

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»
Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»
(наименование)

15.04.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки)

«Производство и ремонт сварных конструкций газонефтехимического
оборудования»

(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Дуговая сварка в среде повышенного давления изделий атомной
техники из сплава циркония

Студент

Н.Ю. Нуждов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

д.т.н., доцент В.В. Ельцов

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

Тольятти 2021

Содержание

1 Анализ исходных данных и известных решений.....	7
1.1 Физические и химические свойства материала	7
1.2 Описание конструкции изделий и условий эксплуатации	9
1.3 Сварка циркония	12
1.4 Защита сварного соединения при сварке циркония	22
1.5 Дефекты, возникающие при сварке циркониевых сплавов	24
2 Технологическая часть	27
2.1 Описание установки сварки под давлением	27
2.2 Ключевые моменты при сварке в среде повышенного давления	33
2.3 Описание системы центровки электрода.....	34
2.4 Описание сварки кольцевых швов дуговой сваркой неплавящимся электродом	36
2.5 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	39
2.6 Техника безопасности и организация рабочего места	42
3 Экспериментальная часть.....	48
3.1 Общие сведения об экспериментальном образце.....	48
3.2 Исследование характеристик.....	49
3.3 Подготовка под сварку	57
3.4 Сварка.....	58
3.5 Контроль качества сварных соединений	60
3.5.1 Требования к сварным соединениям	60
3.5.2 Проведение контроля качества.....	61
Заключение	68
Список используемых источников.....	70

Введение

Использование тугоплавких материалов широко распространено во многих отраслях промышленности для производства продукции различного характера, например в ракетной и реактивной технике используются лопатки турбин изготовленных из жаропрочной стали, в атомной промышленности тугоплавкие сплавы используются для производства оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), изделий радиоизотопной продукции и т.д.

В АО «ГНЦ НИИАР» производство такой продукции выполняется на протяжении более трёх десятков лет. Спектр производимых изделий обширен. Например, источники ионизирующего излучения на основе различных изотопов, применяются при лечении онкологических заболеваний разной тяжести, так же они применяются и в технике, ярким примером является применение в радиационной дефектоскопии в переносном гамма-дефектоскопе типа Гаммарид 192/120.

Так же институтом регулярно заключаются контракты со сторонними организациями, например, такими как АО «Наука и инновации», АО «ВНИИНМ» и др., по разработке методик реакторных испытаний и исследований перспективных конструкционных материалов. Технология производства изделий по договорам, из различных сплавов, предусматривает выполнение бездефектной сварки комплектующих изделий на производственных мощностях института.

Все исследования, изложенные в данной диссертации, проведены на базе АО «ГНЦ НИИАР» в службе главного сварщика. Службой выполняются все ключевые работы по сварке изделий, она была создана для выполнения и организации технологических, исследовательских, надзорных и ремонтных работ в вопросах сварки, при изготовлении различных изделий, по основным направлениям деятельности института.

Служба осуществляет методическое руководство, надзор и контроль над работами, выполняемыми в области сварки в подразделениях института. СГС занимается разработкой и внедрением стандартов по сварке на предприятии, участвует в научно-исследовательских работах в области сварки, оказывает методическую и консультационную поддержку, проводит аттестацию сварщиков, специалистов, оборудования и технологий, осуществляет контроль за состоянием сварочного производства в институте. При столь разнообразном производстве в НИИАРе наличие службы главного сварщика значительно упрощает работу на местах. СГС взаимодействует с подразделениями в вопросах сварки через назначенных и аттестованных специалистов - ответственных за выполнение сварочных работ (рисунок 1).

