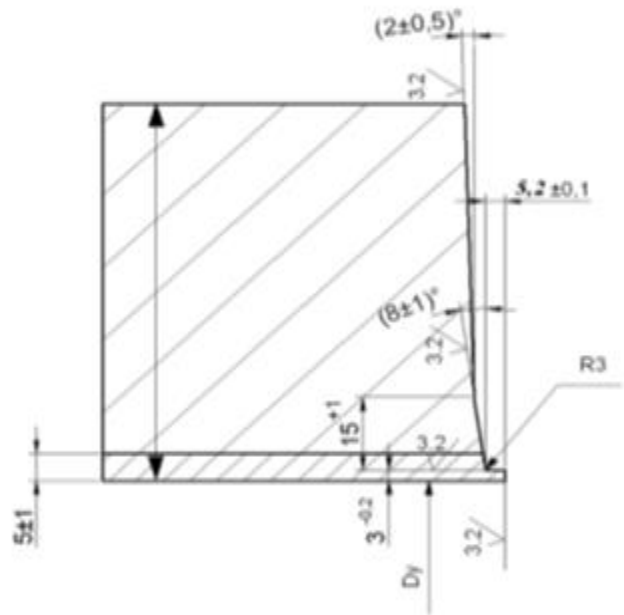


Рисунок 18 (в) – Двухсторонняя «классическая» сварка с применением автомата фирмы «Полисуд»

Рисунок 18 – Подготовка кромок и сварка натуральных макетов в узкощелевую разделку биметаллического трубопровода Ду 850.

Рисунок 18 (а) – Односторонняя сварка с применением автомата фирмы «Полисуд».

Рисунок 18 (б) – Односторонняя сварка с применением автомата фирмы «Аркс машинс».

Рисунок 18 (в) – Двухсторонняя «классическая» сварка с применением автомата фирмы «Полисуд».

После сварки макета №3 была произведена термическая обработка по режиму 650 °С – 8 часов. После выполнения сварки и термообработки сварные соединения подвергались контролю ВИК [35], КК [37], РГК [36] и УЗК [38]. Результаты контроля показали, что в сварных соединениях всех трёх макетов дефекты отсутствуют.

3.3 Выбор сварочных материалов при разработке технологии сварки сварных соединений элементов главного циркуляционного трубопровода ГЦТ Ду 850.

В соответствии с требованиями [42] 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 сварочную 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. % [58].

Поскольку указанная сварочная проволока в основном предназначена для сварки под флюсом, указанное содержание кремния в ней встречается крайне редко. Кроме того, такая проволока производится только в РФ.

При этом с самого начала учитывался такой важный недостаток автоматической аргонодуговой сварки перлитной стали марки 10ГН2МФА, как повышенная склонность к образованию в металле шва пористости, причина образования которой до сих пор не достаточно изучена.

Вероятнее всего образование пористости в данном случае происходит по реакции «кипения», которая может протекать, принимая упрощённую схему, по реакции: $2C + O_2 = 2CO\uparrow$ из-за недостаточного количества элементов-раскислителей Si и Mn в проволоке Св-10ГН1МА [25]. С учетом ранее полученных положительных результатов [4], в ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» была изготовлена новая партия сварочной проволоки Св-10Г1СН1МА (Св-08Г1СН1МА), адаптированная к современным требованиям (в частности для сварки в узкие разделки). Благодаря более высокому содержанию Si и Mn в этой проволоке недопустимое образование пористости было надёжно предотвращено (рисунок 19).



Рисунок 19 – Микроструктура сварных соединений макетов №1 и №2.

В связи с вышеизложенным для обеспечения качества требуемых свойств сварных соединений элементов ГЦТ Ду 850 из плакированной стали 10ГН2МФА, полученных ААрДС, необходимо применять стандартную сварочную проволоку с аналогичной системой легирования и содержания 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 применять отечественную сварочную проволоку Св-08Г1НМА фирмы «Кродекс» (Украина), которая отличается от базовой марки Св-10ГНМА [42] 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 применения сварочной проволоки Св-08Г1НМА для разработки технологии сварки ААрДС элементов трубопроводов из стали 10Г2Н2МФА.

С этой целью выполнен комплекс работ по выбору:

- газовой защиты при сварке неплавящимся электродом с применением сварочной проволоки Св-08Г1НМА;
- механических свойств металла шва сварных соединений из стали 10ГН2МФА;
- оценке качества и структуры металла шва и ЗТВ стали 10ГН2МФА с учетом требуемой послесварочной термической обработки.

При сварке неплавящимся электродом в инертных газах наиболее широко применяют аргон [14], гелий и их смеси. С целью поиска оптимальной газовой защиты для ААрДС стали 10ГН2МФА с применением сварочной проволоки Св-08Г1НМА были проведены эксперименты с применением нескольких вариантов сварочных смесей:

- чистый аргон, 70 % Ar + 30 % He;
- 50 % Ar + 50 % He;
- 30 % Ar + 70 % He.

При всех указанных вариантах газовой защиты обеспечивается стабильность горения дуги и высокое качество сварных соединений. Однако при сварке в стандартную разделку в чистом аргоне защита дуги и сварочной ванны от воздуха более надежна, чем с применением 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 так же жидкотекучесть сварочной ванны, что требует повышенного (до 1880 л/ч) расхода газовой смеси и способствует выгоранию легирующих элементов.

Анализ различных вариантов газовой защиты показал, что наиболее приемлемым для сварки стандартной разделки является ААрДС в чистом аргоне. Этот выбор связан в первую очередь с надежностью защиты в чистом аргоне, повышенной жидкотекучестью при сварке в смеси гелия с аргонem. При сварке в узкощелевую разделку для гарантированного сплавления

наплавленного металла с кромками разделки целесообразнее применять смесь 30 % Ar + 70 % He и 50 % Ar + 50 % He.

Для исследования склонности сварных соединений к образованию холодных трещин и уточнения температуры предварительного подогрева использовали методы количественной и качественной оценки. Количественную оценку трещиностойкости сварных соединений стали 10ГН2МФА выполняли на образцах имитаторах по методике вставок (имплант), основанной на оценке прочностных и деформационных характеристик замедленного разрушения. Для качественной оценки сваривали жесткую технологическую пробу типа «Теккен». Полученные результаты исследований показали, что для обеспечения трещиностойкости сварных соединений, выполненных ААрДС с использованием присадочной проволоки Св-08Г1НМА, требуется предварительный и сопутствующий подогрев до температуры 150 °С. При этом резко возрастает способность металла шва и ЗТВ выдерживать высокий уровень нагружения. Кроме того, такой подогрев способствует снижению концентрации диффузионного водорода в наплавленном металле до 1,5 см³ / 100 г.

Режимы сварки корневого слоя шва выбираются исходя из результатов получения полного провара и обеспечения норм выпуклости корня шва [27]: сварочный ток $I_{св.} = 140$ А; напряжение на дуге $U_{д} = 9,5$ В; скорость сварки $v_{св.} = 4,5$ м/ч; скорость подачи сварочной проволоки $v_{пр.} = 400$ м/ч (подача в хвост сварочной ванны); расход аргона 800 л/ч.

Режим сварки при заполнении разделки выбирали по результатам формирования и обеспечения надежного сплавления шва со стенками разделки и между отдельными проходами: $I_{св.} = 250$ А; $U_{д} = 11,5$ В; скорость сварки $v_{св.} = 5,5$ м/ч; $v_{пр.} = 900$ м/ч (подача проволоки в «голову» сварочной ванны; неплавящийся электрод – вольфрам марки ЭВТ-15 диаметром 3 мм); расход аргона 850 л/ч.

В процессе сварки сварных соединений проводился послойный и визуальный измерительный контроль, объем которого составлял 100 %.

После сварки контрольные сварные соединения подвергались термической обработке по режиму окончательного высокого отпуска [42]: нагрев до 650 °С, выдержка этой температуры в течении 6 ч, охлаждение с печью до 200 °С, а затем – на воздухе.

Результаты ультразвукового контроля УЗК [38] 100 % и рентгенографического контроля РГК [36, 60] 100 % показали, что в сварных соединениях, подвергнутых термообработке, дефекты в сварных соединениях отсутствовали. Результаты химического анализа и механических испытаний приведены в таблицах 5 и 6. Полученные данные показали, что механические свойства наплавленного металла полностью соответствуют предъявляемым требованиям. При этом прочностные характеристики σ_T , σ_B и показатели пластичности δ_5 , ψ выше требуемых. Критическая температура хрупкости, определяемая по ударной вязкости (59 Дж/см²) и вязкости волокна в изломе разрушенных образцов (более 50 %), соответствует температуре -7 °С, что также согласуется с существующими нормами в таблице 7 [58].

Исследования макро- и микроструктуры сварных соединений показали, что в металле шва и ЗТВ отсутствуют поры, трещины, несплавления, шлаковые включения и другие дефекты. Для металла шва и ЗТВ после сварки и термообработки сварных соединений в основном характерна бейнитная структура, а так же не значительное содержание ферритно-перлитной составляющей. Это обеспечивает хорошие механические свойства сварных соединений и их сопротивляемость развитию трещин.

Таблица 5 – Химический состав (мас. %) основного и наплавленного металла

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
Сварочная 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 6 – Механические свойства металла шва сварных соединений стали 10ГН2МФА, выполненных ААрДС с применением сварочной проволоки Св-08Г1НМА

Объект исследования	Температура испытания	σ_t , МПа	σ_b , МПа	δ_5 , %	ψ_5 , %
Металл шва	+ 20	<u>447,6...495,7</u> 471,7	<u>628,4...648,1</u> 638,3	<u>19,7...26,0</u> 22,9	<u>75,1...76,5</u> 75,8
	+ 350	<u>437,6...454,1</u> 445,9	<u>587,0...591,6</u> 589,3	<u>25,8...29,3</u> 27,55	<u>73,0...73,2</u> 63,1
Сталь 10ГН2МФА	+ 20	594,1 595,2	694,7 689,2	16,0 17,7	45,9 53,0
Требования по ПНАЭ Г-7-009-89	+ 20	343	539	16,0	55,0
	+ 350	294	490	14,0	50,0

Таблица 7 – Показатели ударной вязкости металла шва сварных соединений стали 10ГН2МФА, выполненных ААрДС с применением сварочной проволоки Св-08Г1НМА

Объект исследования	KCV (Дж / см ²) при температуре, °С				Критическая температура хрупкости, °С
	+ 20	0	- 10	- 20	
Металл шва	<u>206,2...215,3</u> 210,9	<u>43,4...146,1</u> 90,4	<u>36,3...73,8</u> 59,1	<u>30,7...41,6</u> 36,2	- 7
Сталь 10ГН2МФА	-	-	-	-	-
Требования по ПНАЭ Г-7-009-89	-	-	-	-	- 10...+15

Таким образом, результаты предварительных испытаний сварочной проволоки Св-08Г1НМА свидетельствуют о высоком качестве и наличии требуемых механических свойств сварных соединений стали 10ГН2МФА, полученных ААрДС.

Для проведения аттестационных испытаний сварочной проволоки Св-08Г1НМА на Южно-Украинской АЭС был подготовлен кольцевой стык с наружным диаметром 990 мм с толщиной стенки 70 мм из плакированной стали 10ГН2МФА.

Форма разделки кромок соответствовала стандартной (рисунок 20). Для сварки применялась специализированная сварочная аппаратура «Autotig 600PC» французской фирмы «Polysoude» (рисунок 22).

Предварительный подогрев сварного соединения перед сваркой проводился до температуры 150 ... 200 °С со скоростью не более 150 °С / ч с применением установки «Стандарт Европа 82/6» (фирмы «Велдотерм»). При выполнении корневого слоя шва с применением способа сварки ААрДС применялись вольфрамовые электроды марки ЭВТ-15 диаметром 3 мм с углом заточки 30°; подача сварочной проволоки осуществлялась в «хвост» сварочной ванны, благодаря чему обеспечивался требуемый провар и обратное формирование наплавленного металла корневого слоя шва.