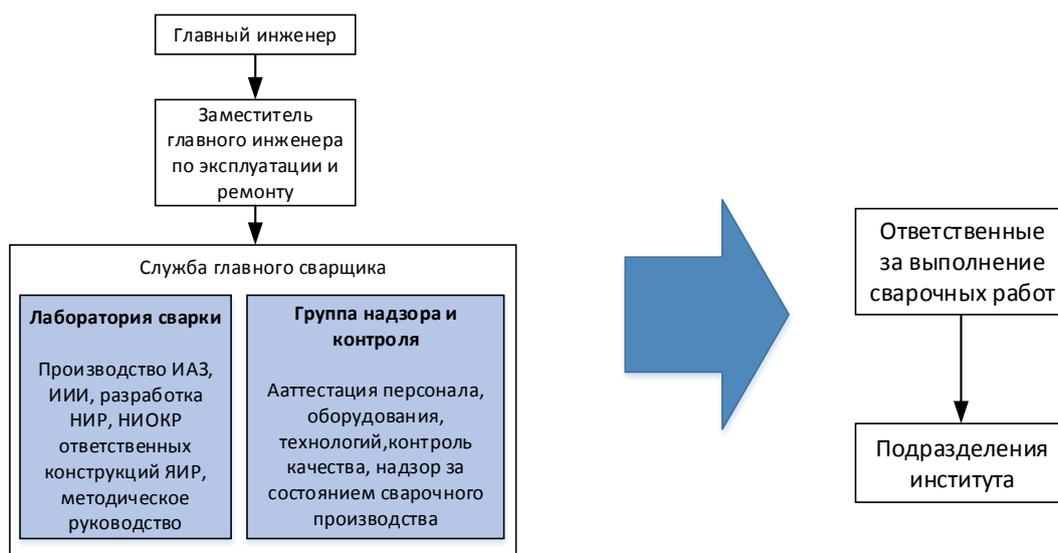


Рисунок 1 – Схема организационной структуры сварочного производства в АО «ГНЦ НИИАР»

К сварным соединениям изделий атомной промышленности предъявляются особые повышенные требования по прочности, коррозионной стойкости и жаростойкости из-за высокой вероятности возникновения чрезвычайных ситуаций, так как изделия активной зоны ядерного реактора являются наиболее ответственными и самыми напряженными конструкциями. Генерируемая, в них, за счет расщепления ядер делящихся

нуклидов тепловая энергия отводится теплоносителем. Изделия активной зоны ядерного реактора считаются работоспособными, если в течение всего времени эксплуатации не была потеряна герметичность конструкции, а так же не возникло значительных изменений в его геометрических размерах, которые приводят к нарушению гидравлических характеристик тепловыделяющей сборки, в которой он находится.

Перед производством изделий активной зоны ядерного реактора требуется провести испытание материала на длительную прочность и ползучесть при облучении, поэтому внутриреакторные испытания проводятся в материаловедческих сборках реактора на специальных экспериментальных газонаполненных образцах. Так же на данных изделиях проводятся внереакторные исследования, например, проверка влияния термообработки на свойства материала, исследования на стойкость к МКК и т.д.

Для производства такой продукции применяется широкий спектр сплавов, например сплавы алюминия, различные феррито-мартенситные стали, сплавы титана, в том числе и различные тугоплавкие металлы, ярким примером которых являются сплавы на основе циркония [15].

На сегодняшний день проблема сварки изделий из циркониевых сплавов является актуальной, так как сплавы на его основе являются весьма перспективными для конструкций изделий, которые применяются в атомной энергетике, так как они в малой степени поглощают медленные нейтроны, что является весомым преимуществом для отрасли. Однако при герметизации подобных малогабаритных тонкостенных изделий с малым замкнутым внутренним объемом аргонодуговой сваркой не всегда обеспечивается требуемое качество сварных соединений, к примеру, на сварном соединении возникают трещины, свищи, нарушается геометрическая форма шва или образуются дефекты в виде газовой полости в торцевом шве.