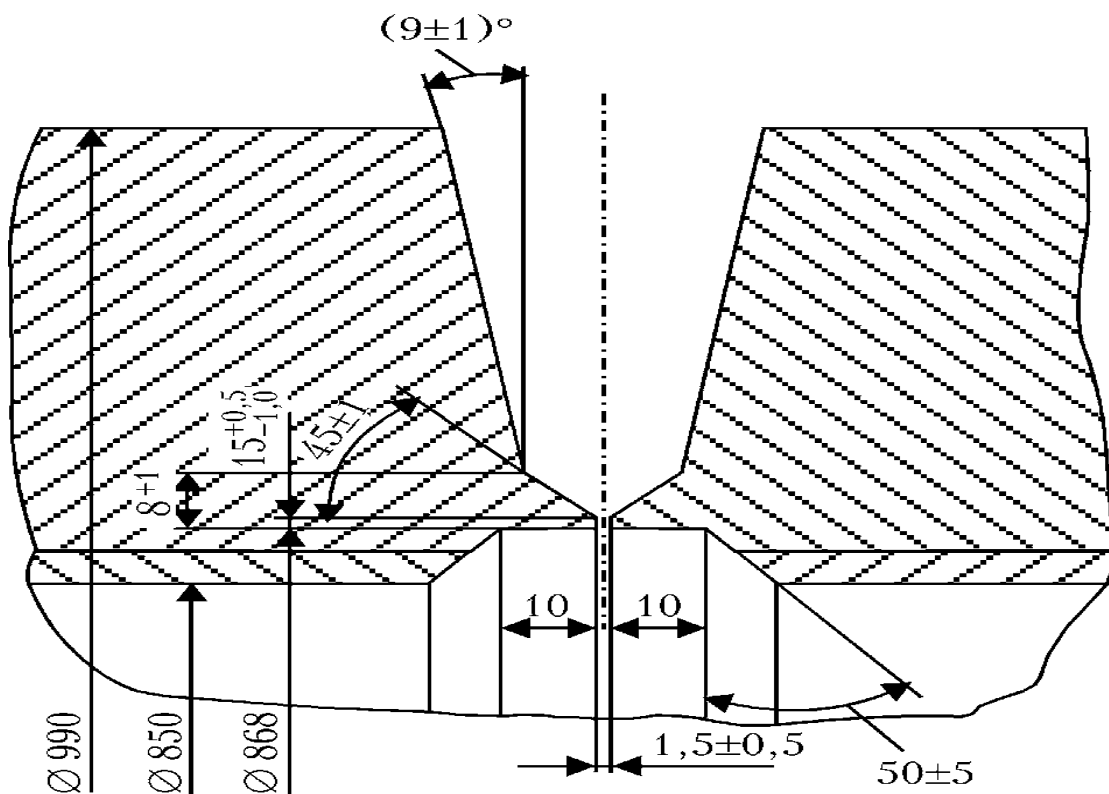
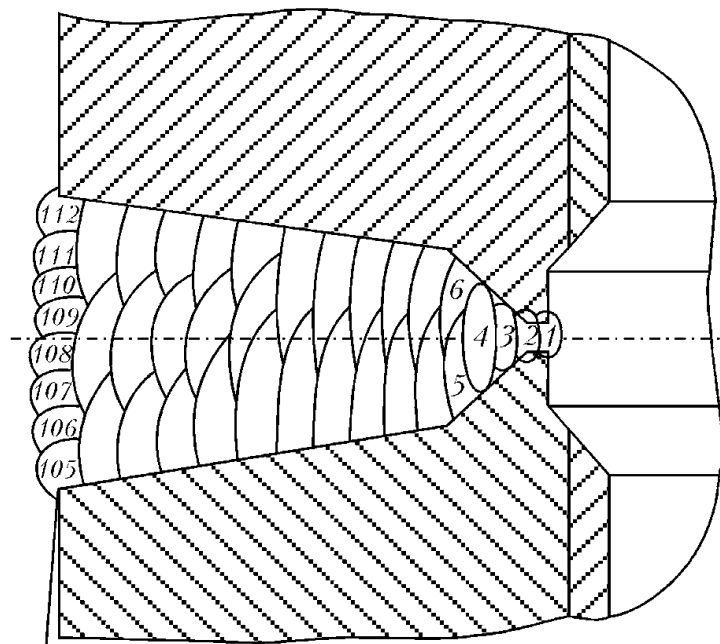


Рисунок 20 – Схема стандартной разделки кромок сварных соединений, полученных способом ААрДС неплавящимся электродом с применением сварочной проволоки



Линия зачистки усиления шва

Рисунок 21 – Схема раскладки валиков при разделке горизонтального стыка натурной модели сварного соединения ГЦТ Ду 850: 1 – валик корневого прохода; 2 – слой разглаживания; 3, 4 – корневой шов; 5 – 8 – промежуточный слой заполнения; 9 – 104 – слой основного заполнения; 105 – 112 – слой усиления шва



Рисунок 22 – Общий вид аппарата «Autotig 600PC» французской фирмы «Polysoude», предназначенного для сварки контрольного кольцевого стыка

Режимы сварки корневого слоя шва и последующих заполняющих слоев при заполнении разделки приведены в таблице 8. При заполнении разделки сварочная проволока подавалась в «голову» сварочной ванны.

Порядок раскладки валиков при сварке стыка показан на рисунке 21. Перекрытие начала и конца прохода составляло 20 ... 25 мм. В процессе заполнения разделки выполнялась зачистка поверхности металла шва металлической щеткой и осуществлялся внешний осмотр каждого прохода. По окончании сварки стыка был проведен термический «отдых» при температуре 150 °С в течение 8 ч., в соответствии с требованиями [42].

Таблица 8 – Режимы ААрДС при заполнении стандартной разделки кромок проволокой диаметром 0.9 мм

Порядок заполнения стандартной разделки по рис.3	Параметры сварки				
	I_{CB}, A	U_d, B	$U_{CB}, мм/мин$	$U_{ПР}, мм/мин$	Время, мкс
Первый корневой проход (1)	150/120	9,5	80	880/360 (в «хвост» ванны)	100/100
Слой разглаживания (2)	160/90	10	86	-	100/100
Третий корневой проход (3)*	220/130	11,5	91	880/360 (в «голову» ванны)	225/275
Четвертый корневой проход (4)	250/150	11,5	89	2600/1300	225/275
Четвертый заполняющий слой (5-8)	300/180	11,5	89	3400/1620	225/275
Слой основного заполнения (9-104)	340/200	12	110	3400/1620	225/275
Слой усиления шва (105-112)	260/110	11,15	80,3	3400/1620	175/325
Примечание: 1 В числителе приведены данные, полученные в импульсе тока, в знаменателе – в паузе. 2 Расход аргона – 20 ... 25 л/мин. 3. Звездочкой обозначена подача проволоки в «голову» сварочной ванны на проходах от 3 до 112.					

3.4 Контроль качества сварных соединений при разработке технологии сварки элементов главного циркуляционного трубопровода ГЦТ Ду 850.

Контроль сварных соединений осуществлялся неразрушающими методами в объеме 100 % УЗК [38], РГК [36] и капиллярным [37] с применением цветной дефектоскопии.

После проведения неразрушающих методов контроля стыковое сварное соединение подвергалось термической обработки по режиму окончательного высокого отпуска при температуре 650 °С в течение 6 ч.

В соответствии с «Программой аттестационных испытаний сварочной проволоки Св-08Г1НМА для автоматической аргодуговой сварки элементов ГЦТ Ду 850 из стали 10ГН2МФА» из сварного соединения были отобраны пробы образцов для изучения с последующим анализом физико-механических свойств металла сварного шва и сварного соединения и определения критической температуры хрупкости металла шва, а также были сделаны шлифы для металлографических исследований.

Исследования для распределения легирующих элементов по высоте металла шва сварного соединения стали 10ГН2МФА, полученного в процессе ААрДС с применением сварочной проволоки Св-08Г1НМА, показали, что наплавленный металл имеет равномерный химический состав по всей площади поперечного сечения сварного шва.

Как видно на рисунке 23, механические свойства металла сварного шва при комнатной и рабочих температурах полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к механическим характеристикам металла сварного шва, выполненного с применением способа сварки ААрДС [43]. По результатам испытаний контроля качества [30] сварных соединений и показателям механических свойств сварных соединений выполненных из стали марки 10ГН2МФА свидетельствуют о том, что прочностные характеристики и показатели пластичности сварных соединений превышают аналогичные показатели характеристик основного металла. Разрушение всех

образцов, отобранных из сварных соединений происходило по основному металлу на расстоянии 8 мм от линии сплавления.

Угол изгиба при проведении механических испытаний на статический изгиб образцов сварных соединений с площадью поперечного сечения 35×45 мм составляет не менее 120°, что составляет выше требуемых значений. В соответствии с требованиями [43], показатели угла изгиба должны быть не ниже 40°. Соответственно следует отметить, что при механических испытаниях на статический изгиб образцы сварных соединений при этом не только не разрушились, но и не имели трещин.

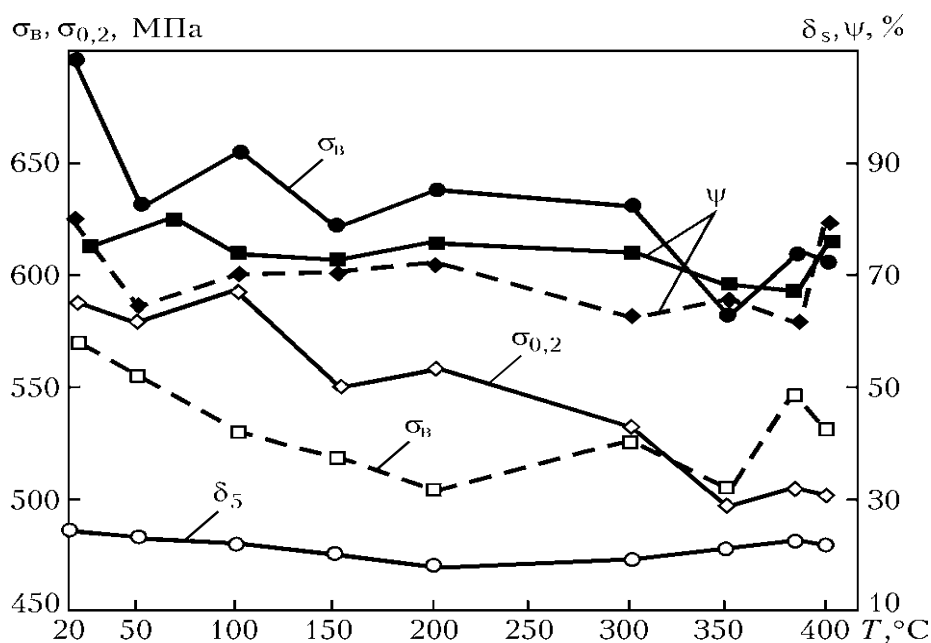


Рисунок 23 – Механические свойства металла шва (сплошные кривые) и сварных соединений стали 10ГН2МФА (штриховые), полученные способом сварки ААрДС с применением сварочной проволоки Св-08Г1НМА при различных температурах испытания сварного соединения

Определение критической температуры хрупкости металла шва осуществлялся в соответствии с [32] при испытании металла шва на ударный изгиб образцов Шарпи с V-образным острым надрезом (тип IX по ГОСТ 6996-66). Результаты этих испытаний, представленные на рисунке 24 и 25 являются исходной информацией для определения критической температуры хрупкости

T_K . В качестве последней принимают температуру, для которой выполняются следующие условия:

- при T_K среднеарифметическое значение ударной вязкости должно быть не ниже $59 \text{ Дж} / \text{см}^2$, а минимальное – не ниже 70 % указанного, т.е. не менее $41,3 \text{ Дж} / \text{см}^2$;

- при $T_K = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ среднеарифметическое значение ударной вязкости должно составлять не менее $89 \text{ Дж} / \text{см}^2$, а минимальное – не ниже 70 % указанного, т.е. не менее $62,3 \text{ Дж} / \text{см}^2$;

- минимальное значение вязкой составляющей в изломе должно быть не ниже 50 %. Тогда на основании расчета, рекомендуемого в работе [32], температура $T_1 = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ (рисунок 25) принимается в качестве T_K .

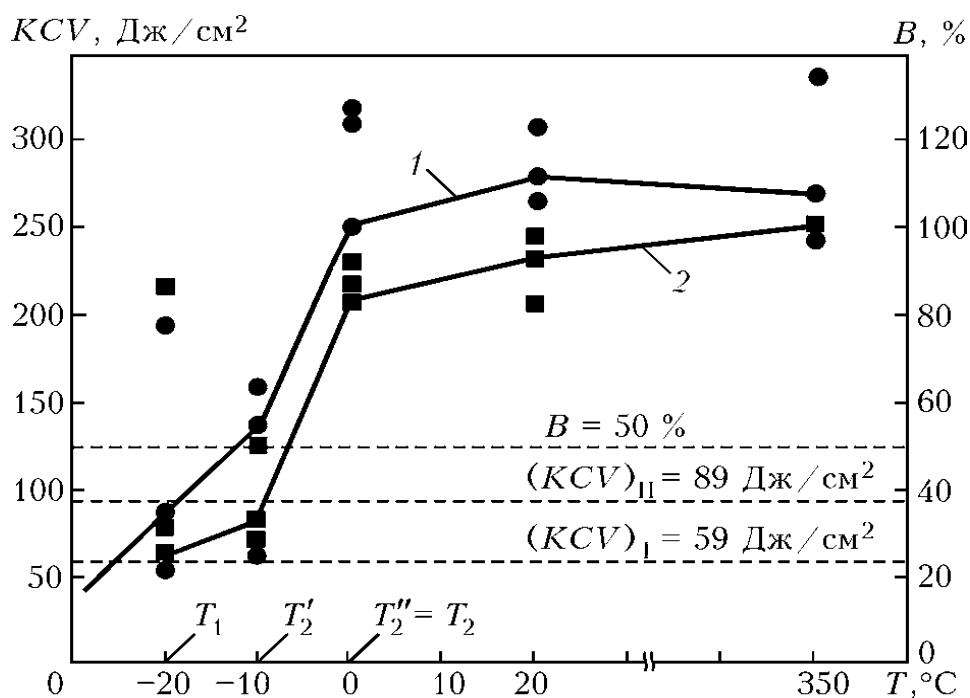


Рисунок 24 – Влияние температуры испытаний металла шва на его ударную вязкость $KCV(1)$ и количество вязкого волокна $B(2)$: ●, ■ – экспериментальные точки

Таким образом, T_K и механические свойства металла шва и сварных соединений стали 10ГН2МФА, полученных ААрДС с применением сварочной проволоки Св-08Г1НМА, удовлетворяют требованиям, изложенным в [43].

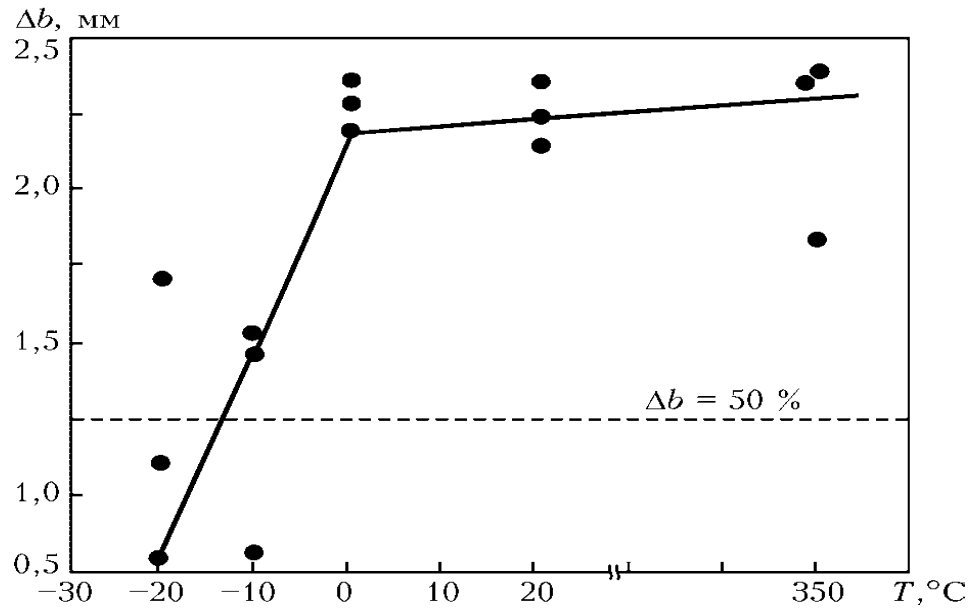


Рисунок 25 – Влияние температуры испытания на поперечное расширение Δb ударных образцов

Исследования макроструктуры образцов сварного шва выполнялись в соответствии с [43], для чего использовали темплеты, вырезанные поперек сварного соединения. В процессе анализа изучалось слоистое строение металла сварного шва для выявления межслойных и межваликовых дефектов, а так же кристаллическую макроструктуру металла сварных швов для оценки их сплошности и однородности.

Анализ макроструктуры сварного соединения на рисунке 26 показал, что в металле сварного шва валики имеют однородное строение и приблизительно одинаковое сечения, а ЗТВ – постоянную ширину по всей высоте сварного шва. Данный факт дает основание считать, что режимы сварки на протяжении выполнения всего цикла технологического процесса сварки были стабильными, не допустимых дефектов между валиками и между слоями в металле сварного шва, а так же в зоне сплавления не обнаружено, металл сварного шва плотный и имеет однородную структуру. Дефектов в виде трещин, пор, недопустимых скоплений шлаковых включений и непроваров не обнаружено.

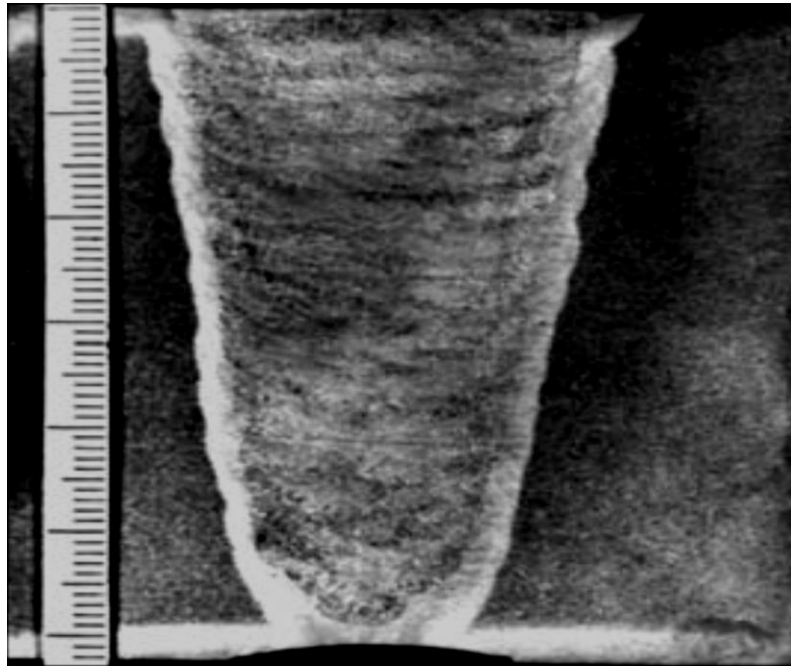


Рисунок 26 – Макроструктура ($\times 2,2$) контрольного сварного соединения элементов ГЦТ Ду850, полученного ААрДС с применением сварочной проволоки Св-08Г1НМА

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

При исследовании микроструктуры металла сварного соединения обращает внимание высокая частота по неметаллическим включениям. Имеющиеся неметаллические включения типа сложных оксисульфидов марганца отличаются мелкой дисперсностью (менее 0,01 мм) и являются одиночными.

Структура металла шва состоит из отпускаемого бейнита и ферритной составляющей, для которой характерна мелкозернистость (размер зерна можно оценить баллом № 8 – 9).

В микроструктуре металла ЗТВ вблизи границы зоны сплавления сварного соединения участок крупного зерна практически отсутствует. Это объясняется тем, при многопроходной сварке металла ЗТВ возле границы сплавления при каждом проходе подвергается термическому воздействию

(нормализации) и отпуску при выполнении последующего прохода. Как правило, на этих участках формируется мелкодисперсная бейнитно-ферритная структура. По мере удаления от границы зоны сплавления размер зерна несколько уменьшается, структура металла представляет собой мелкодисперсный бейнит. Затем ЗТВ плавно переходит в зону основного металла, структура которого представляет собой бейнит и ферритно-карбидную составляющую.

Как показано на рисунке 27, металл сварного шва имеет твердость HV 225...230, характерную для структуры отпущенного бейнита. Твердость металла ЗТВ возле границы сплавления несколько повышается (до HV 240...245), а по мере удаления от границы сплавления – снижается до уровня твердости основного металла – HV 185.

Из приведенных данных видно, что характер структуры металла сварного шва и ЗТВ сварных соединений стали 10ГН2МФА хорошо согласуется с показателями распределения твердости и механическими характеристиками наплавленного металла и сварных соединений.

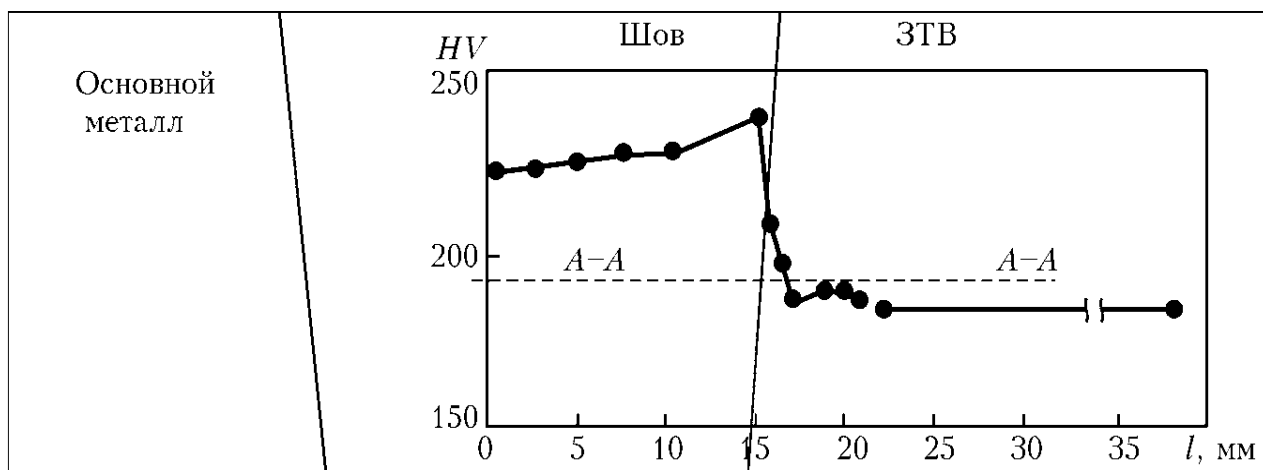


Рисунок 27 – Распределение твердости в контрольном сварном соединении стали 10ГН2МФА, полученном способом ААрДС с использованием сварочной проволоки Св-08Г1НМА, в зависимости от расстояния l от центра шва (пунктиром показана линия измерения твердости)

Таким образом, результаты выполненных исследований показали, что сварные соединения стали 10ГН2МФА, выполненные ААрДС с применением

сварочной проволоки Св-08Г1НМА, имеет физико-механические свойства, полностью отвечающие предъявляемым требованиям. На основании полученных результатов принято решение о возможности применения сварочной проволоки Св-08Г1НМА для ААрДС элементов ГЦТ Ду 850 из плакированной стали 10ГН2МФА.