Исследований на тему сварки тугоплавких материалов великое множество. Однако широкое распространение из всех перечисленных элементов получили все элементы кроме циркония, из-за его высокого

сродства ко всем химически активным газам. До недавнего времени цирконий считался весьма хрупким металлом, однако оказалось возможным изготавливать его более пластичным добавляя в состав сплава легирующие элементы, например ниобий. Чем выше наличие кислорода, азота, углерода, водорода и железа в составе сплава, тем менее он пластичный, но более твердый. Поэтому сварка в среде инертных газов позволяет сваривать данный металл.

«Эксплуатационная надежность ампул во многом определяется качеством выполненных сварных соединений. Она прямым образом связана со свариваемостью используемых конструкционных материалов, с конструкцией соединений, технологическими процессами их выполнения и изменяемостью свойств, при эксплуатации под влиянием температуры, потока нейтронов, напряжений, среды (теплоносителя и внутри ампульной). Главная задача герметизации - сохранить герметичность изделия в течение всего срока эксплуатации» [24, с.5].

Газонаполненные образцы, по требованию заказчиков и конструкторов, заполняются инертным газом – гелием. Давление, создаваемое внутри изделий, варьируется, как правило, от 0,1 МПа до 15 МПа, однако бывают заказы, в которых требуется создать и большее давление.

Заполнение внутреннего объема газа производится через капилляр, который выполнен в одной из заглушек изделия, после чего он герметизируется торцевым швом. В данный момент существует проблема, связанная с возникновением дефектов в сварном соединении.

Таким образом, можно сформулировать цель данной работы. Целью данной магистерской диссертации является повышение стабильности качественного выполнения сварных соединений изделий используемых в атомной технике выполненных из циркония и его сплавов в среде повышенного давления инертных газов.

1 Анализ исходных данных и известных решений

1.1 Физические и химические свойства материала

В современной науке и технике все шире применяются конструкционные материалы, обладающие высокой прочностью, жаропрочностью и повышенной коррозионной стойкостью. Из многообразия конструкционных материалов применяемых в атомной промышленности, только бериллий, магний, алюминий и цирконий являются металлическими элементами, обладающими рядом свойств, (минимальным сечением захвата нейтронов, небольшой активацией и др.) при которых накоплению изотопов проводится в оптимальном режиме. Из вышеперечисленных материалов только цирконий имеет высокую температуру плавления, достаточно высокую механическую прочность при повышенных температурах, хорошую стойкость в воде и паре, а так же приемлемую стоимость и распространенность. Рассматриваемые сплавы несколько уступают по некоторым механическим свойствам, традиционно используемым в этих целях нержавеющей сталям. Но благодаря благоприятным физическим свойствам и достаточной прочности сплавов циркония, с учетом непродолжительного времени облучения, их применение приносит наибольшую эффективность.

Основными требованиями, предъявляемыми к сварным конструкциям, работающим в условиях активной зоны атомного реактора, являются:

- коррозионная стойкость;
- механическая прочность;
- пластичность;
- формирование сварного шва без дефектов в виде подрезов, пор, раковин, трещин и другие.

Среди других металлов цирконий выделяется весьма малым поперечным сечением захвата тепловых нейтронов (0,18) и высокой

стойкостью при облучении. Эти качества в сочетании с высокой коррозионной стойкостью в воде и перегретом паре обусловили его применение в качестве конструкционного материала в ядерных энергетических установках (ЯЭУ). Цирконий обладает удовлетворительной технологичностью, по химическим свойствам и свариваемости является аналогом титана. Для малолегированных циркониевых сплавов, которым является сплав Э110 (сплав циркония (Zr) с 1% ниобия (Nb)) одна из основных проблем сварки связана с предотвращением контакта металла нагретого выше 350-400°C, с атмосферой воздуха. Он более чувствителен к примесям внедрения (O_2 , N_2 , H_2 , C), которые в большей степени ухудшают пластичность и вязкость сварных швов и резко снижают их коррозионную стойкость (особенно N_2 , O_2). Вместе с тем сварные соединения данных сплавов практически не склонны к образованию трещин. Другим недостатком, является повышенная пористость в литой зоне сварного соединения, в результате взаимодействия зоны плавильного объема сварочной ванны с водородом и азотом атмосферы воздуха [24].