Для практической реализации ААрДС с применением сварочной проволоки Св-08Г1НМА для сварного соединения элементов ГЦТ Ду 850 при замене ПГ необходимо осуществить в установленном порядке производственную аттестацию по предложенной технологии сварки.

4 Аттестация технологии сварки ААрДС в узкую разделку элементов ГЦТ Ду850 на АЭС

4.1 Предварительные исследования

Как показал анализ существующих способов механизированной сварки, для соединения элементов главного циркуляционного трубопровода ГЦТ [61] с патрубками парогенератора ПГ наиболее эффективным является применение автоматической аргодуговой сварки ААрДС [18]. При выполнении ААрДС в стандартную разделку кромок рекомендуется использовать присадочную проволоку Св-08Г1НМА по ТУ 14-15-373-95.

Применение стандартной [42] разделки кромок (рисунок 28, а) обусловлено отсутствием специализированного оборудования для механической обработки кромок патрубков ПГ под узкую разделку в условиях АЭС (завод-изготовитель поставляет ПГ со стандартной разделкой кромок на патрубках). Благодаря разработке в настоящее время специализированного портативного оборудования для механической обработки появилась реальная возможность применения узкой разделки кромок (рисунок 28, б) при соединении элементов ГЦТ с патрубками ПГ.

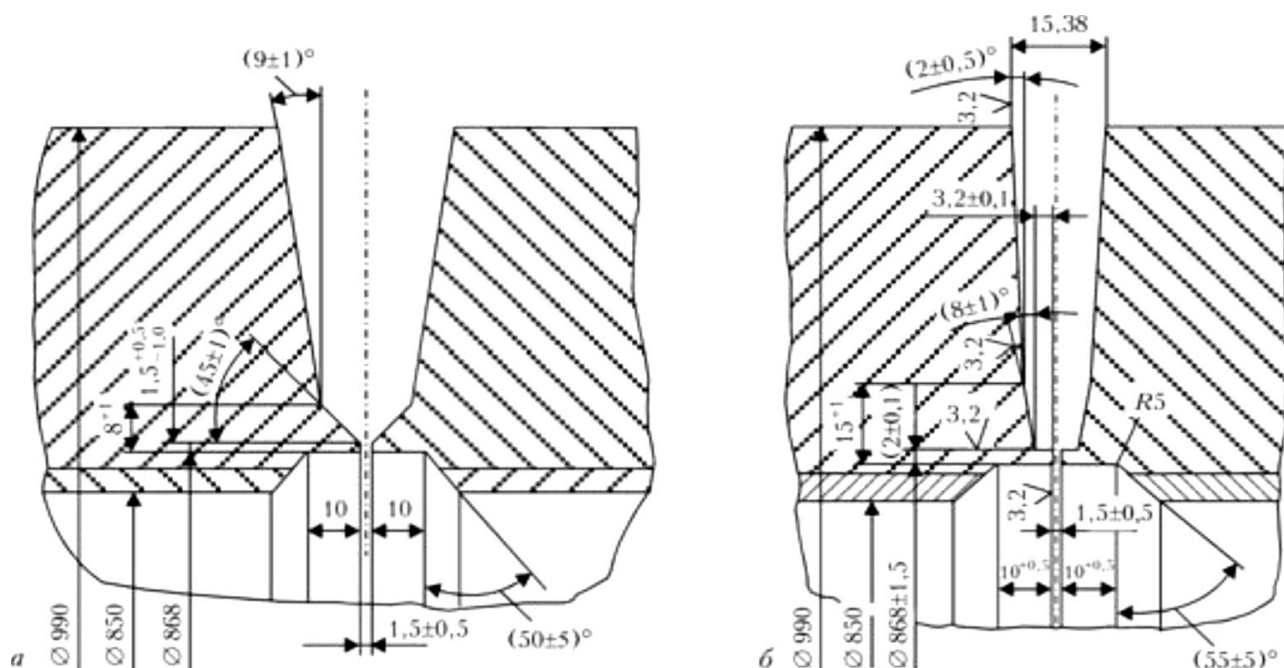


Рисунок 28 – Схемы стандартной (а) и узкой (б) разделки кромок соединений, полученных ААрДС неплавящимся электродом с подачей присадочной проволоки

Осуществление ААрДС в узкую разделку кромок позволит существенно снизить трудоемкость сварочных работ, повысить их производительность, уменьшить количество наплавленного металла и уровень остаточных сварочных напряжений, при этом обеспечит высокое качество сварных соединений и значительно снизит дозу радиационного воздействия на персонал при выполнении сварочных работ. Разработка и аттестация технологии ААрДС в узкую разделку кромок при замене ПГ является важной и актуальной задачей для решения вопросов продления ресурса оборудования АЭС Украины.

Проектом ТАСИС U2.02/96 «Применение автоматической сварки в узкую разделку при замене парогенераторов» предложена французская технология ААрДС в узкую разделку кромок в смеси 70 % He + 30 % Ar трубопроводов Ду850, а также выполнена поставка аппаратуры для сварки. Однако рекомендации указанного проекта относятся исключительно к технике сварки в случае использования поставленного сварочного оборудования. Что же касается свойств сварных соединений, выполненных ААрДС в узкую

разделку, то сведения по этому вопросу отсутствуют. Кроме того, использование ААрДС в узкую разделку не предусмотрено правилами и нормами, действующими в атомной энергетике. В связи с этим для внедрения предложенной разработки необходимо провести комплекс работ по аттестационным испытаниям сварных соединений стали 10ГН2МФА, выполненных ААрДС в узкую разделку кромки, в соответствии с требованиями к применению и аттестации новых технологий и материалов [41].

Для получения исходных данных для отработки технологии сварки ААрДС в узкую разделку кромок и оценки физико-механических свойств сварных соединений проведены предварительные исследования. С этой целью сваривали кольцевые стыковые образцы с узкой разделкой кромок (рисунок 28, б) элементов ГЦТ Ду850 из стали 10ГН2МФА диаметром 990 мм с толщиной стенки 70 мм. Сварку выполняли при вертикальном расположении оси соединения (сварка горизонтального шва на вертикальной плоскости). В качестве присадочного материала при ААрДС в смеси 70 % He + 30 % Ar использовали сварочную проволоку Св-08Г1НМА (ТУ 14-1-2869-79) диаметром 0,9 мм [18].

Особенностью сварки неплавящимся электродом в смеси гелия и аргона [5, 6] является изменение глубины проплавления. Так, при сварке в смеси 70 % He + 30 % Ar глубина проплавления больше, чем при сварке в чистом аргоне или смеси 70 % Ar + 30 % He. Это обусловлено более высоким потенциалом ионизации гелия ($U_1 = 24,5$ В) по сравнению с аналогичным показателем у аргона ($U_1 = 15,7$ В). Значительное (до 70 %) содержание гелия в смеси приводит к увеличению напряжения на дуге, в результате чего повышается температура сварочной ванны. При этом увеличивается проплавление основного металла. Поэтому для гарантированного сплавления наплавленного металла с кромками узкой разделки целесообразно выполнять ААрДС в смеси 70 % He + 30 % Ar. При ААрДС в стандартную разделку кромок (рисунок 28, а) такая смесь не может быть эффективной из-за плохой защиты сварочной

ванны от окружающего воздуха. При сварке в узкую разделку свариваемые кромки непосредственно способствуют хорошей защите сварочной ванны. Кроме того, для обеспечения надежной и эффективной газовой защиты сварочной ванны при ААрДС кольцевых стыковых соединений из стали 10ГН2МФА применяли специальную сварочную горелку для сварки в узкую разделку кромок (рисунок 29). Сварку выполняли с предварительным и сопутствующим подогревом до 170 °С [42].

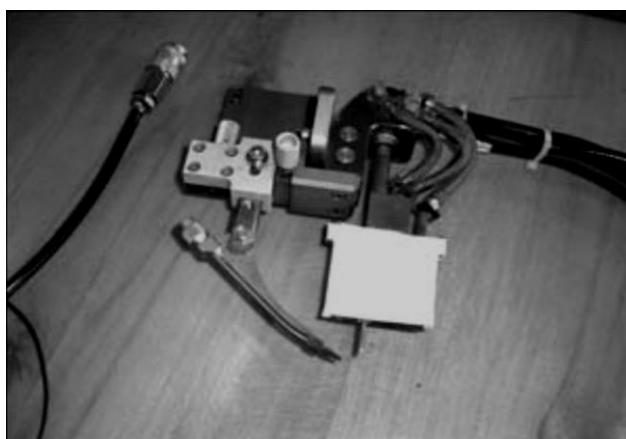


Рисунок 29 – Общий вид горелки для ААрДС в узкую разделку кромок

ААрДС корневой части выполняли с минимальным осевым зазором с подачей сварочной проволоки в хвост ванны, что обеспечило требуемые провар и обратное формирование корневого шва. Режим сварки был следующим: сварочный ток $I_{св} = 150$ А; напряжение на дуге $U_{д} = 11$ В; скорость сварки $v_{св} = 6,0$ м/ч; скорость подачи присадочной проволоки $v_{пр} = 152$ м/ч; расход смеси защитного газа 1000...1200 л/ч. Режимы сварки при заполнении разделки выбирали с учетом обеспечения надежного сплавления шва со стенками разделки и формирования валиков, а также в зависимости от диаметра изделия, на котором выполняется данный слой. В результате отработки технологии установлены оптимальные режимы ААрДС в узкую разделку кромок кольцевых толстостенных стыков Ду850 из стали 10ГН2МФА (таблица 9).

Таблица 9 – Режимы сварки кольцевых стыковых соединений из стали 10ГН2МФА

№ прохода	№ программы	Время, мкс	Сварочный ток, А	Напряжение на дуге, В	Скорость подачи сварочной проволоки, мм/мин	Скорость сварки, мм/мин
1	1	225/275	150/50	11	2540/1000	99
2	2	125/375	160/90	10	Без сварочной проволоки	86
		Сплавление нижней кромки (изогнутый электрод направлен вниз)				
3	3	125/375	175/100	10	Без сварочной проволоки	86
		Сплавление верхней кромки (изогнутый электрод направлен вверх)				
4	4	225/275	220/130	11,5	2000/1000	91
5	5	225/275	250/150	11,5	2600/1300	89
6	6	225/275	300/180	11,5	3400/1620	89
7-11	7	225/275	350/170	12,1	2100/920	84
		Ширина шва 7,5...8,5 мм				
12-29	8	225/275	360/180	11,5	2290/1020	84
		Ширина шва 8,5...9,5 мм				
30-34	12	225/275	370/190	11,5	2450/1150	84
		Ширина шва 9,5...10,5 мм				
35-43	13	225/275	330/140	11,5	2050/850	89
		Финишный слой (последние 10...15 % разделки кромки)				
44-45	14	1755/325	260/110	11,5	1520/760	89
		Облицовочные слои				
<p>Примечание. 1 В числителе приведены значения показателей в импульсе, в знаменателе — в паузе.</p>						

В процессе сварки стыков проводили послойный 100%-й визуальный и измерительный контроль (ВИК). После заполнения корневой части разделки на высоту 8...10 мм осуществляли термический «отдых» при температуре 150 °С продолжительностью 8 ч с последующим ВИК и рентгенографическим контролем РГК, а также капиллярным контролем КК изнутри. После заполнения 50 % разделки и термического «отдыха» вновь выполняли 100%-й ВИК и РГК. По окончании заполнения разделки и последующего термического «отдыха» проводили 100 %-й ВИК, КК, РГК, ультразвуковой контроль УЗК и оптический контроль [9].

После сварки и контроля сварные соединения подвергали термической обработке по режиму окончательного высокого отпуска [42]: нагрев до 650 °С, выдержка при 650 °С в течение 8 ч, охлаждение до 450 °С со скоростью 40 °С/ч, до температуры 250 °С со скоростью не более 80 °С/ч. Дальнейшее охлаждение до температуры окружающей среды происходило под слоем изоляции.

После проведения термической обработки выполняли 100%-й ВИК, КК, РГК и УЗК, а также ВИК, КК наплавки аустенитного слоя и УЗК наплавки (на отслоение плакировки). Результаты контроля показали, что в термообработанных сварных соединениях дефекты отсутствуют.

Из выполненных стыков сварных соединений стали 10ГН2МФА вырезали заготовки образцов для определения химического состава, механических свойств и структуры металла шва. Результаты спектрального анализа металла шва (через 14...15 мм начиная от корня шва) с оценкой распределения легирующих элементов по высоте соединения приведены в таблице 10.

Из таблицы видно, что металл шва сварного стыка отличается равномерным химическим составом по всей высоте сварного соединения.

Весьма интересны данные газового анализа о содержании кислорода. Оно оказалось очень низким (0,0032 мас. %), что свидетельствует о минимальном содержании неметаллических включений в металле шва и его высокой ударной вязкости и объясняется рафинирующим воздействием гелия на расплавленный металл. Известно, что при продувке жидкого металла гелием извлекаются растворенные в металле газы и удаляются в виде шлака неметаллические примеси [5, 6].

Таблица 10 – Химический состав (мас. %) сварочной проволоки, основного металла и металла шва сварного соединения стали 10ГН2МФА

Объект исследования	C	Si	Mn	Ni	Mo	V	S	P	[O]	[N]	H _{ост}
Проволока Св-08Г1НМА	0,06	0,40	1,60	0,70	0,80	0,01	-	-	-	-	-
Сталь 10ГН2МФА	0,11	0,24	0,78	1,89	0,52	0,01	0,003	0,010	-	-	-
Часть металла шва:											
Корневая	0,098	0,268	1,11	0,85	0,62	0,01	0,009	0,011	0,0 032	0,00 50	0,22
Промежуточная	0,087	0,290	1,17	0,80	0,64	0,01	0,011	0,010			
	0,086	0,288	1,17	0,68	0,64	0,01	0,010	0,010			
	0,081	0,302	1,21	0,72	0,63	0,01	0,010	0,010			
Верхняя	0,078	0,305	1,22	0,70	0,63	0,01	0,009	0,011			

Результаты выполненных механических испытаний наплавленного металла при комнатной температуре и 350 °С представлены в таблице 11. Как видно из таблицы, прочностные характеристики и показатели пластичности металла шва при комнатной и рабочей температурах значительно выше существующих требований [43].

Таблица 11 – Механические свойства металла шва сварного соединения стали 10ГН2МФА

$T_{исп.}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\sigma_B, \text{ МПа}$	$\sigma_T, \text{ МПа}$	$\delta_5, \%$	$\psi, \%$
20	$\frac{447,2...486,7}{465,2}$	$\frac{568,9...591,6}{538,4}$	$\frac{27,0...28,0}{27,4}$	$\frac{75,0...76,6}{76,0}$
350	$\frac{609,6...638,8}{626,0}$	$\frac{473,0...497,6}{488,8}$	$\frac{18,8...21,3}{20,0}$	$\frac{65,7...72,0}{69,2}$
Примечания 1 В знаменателе приведены средние значения, полученные после испытаний трех образцов.				

Определение критической температуры хрупкости металла шва осуществляли путем испытаний на ударный изгиб образцов Шарпи с V-

образным острым надрезом по центру шва (тип IX по ГОСТ 6996–66). Результаты испытания на ударный изгиб приведены в таблице 11. На рисунке 30 показано изменение ударной вязкости (KCV) и доли вязкого волокна B в изломе в зависимости от температуры испытания. В соответствии с работой [32] в качестве критической температуры T_k хрупкости принимают температуру, для которой выполняются следующие условия:

- при T_k среднеарифметическое значение ударной вязкости должно быть не ниже 59 Дж/см^2 , а минимальное — не ниже 70 % указанного, т. е. не менее $41,3 \text{ Дж/см}^2$;

- при $T_k + 30 \text{ }^\circ\text{C}$ среднеарифметическое значение ударной вязкости должно быть не ниже 89 Дж/см^2 , а минимальное - не ниже 70 % указанного, т. е. не менее $62,3 \text{ Дж/см}^2$.

Минимальное значение вязкой составляющей в изломе при этом должно составлять не менее 50 %.

При рассмотрении полученных данных видно, что, как следует из работы [32], критическая температура хрупкости соответствует $-72 \text{ }^\circ\text{C}$.

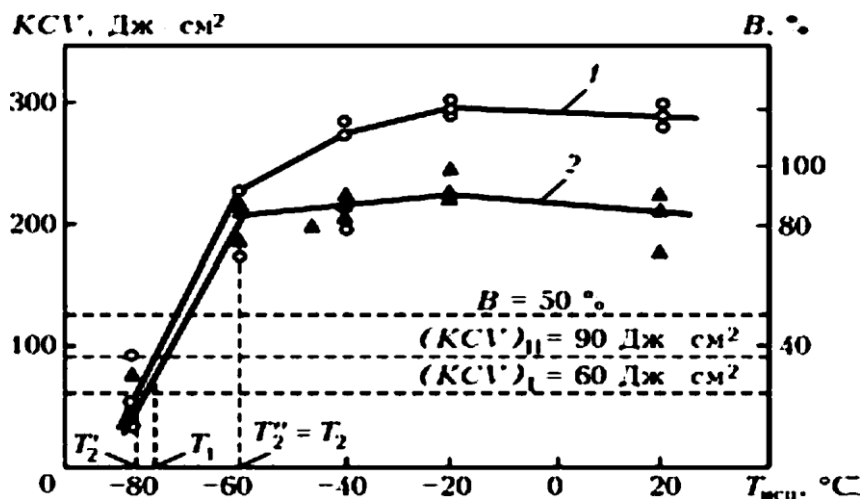


Рисунок 30 – Влияние температуры испытаний металла шва сварных соединений, выполненных ААрДС в узкую разделку, на ударную вязкость KCV (1) и долю вязкого волокна B в изломе (2): \circ , \blacktriangle - экспериментальные точки; остальные обозначения см. в работе [32]

Таким образом, механические свойства и критическая температура хрупкости металла шва сварных соединений стали 10ГН2МФА, выполненных ААрДС в смеси 70 % He + 30 % Ar в узкую разделку, вполне удовлетворяют существующим требованиям [43].

Исследования макро- (рисунок 31) и микроструктуры сварных соединений показали, что в металле шва отсутствуют поры, трещины, несплавления, шлаковые включения и другие дефекты. Наплавленный металл имеет бейнитную структуру, которая наряду с требуемыми механическими свойствами отличается высокой вязкостью и трещиностойкостью. Неметаллические включения в металле шва мелкодисперсные и имеют произвольное расположение. Анализ металла ЗТВ показал, что его структура характеризуется в основном бейнитной составляющей. Ферритно-перлитная составляющая почти всегда располагается на границе раздела фаз, причем содержание ее незначительное. Металл шва имеет твердость *HV* 240...250, что характерно для структуры отпущенного бейнита. По мере удаления от линии сплавления твердость несколько уменьшается (*HV* 225...235). Твердость основного металла составляет *HV* 215...220. Провалов по твердости в металле ЗТВ не наблюдается. Из полученных данных видно, что характер микроструктуры металла шва и ЗТВ сварных соединений стали 10ГН2МФА хорошо согласуется с данными о распределении твердости и механических свойствах металла шва.

Таким образом, результаты предварительных испытаний свидетельствуют о высоком качестве и наличии требуемых механических свойств сварных соединений стали 10ГН2МФА, полученных ААрДС в узкую разделку кромок в смеси 70 % He + 30 % Ar, и полном соответствии существующим требованиям и нормам [43].

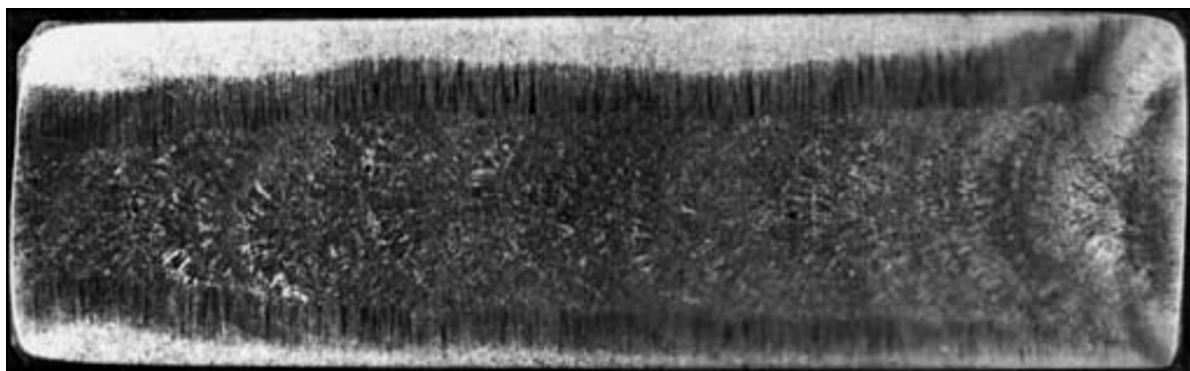


Рисунок 31 – Макроструктура ($\times 1,7$) металла шва сварного соединения стали 10ГН2МФА, полученного ААрДС в узкую разделку кромок в смеси 70 % He + 30 % Ar с использованием сварочной проволоки Св-08Г1НМА

4.2 Исследовательская аттестация

Для возможности включения узкой разделки в перечень основных типов сварных соединений [42], полученных ААрДС, необходимо пройти определенные аттестационные испытания, предусмотренные в работе [41].

Для проведения аттестационных испытаний в рамках проведения исследовательской аттестации технологии сварки был подготовлен кольцевой стык с наружным диаметром 990 мм и толщиной стенки 70 мм из плакированной стали 10ГН2МФА. Форма разделки кромок соответствовала представленной на рисунке 28 (б). Для сварки применяли специализированную сварочную аппаратуру «Autotig 600РС» французской фирмы «Polysoude».

Перед сваркой проводили предварительный подогрев соединений до температуры 150...200 °С со скоростью не более 150 °С/ч с применением установки «Стандарт Европа 82/6» (фирма «Велдотерм»). При выполнении корневого шва подачу сварочной проволоки Св-08Г1НМА диаметром 0,9 мм осуществляли в хвост ванны, благодаря чему обеспечивался требуемый провар и обратное формирование металла корневого шва.

Режимы сварки корневого слоя шва и последующих слоев при заполнении разделки соответствовали указанным в таблице 9. При заполнении разделки кромок сварочную проволоку подавали в голову сварочной ванны. В

процессе заполнения разделки выполняли зачистку поверхности металла шва металлической щеткой и осуществляли внешний осмотр каждого прохода. По окончании сварки стыка был проведен термический «отдых» при температуре 150 °С в течение 8 ч (в соответствии с [42]). Осуществляли 100%-й УЗК, РГК и КК сварных соединений. После неразрушающего контроля качества сварной стык подвергали термообработке по режиму окончательного высокого отпуска при температуре 650 °С в течение 6 ч [42, 17].

В соответствии с ПМ-Т. 38.001–04 «Программой аттестационных испытаний сварных соединений трубопроводов Ду850 из стали 10ГН2МФА (плакированной), выполненных ААрДС в узкую разделку» из сваренного стыка отбирали пробы и вырезали заготовки образцов для изучения физико-механических свойств сварных соединений, характеристик сопротивления хрупкому разрушению, показателей циклической прочности, стойкости против межкристаллитной коррозии, а также шлифы для металлографических исследований.

Исследование распределения легирующих элементов по высоте металла сварного шва сварного соединения стали 10ГН2МФА, выполненного ААрДС в узкую разделку в смеси 70 % He + 30 % Ar с применением сварочной проволоки Св-08Г1НМА, показало, что он имеет практически постоянный химический состав (таблица 10) по всей высоте поперечного сечения металла шва.