Среди реализованных задач и достижений в области циркониевой металлургии и металловедения циркония можно выделить создание технологий производства прецизионных реакторных и конструкционных материалов на основе циркония для оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) действующих и разрабатываемых реакторов атомных электростанций, что позволяет увеличить срок службы и повысить безопасность атомных электростанций. Разработанные, в настоящее время, физические основы модификации поверхности циркониевых сплавов, позволяют решить ряд множества прикладных задач [20].

Температура плавления чистого циркония составляет 1855°C. Его плотность составляет $6,5 \cdot 10^3$ кг/м³. При температуре 600-700°C цирконий активно взаимодействует с кислородом и азотом, образуя сплавы ZrO_2 и ZrN , характеризующиеся тугоплавкостью и высокой твердостью. При 300-1000°C цирконий быстро адсорбирует водород, при этом он становится хрупким, более твердым, его магнитная восприимчивость при насыщении водородом –

снижается. При 1200-1300°C в условиях высокого вакуума водород может быть удален. При реакции с углекислым газом образуются оксиды и карбиды циркония, при реакции с парами воды при температуре около 300°C – оксиды и гидриды [15].

Сам по себе цирконий в чистом виде обладает не только высокой коррозионной стойкостью в серной, соляной и азотной кислотах при температуре до 100°C, но и так же обладает ею в растворах щелочей и аммиака.

Основные физические свойства циркония, которыми необходимо руководствоваться при исследованиях свариваемости материала, приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Физические свойства циркония

Атомная масса, М	91,224±0,02
Температура плавления, Т	2125К
Температура кипения, Т	4650К
Поверхностное натяжение при Т плавления	1,48 Дж/м ²
Коэффициент электронной теплопроводности	2,772-2,798 мДж/мольК ²
Предел текучести	0,074-0,090 ГПа
Удельная теплоемкость θ	291К
Кристаллическая решетка α-Zr β-Zr	ГПУ ОЦК

1.2 Описание конструкции изделий и условий эксплуатации

Многие изделия активной зоны ядерных реакторов представляют собой герметичные цельносварные конструкции, во внутренней полости которых находится инертный газ. При дуговой сварке изделий атомной промышленности самыми используемыми являются следующие виды сварных соединений (рисунок 2):

- Торцевое соединение (а);
- Стыковое соединение (б);
- Стыкозамковое соединение (в);
- Нахлесточное соединение (г);
- Торцевое (бортовое) соединение (д).