Результаты испытаний механических свойств металла шва и сварного соединения стали 10ГН2МФА (таблица 11) свидетельствуют о том, что прочностные характеристики и показатели пластичности сварных соединений выше, чем у основного металла. Разрушение всех образцов сварных соединений происходило по основному металлу.

Угол загиба испытываемых образцов сварных соединений сечением 35×45 мм составлял не менее 120°, что превышает требуемые значения (в соответствии с требованиями ПНАЭ Г-7-010-89 он должен быть не ниже 40°).

Следует отметить, что испытываемые образцы при этом не только не разрушались, но и не имели трещин (рисунок 32).

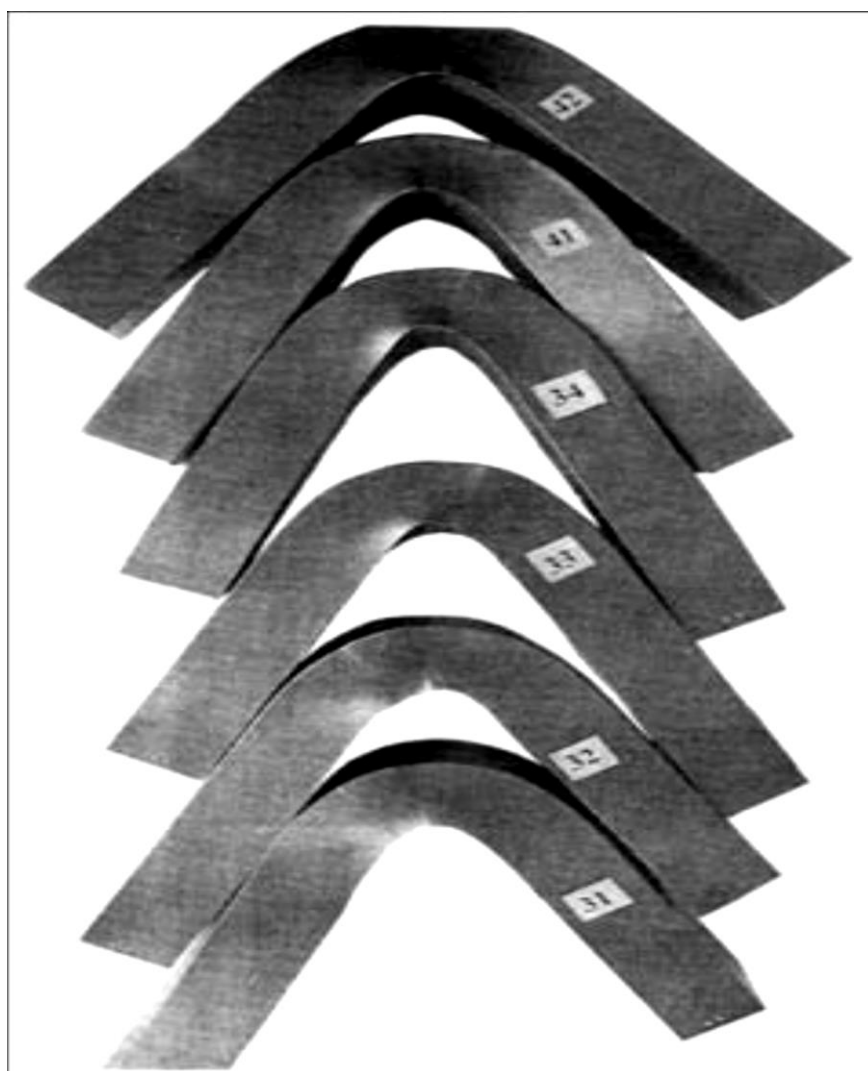


Рисунок 32 – Вид образцов контрольного соединения после испытаний на статический изгиб

Определение критической температуры хрупкости металла шва и ЗТВ осуществляли в соответствии с [32] при испытании металла шва на ударный изгиб образцов Шарпи с V-образным острым надрезом по центру шва и по зоне сплавления (тип IX по ГОСТ 6996–66). На основании выполненного расчета критическая температура хрупкости металла шва должна составлять – 77 °С, а ЗТВ – ниже – 100 °С (рисунок 33), что полностью отвечает предъявляемым требованиям [43].

Испытания на малоцикловую усталость проводили в Институте проблем прочности НАН Украины на стандартной универсальной электрогидравлической машине 3201 УЭ-20 при осевом растяжении – сжатии (деформировании) с контролем амплитуды полной деформации рабочей части образца.

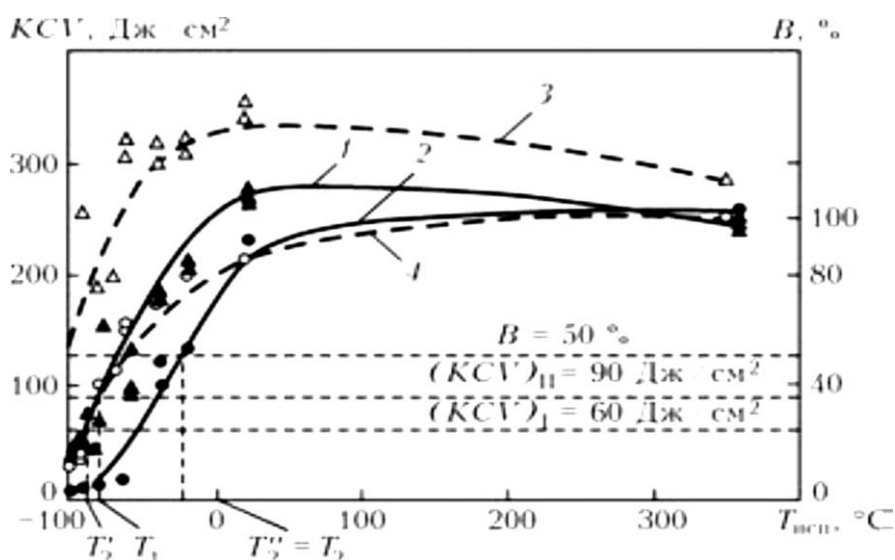


Рисунок 33 – Влияние температуры испытаний $T_{исп.}$ металла контрольного сварного соединения на ударную вязкость KCV (1, 3) и долю вязкого волокна B в изломе (2, 4): сплошные кривые – металл шва; штриховые – ЗТВ; ●, ▲, ○, Δ – экспериментальные точки

Основные геометрические размеры образца были выбраны в соответствии с рекомендациями ГОСТ 25.502–79 «Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость». Нагружение образцов осуществляли по симметрическому циклу (коэффициент асимметрии цикла деформации $R\varepsilon = -1$), т. е. испытания проводили в жестком режиме. В процессе циклического нагружения образцов продольные деформации задавали и измеряли с помощью специального тензометра. Испытания проводили при частоте циклического нагружения $f = 0,3$ Гц. Критерием циклической долговечности образца в соответствии с [32] принято появление и развитие на поверхности образца трещины усталости длиной от 0,5 до 2,0

мм. При достижении трещины усталости указанной длины образец снимали с испытаний.

На рисунке 34 приведены результаты испытаний на малоцикловую усталость сварных соединений стали 10ГН2МФА, выполненных ААрДС в узкую разделку кромок, при комнатной и рабочей температуре, а для сравнения — полученные при испытании основного металла. Из рисунка видно, что как при комнатной, так и при рабочей температуре имеет место незначительное снижение амплитуды разрушающей деформации ϵ_a при заданной долговечности сварных соединений в сравнении с основным металлом — сталью 10ГН2МФА.

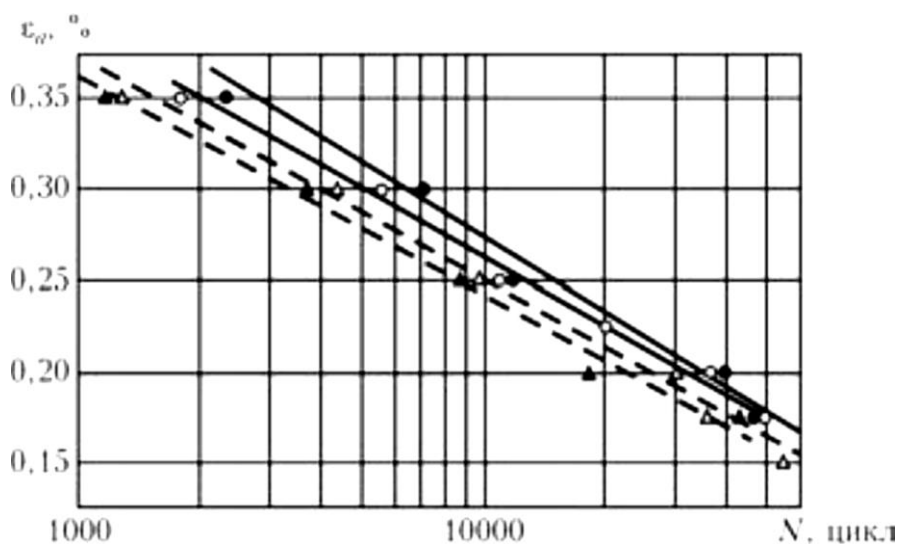


Рисунок 34 – Кривые усталости основного металла (сплошные кривые) и сварных соединений (штриховые), полученные по результатам испытаний контрольного сварного соединения на малоцикловую усталость: ●, ▲ - 350; ○, △ — 20 °С

При этом снижение циклической прочности незначительно при длительности испытаний свыше $1 \cdot 10^4$ циклов, а в области меньшей долговечности, где в основном на сопротивление малоциклового усталости оказывают влияние пластические свойства сварных соединений, кривые усталости сварных соединений при 20 и 350 °С расположены близко друг к другу и к кривым основного металла. На рисунке 36 приведены кривые

изменения коэффициента ϕ_s циклической прочности сварных соединений (рисунок 35) в зависимости от количества циклов до появления трещины, которые определяли в соответствии с методикой, рекомендуемой в работе [32].

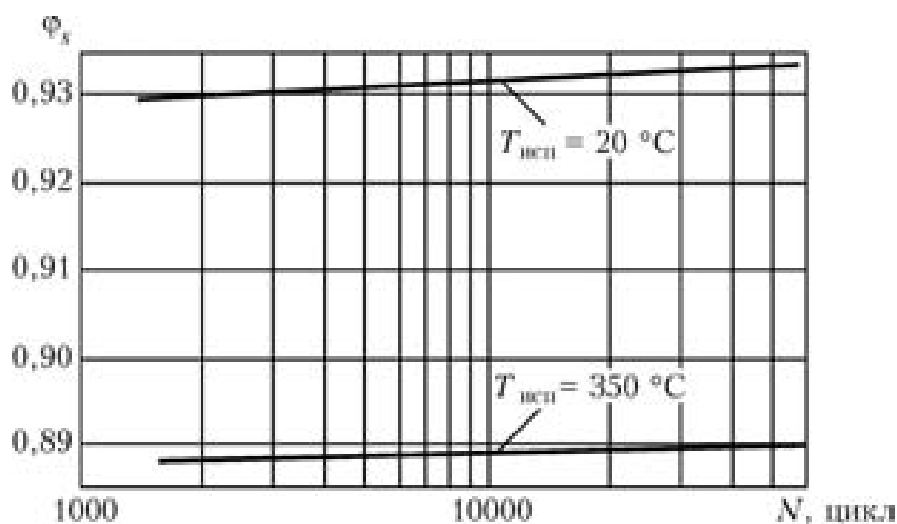


Рисунок 35 – Кривые изменения коэффициента ϕ_s циклической прочности сварных соединений

Для исследования диапазона долговечности в интервале от $1 \cdot 10^2$ до $1 \cdot 10^8$ циклов при комнатной температуре минимальное значение $\phi_s = 0,93$, при рабочей температуре $\phi_s = 0,88$. Таким образом результаты исследования малоциклового усталости показали, что сварные соединения стали 10ГН2МФА, выполненные ААрДС в узкую разделку, имеют незначительное (5...7 %) снижение циклической прочности при комнатной температуре и 350 °C по сравнению с основным металлом.

Испытания сварного соединения стали 10ГН2МФА на стойкость против межкристаллитной коррозии проводили согласно ГОСТ 6032–89 по методу АМ без провоцирующего нагрева на образцах типа 1. Выявление межкристаллитной коррозии осуществляли методом загиба на угол 90°. Результаты испытаний полностью удовлетворяли предъявляемым требованиям [43].

Для исследования макроструктуры использовали темплеты, вырезанные поперек сварного соединения. Изучали слоистое строение металла шва для выявления межслойных и межваликовых дефектов, а также его кристаллическую макроструктуру [59] для оценки сплошности и однородности. Анализ макроструктуры металла сварного соединения показал, что в металле шва валики имеют однородное строение и приблизительно одинаковое сечение, а в ЗТВ - постоянную ширину по всей высоте шва. Это дает основание считать, что режим сварки на протяжении всего процесса получения сварного соединения был стабильным, дефектов между валиками и слоями в металле шва, а также в зоне сплавления не выявлено, металл шва плотный. Не обнаружено также дефектов в виде трещин, пор, недопустимых скоплений шлаковых включений и непроваров. При исследовании микроструктуры металла сварного соединения обращает внимание очень высокий уровень чистоты по неметаллическим включениям. Имеющиеся неметаллические включения типа сложных оксисульфидов марганца отличаются мелкой (не более 0,001 мм) дисперсностью и являются одиночными. Структура металла шва состоит из отпущенного бейнита и ферритной составляющей, для которой характерна мелкозернистость (размер зерна № 8–9 баллов).

В микроструктуре металла ЗТВ вблизи границы сплавления сварного соединения участки крупного зерна отсутствуют, вместо них формируется мелкодисперсная бейнитно-ферритная структура. По мере удаления от границы сплавления размер зерна несколько уменьшается, структура металла представляет собой мелкодисперсный бейнит.

Металл шва отличается твердостью *HV* 235...240, характерную для структуры отпущенного бейнита. Твердость металла ЗТВ возле границы сплавления несколько повышена (до *HV* 250...255), а по мере удаления от границы сплавления она снижается до уровня твердости основного металла - *HV* 180...185.

Из приведенных данных видно, что характер структуры металла шва и ЗТВ сварных соединений стали 10ГН2МФА хорошо согласуется с показателями распределения твердости и механическими характеристиками наплавленного металла и сварных соединений.

Таким образом, результаты выполненных исследований свидетельствовали о том, что физико-механические свойства, сопротивление хрупкому разрушению, циклическая прочность, коррозионная стойкость, а также данные металлографических исследований сварных соединений стали 10ГН2МФА, выполненных ААрДС в узкую разделку с применением сварочной проволоки Св-08Г1НМА, полностью отвечают предъявляемым требованиям.

На основании полученных результатов принято техническое решение ТР-Н.1234.АРС.72–04 о возможности применения ААрДС неплавящимся электродом в узкую разделку кромок при ремонте (монтаже) главных циркуляционных трубопроводов Ду850 энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000.

Выводы

В соответствии с разработанной технологической инструкцией по ААрДС в узкую разделку кромок элементов трубопроводов Ду850 из плакированной стали 10ГМ2МФА в производственных условиях получен контрольный кольцевой стык обечаек диаметром 850 мм с толщиной стенки 70 мм.

Контрольное сварное соединение было подвергнуто термообработке по режиму, рекомендованному в [6]. Результаты неразрушающего контроля показали высокое качество контрольного сварного соединения. Все применяемые методы 100 %-го контроля (ВИК, травление, КК, УЗК, РГК) подтвердили отсутствие дефектов и соответствие качества сварных соединений в соответствии с требованиям [43].

Разрушающий контроль выполняли на образцах, вырезанных из контрольного сварного соединения. При этом в соответствии с [43] определены прочность сварного соединения, стойкость против межкристаллитной коррозии, а также проведены испытания на статический изгиб и металлографические исследования.

Результаты разрушающего контроля показали, что контрольное сварное соединение по всем показателям полностью удовлетворяет предъявляемым требованиям [43]. Вид макрошлифа производственного контрольного сварного соединения стали 10ГН2МФА, полученного ААрДС в узкую разделку кромок в смеси 70 % He + 30 % Ar, представлен на рисунке 36.

Для сварных соединений элементов ГЦТ Ду 850 из стали 10ГН2МФА с патрубками ПГ в процессе сварке сварных соединений в горизонтальном положении на вертикальной плоскости рекомендована к применению многопроходная сварка ААрДС с применением сварочной проволоки Св-08Г1НМА диаметром 0,8...0,9 мм.

Для многопроходной сварке ААрДС стали 10ГН2МФА предложена, испытана и аттестована сварочная проволока Св-08Г1НМА производства фирмы «Кродекс» (Украина).

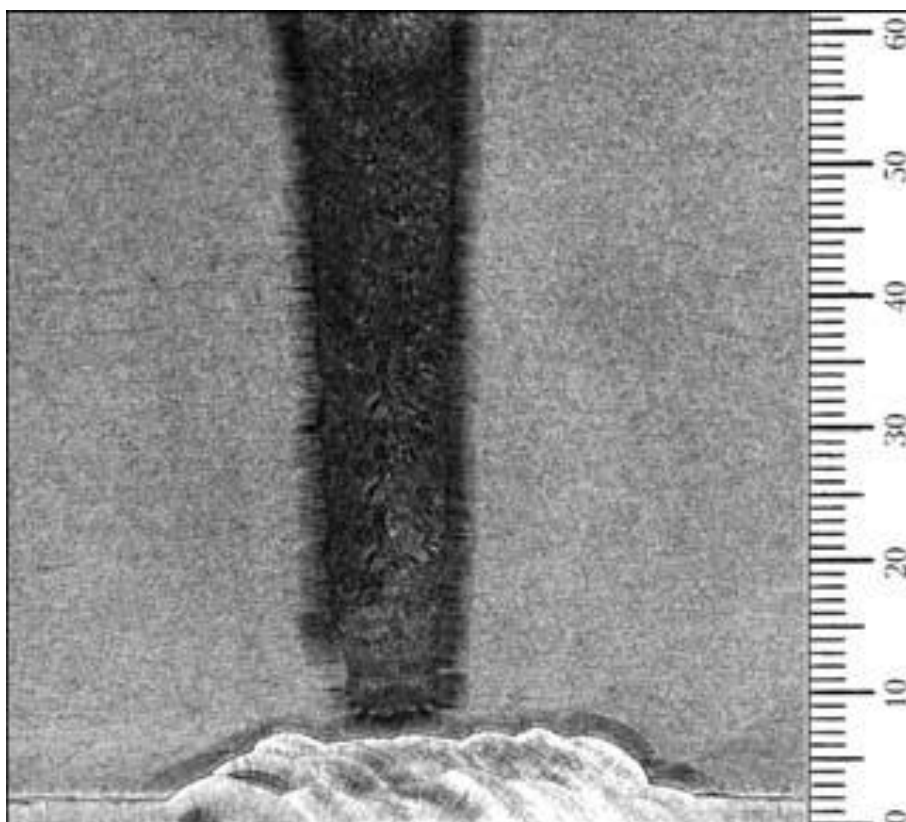


Рисунок 36 – Макрошлиф контрольного сварного соединения стали 10ГН2МФА, полученного ААрДС в узкую разделку кромок в смеси 70 % He + 30 % Ar

Металл сварного шва, полученный в процессе сварки ААрДС с применением сварочной проволоки Св-08Г1НМА, имеет требуемые физико-механические свойства и необходимый уровень критической температуры хрупкости металла сварного шва.

Для практической реализации с при применением способа сварки ААрДС в комбинации со сварочной проволокой Св-08Г1НМА в стандартную разделку для сварного соединения элементов ГЦТ Ду 850 следует проводить в установленном порядке производственную аттестацию предложенной технологии сварки.

Заключение

В ходе выполнения магистерской диссертации были проанализированы применяющиеся и возможные для применения способы сварки сварных соединений при монтаже трубопроводов и оборудования АЭС главного циркуляционного контура (ГЦК) который включает в себя монтаж главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) Ду 850 с патрубками корпуса реактора, коллекторами парогенератора, трубами с коленом и главного циркуляционного насосного агрегата на энергоблоках типа ВВЭР и проведены исследования контроля качества сварных соединений при монтаже главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) Ду850 АЭС реакторной установки ВВЭР.

В данной работе для сварки трубопроводов и оборудования АЭС главного циркуляционного контура (ГЦК) реакторной установки ВВЭР предложено использовать автоматическую аргодуговую сварку (ААрДС) в узкую разделку в смеси 70 % He + 30 % Ar с использованием сварочной проволоки Св-08Г1НМА диаметром 0,8...0,9 мм, которая уменьшит количество наплавленного металла и уровень остаточных сварочных напряжений, при этом обеспечит высокое качество сварных соединений и значительно снизит дозу радиационного воздействия на персонал при выполнении сварочных работ.

Для исследования различных способов сварки с последующим контролем качества сварных соединений при монтаже трубопроводов и оборудования АЭС главного циркуляционного контура (ГЦК) была разработана методика, предложено необходимое применяемое сварочное оборудование и оснастка.

Проведенные исследования на основании практического опыта позволяют рекомендовать применение в качестве способа сварки сварных соединений при монтаже главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) Ду850 из стали 10ГН2МФА с патрубками ПГ рекомендуется ААрДС в узкую

разделку кромок в смеси 70 % He + 30 % Ar с применением сварочной проволоки Св-08Г1НМА диаметром 0,8...0,9 мм.

Исследования макро- и микроструктуры сварных соединений показали, что в металле шва отсутствуют трещины, несплавления. Немногочисленные неметаллические включения в металле шва весьма мелкодисперсные (размером менее 0,2 мм) и имеют произвольное расположение. Одиночных неметаллических включений и пор размером $\geq 2,5$ мм, являющихся браковочным признаком для толщины 70 мм (ПНАЭ Г-7-010-89), на всех исследованных шлифах обнаружено не было.

Была проведена производственная аттестация технологии сварки, путем выполнения в производственных условиях сварки КСС на специализированном сварочном оборудовании компании «Polysoude» с проведения следующих испытаний:

- определение предела прочности при нормальной температуре;
- определение предела прочности при повышенной температуре;
- испытание на ударный изгиб (Шарпи);
- определение угла загиба.

Полученные при механических испытаниях прочностные характеристики, а также значения ударной вязкости значительно выше установленных требований.

Исходя из изложенного выше можно заключить, что для сварных соединений элементов главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) Ду850 из стали 10ГН2МФА с патрубками ПГ рекомендуется ААрДС в узкую разделку кромок в смеси 70 % He + 30 % Ar с применением сварочной проволоки Св-08Г1НМА диаметром 0,8...0,9 мм.

Предложенная технология успешно прошла исследовательскую и производственную аттестацию, согласована с Государственной инспекцией Государственного комитета по ядерному регулированию Украины и рекомендована для выполнения соединений элементов ГЦТ Ду850 при замене парогенераторов на АЭС. Технология ААрДС в узкую разделку позволит

существенно снизить трудоемкость сварочных работ, повысить производительность, уменьшить количество наплавленного металла и уровень остаточных сварочных напряжений, а также обеспечит высокое качество сварных соединений и значительно снизит дозу радиационного воздействия на персонал при выполнении сварочных работ.

Полученные результаты при исследовании контроля качества [31] сварных соединений главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) Ду850 позволяют рекомендовать указанные способы сварки на замену традиционным способам.

В настоящее время продолжаются работы, связанные с завершением аттестационных испытаний и освоения технологии автоматической сварки трубопроводов ГЦТ в узкую разделку применительно к объектам использования атомной энергии.