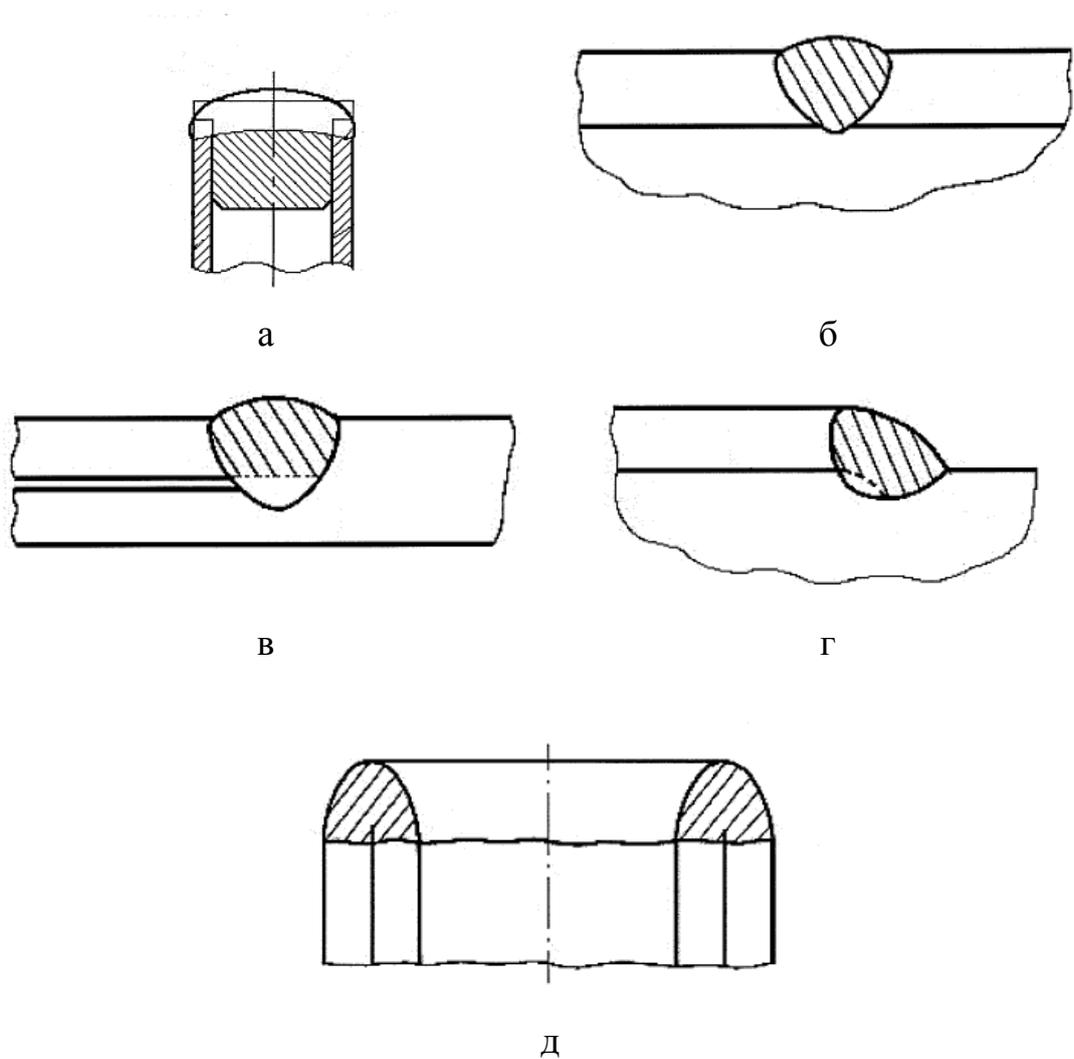


Рисунок 2 - Виды сварных соединений

Специфика производства изделий выполненных торцевым швом заключается в обязательном наличии под их оболочкой нормального или избыточного (до 3МПа) давления инертного газа, как правило – гелия. Гелий используется по нескольким причинам. Без дополнительного поддува аргона

невозможно получить качественные сварные соединения из сплава циркония, поэтому использование гелия является оптимальным вариантом повышения качества сварных соединений. Так же гелий, находящийся внутри изделия, является отличным теплоносителем. Он позволяет получить сварное соединение с большей проплавающей способностью, чем при сварке в среде аргона, так же форма шва при сварке получается более равномерная.

Использование инертных газов при сварке как кольцевых, так и торцевых швов, необходимо для различных целей, например для обеспечения устойчивости оболочки, упрощения процесса контроля герметичности изделий, улучшения теплопередачи от «стартового» продукта к оболочке, а так же защиты «стартового» продукта, расположенного внутри изделия, от окисления в результате его разогрева под действием облучения. Не менее важным является тот факт, что для изделий исследовательских реакторов применяется более широкий диапазон конструкционных материалов, чем для изделий для гражданского применения. В связи с этим особые требования предъявляются к процессу герметизации изделий, как завершающего этапа в технологии изготовления данных изделий. При этом должно быть обеспечено их стабильное качество, играющее немаловажную роль в их дальнейшей безопасной эксплуатации. Под качеством самого изделия и сварных соединений, в данном случае, понимается их строгое и полное соответствие определенным нормативно-техническим требованиям (ГОСТам, ОСТам, ТУ и другим стандартам) и требованиям, заложенным в конструкторской документации. Вид недопустимых и допустимых дефектов сварного шва, характер их размещения в его объеме для изделий активной зоны реактора изложены в ОСТ 95 503-2016 «Соединения сварные и паяные для изделий активных зон ядерных реакторов. Общие технические требования.».