Список используемой литературы и используемых источников

1. А.В. Дуб, Л.Я. Левков, Д.А. Шурыгин, Ю.Н. Кригер, С.И. Марков, С.В. Орлов и др. Перспективы производства оборудования для АЭС с использованием ЭСП// Сборник ОАО ОКБ "ГИДРОПРЕСС" «Вопросы Атомной Науки и Техники - материалы и технология изготовления оборудования РУ», выпуск № 34, 2013.
2. Автоматическая сварка трубопровода главного циркуляционного контура на АЭС с аппаратами ВВЭР-440 / М.И. Лоскутов, С.А. Белкин, В.В. Шефель и др. // Энергетическое строительство – 1976. - №7. – С. 7 – 10.
3. Алексеев П.В. Расчетное моделирование процессов накопления повреждений корпуса коллектора парогенератора ПГВ-1000 в вероятностной постановке. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук 2013. -172 с.
4. Белкин С.А., Иванова И.В., Борисенко М.М., Ходаков В.Д., Петин М.М. «Свойства сварных соединений трубопровода Ду 850 мм главного циркуляционного контура АЭС, выполненных автоматической аргонодуговой сваркой».
5. Бродский А. Я. Технология дуговой электросварки в инертной среде. - М.: Машгиз, 1951 - 166 с.
6. Бродский А. Я. Аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом. - М.: Машгиз, 1956. — 396 с.
7. Герасимов В.В., Монахов А.С. Материалы ядерной техники. - М.: Энергоиздат, 1982. – 289 с.
8. Григорян Р.М. Опыт эксплуатации парогенераторов на армянской АЭС. 7-ой международный семинар по горизонтальным парогенераторам 03-05 октября 2006г. г. Подольск.
9. ГОСТ 23479-79 Контроль неразрушающий. Методы оптического вида. Общие требования.

10. ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.
11. ГОСТ 6032-89 Стали и сплавы коррозионно-стойкие. Методы испытания на стойкость против межкристаллитной коррозии.
12. ГОСТ 7122-81 Швы сварные и металл наплавленный. Методы отбора проб для определения химического состава.
13. ГОСТ 6996-66 Сварные соединения. Методы определения механических свойств.
14. ГОСТ 10157-79 Аргон газообразный и жидкий. Технические условия.
15. Зубченко А. С., Разыграев Н. П., Харина И. Л. и др. Результаты исследований характера эксплуатационных повреждений металла в зоне сварных узлов коллекторов с патрубками Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000: Тр. VII Международная конференция. “Материаловедческие проблемы при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС”. - СПб., 2002 - 225 с.
16. И.М Неклюдов, Л.С. Ожигов, А.С. Митрофанов, В.Н. Воеводин, Г.Д. Толстолуцкая, В.В. Брык, В.В. Ружицкий. Механизм повреждений сварных соединений приварки коллекторов к корпусам парогенераторов энергоблоков ВВЭР-1000 // Вопросы атомной науки и техники. 2012. - № 2(78). - С. 40-45.
17. Куран Р.И., Цыба В.И., Царюк А.К. Термообработка сварных соединений главного циркуляционного трубопровода Ду 850 при замене парогенераторов ПГВ-1000 М на Южно-Украинской АЭС. // Сварщик. – 2004. - №1. – С. 32 – 34.
18. К вопросу выбора технологии сварки элементов ГЦТ Ду850 при замене парогенераторов ПГВ-1000М на АЭС / А. К. Царюк, В. Ю. Скульский, В. В. Волков, и др. // Автоматическая сварка - 2005. - № 10. - С. 41-47.
19. Лукаевич Б.И, Трунов Н.Б., Драгунов Ю.Г., Давиденко С.Е. Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций. М., ФГУП «ГИДРОПРЕСС» 2004. – 396 с.

20. Марков С.И. Металловедческие основы производства заготовок для высоконадежных элементов энергетических и трубопроводных систем: Дисс. в виде научного докл. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук / ГНЦ РФ ОАО НПО «ЦНИИТМАШ», Москва, 2012. – 82 с.

21. Мурзаханов Г.Х., Шипков А.А. Математические модели коррозионно- механического разрушения материалов: Учебное пособие по курсу «Прикладная механика разрушения». – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 72 с.

22. Мелехов. Р.К., Похмурский. В.И. Конструкционные материалы энергетического оборудования. – К.: Научное мнение, 2003. – 440 с.

23. Несущая способность парогенераторов водо-водяных энергетических реакторов/ Н.А. Махутов, Ю.Г. Драгунов и др., , М.: «Наука», 2003. - 439 с.

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

25. Новожилов Н.М. «Основы металлургии дуговой сварки в газах», М., Машиностроение, 1979г.

26. НП-104-18. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии "Сварка и наплавка оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок".

27. НП-105-18. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии "Правила контроля металла оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок при изготовлении и монтаже".

28. Орыняк И. В., Тороп В. М., Ромащенко В. А., Жураховский В. Н. Расчет пространственного разветвленного трубопровода в программном комплексе оценки прочности оборудования АЭС // Проблемы прочности. - 1998 - № 2 - С. 87 – 100.

29. ОСТ 24.300.04-91 Оборудование атомных электростанций. Сварка, наплавка и термическая обработка сварных соединений деталей из стали марки 06Х12НЗД (06Х12НЗДЛ). Технические требования.

30. ОСТ 34-42-686-84 Организация монтажных работ на АЭС. Типовое положение и структуры службы контроля при монтаже АЭС.

31. ОСТ 108.004.10-86 Программа контроля качества изделий атомной энергетики.

32. ПНАЭ Г-7-002-89. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. - М.: Энергоатомизд, 1989. — 525 с.

33. ПНАЭ Г-7-014-89 Унифицированная методика контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Ультразвуковой контроль. Часть I. Контроль основных материалов (полуфабрикатов).

34. ПНАЭ Г-7-015-89 Унифицированная методика контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Магнитопорошковый контроль.

35. ПНАЭ Г-7-016-89 Унифицированная методика контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Визуальный и измерительный контроль.

36. ПНАЭ Г-7-017-89 Унифицированная методика контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Радиографический контроль.

37. ПНАЭ Г-7-018-89 Унифицированная методика контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Капиллярный контроль.

38. ПНАЭ Г-7-030-91 Унифицированная методика контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Ультразвуковой контроль. Часть II. Контроль сварных соединений и наплавки.

39. ПНАЭ Г-7-031-91 Унифицированная методика контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Ультразвуковой контроль. Часть III. Измерение толщины монометаллов, биметаллов и антикоррозионных покрытий.

40. ПНАЭ Г-01-011-97 Общие положения обеспечения безопасности атомных станций.

41. ПНАЭ Г-7-008-89. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. - М.: Энергоатомизд, 1990 - 169 с.

42. ПНАЭ Г-7-009-89. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка. Основные положения. - М.: Энергоатомизд, 1990 - 190 с.

43. ПНАЭ Г-7-010-89. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля. - М.: Энергоатомизд, 1990. - 124 с.

44. Под ред. проф. А. П. Бурмана и В. А. Строева. Современная электроэнергетика. – М: Издательство МЭИ, 2003. - 454 с.

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

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

47. Полосков С.И., Букаров В.А., Ищенко Ю.С. Особенности формирования корня шва орбитальной сварке неповоротных труб // Сварочное производство – 2003. – № 4 – С. 3 – 10.

48. ПОТ Р М-016-2001 Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок.

49. Проспект «Polysoude» «The Art of welding».

50. Программное обеспечение «Трехмерное конечно элементное моделирование теплового и термонагруженного состояния элементов машиностроительных конструкций (SPACE)» // Система сертификации УкрСЕПРО. Сертификат соответствия № UA 1.017.0084261-02. – 2002.

51. Романов С. В., Степанов Г. В., Харченко В. В. и др. Многоканальная система тензо- и термометрии элементов конструкций // Там же. - № 4 - С. 143 – 147.

52. РМД 2730.300.08-2003 Определение содержания ферритной фазы магнитным методом в хромоникелевых сталях аустенитного класса.

53. РТД 2730.300.02-91 Руководящий технологический документ «Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка, наплавка и термическая обработка сварных соединений деталей из сталей марок 10ГН2МФА, 10ГН2МФАЛ, 15Х2НМФА, 15Х2МФА-А, 15Х2НМФА класс 1» (ЦНИИТМАШ, 2000 г.)

54. Стратегия развития энергомашиностроения Российской Федерации на 2010-2020 годы и на перспективу до 2030 года; Министерство Промышленности и Торговли РФ, 2011.

55. Степанов Г. В., Харченко В. В., Бабуцкий А. И. и др. Оценка термодинамического нагружения в узле приварки “горячего” коллектора к патрубку парогенератора ПГВ-1000 // Там же. - 2002 - № 1 - С. 146 – 148.

56. Степанов Г. В., Харченко В. В., Бабуцкий А. И. и др. Расчет долголетия сварного соединения коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 АЭС с учетом реальных условий эксплуатации // Проблемы прочности. - 2004 - № 3 (в печати).

57. Степанов Г. В., Харченко В. В., Бабуцкий А. И. и др. Оценка напряженно-деформированного состояния узла сварного соединения “горячего” коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 АЭС // Проблемы прочности. - 2003 - № 5 - С. 142 – 153.

58. Свойства сварных соединений трубопроводов Ду 850 мм главного циркуляционного контура АЭС, выполненных автоматической аргодуговой

сваркой / С. А. Белкин, И. В. Иванов, М.М. Борисенко и др. // Энергетическое строительство. – 1992. - №5. – Стр. 50 – 55.

59. СП 1171-71 Санитарные правила по радиоизотопной дефектоскопии.

60. СП 2.6.1.1283-2003 Обеспечение радиационной безопасности при рентгеновской дефектоскопии.

61. СТО СРО-С 60542960 00034-2014. Технология монтажа трубопроводов и оборудования АЭС. Монтаж, сварка, термообработка и контроль трубопроводов и оборудования главного циркуляционного контура АЭС. Часть 1.

62. СТО СРО-С 60542960 00035-2014. Монтаж, сварка и контроль трубопроводов и оборудования компенсации давления, системы аварийного охлаждения зоны и аварийно-планового расхолаживания АЭС. Часть 2.

63. ТУ 108.1197-83 Трубы бесшовные плакированные.

64. ТУ 2730.09.036-2012 Трубы бесшовные плакированные из стали марки 10ГН2МФА для АЭС.

65. Царюк А.К. и др. «К вопросу выбора технологии сварки элементов ГЦТ Ду 850 при замене парогенераторов ПГВ-1000М на АЭС. Автоматическая сварка, №10, 2005г.

66. Царюк А.К. и др. «Разработка и аттестация технологии ААрДС в узкую разделку элементов ГЦТ Ду850 на АЭС», Автоматическая сварка, №5, 2005г.

67. Харченко С.А., Трунов Н.Б., Денисов В.В., Коротаев Н.Ф., Анализ причин повреждения металла в зоне сварного шва №111 парогенераторов ПГВ – 1000М. - М.: ФГУП ОКБ «Гидропресс», 2007. – 17 с.

68. Ballesteros A., Strizhalo V. A., Grinik E. U., et al. Determination of reference temperature T₀ for steel JRQ in an unirradiated state and construction of Master Curve // Пробл. прочности. - 2002. - № 1. - С. 41 - 51.

69. Krasowsky A. J a , Orynyak I. V., and Gienko A. Y. Approximate closed-form weight function for elliptic crack in an infinite body // Int. J. Fract. - 1999. - 99. - P. 123 - 134.

70. Davies L. M. Aspects of nuclear power plant life management // Ядерні та радіаційні технології. - 2002. - № 1. - С. 43 - 70.

71. Nuclear Safety Standards Commission (KTA), Verification Analysis for Rupture Preclusion for Pressure Retaining Components in Nuclear Power Plants., Safety Standard KTA 3206, 2014.

72. Schulz H. The Evolution of the Break Preclusion Concept for Nuclear Power Plants in Germany. Proceedings of the Seminar on Leak-Before-Break in Reactor Piping and Vessels, October 9-11, 1995, Lyon, France.