Геометрические размеры большинства выпускаемых изделий предназначенных для исследовательских реакторов, как правило, варьируются в диапазоне диаметров от 1 мм до 16 мм, а толщина их стенок в диапазоне от 0,1 мм до 1 мм, однако и бывают изделия с большим диаметром и толщиной

стенки. Типовые изделия, производимые на производственной базе института, приведены на рисунке 3.

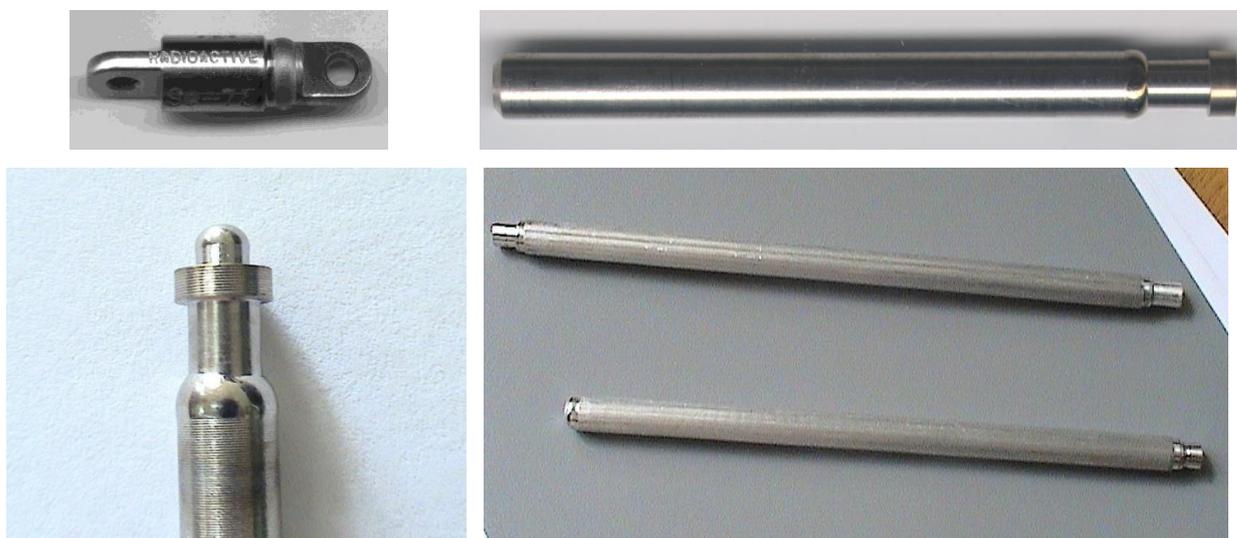


Рисунок 3 - Изделия производимые институтом

Изделия, погружаемые в активную зону реактора, работают в тяжелейших условиях. Температура в центре топливного сердечника достигает отметки в 2000°C , при этом на само изделие воздействует коррозионное и радиационное воздействие, температура внутри оболочки варьируется от 300 до 710°C в зависимости от типа реактора [26].

Радиационное воздействие на циркониевые сплавы значительно и включает целый ряд обратимых и необратимых процессов. Основные эффекты при эксплуатации циркониевых изделий это – радиационный рост и радиационная ползучесть, обусловленных анизотропией [20].

1.3 Сварка циркония

Сварка изделий из циркония и его сплавов в известной степени освоена промышленностью и при этом реализуется преимущественно автоматическим способом. Это объясняется с одной стороны тем, что

предпочтительнее выполнять сварку в контролируемой атмосфере (в камере), где производство ручной сварки затруднено. С другой, – к качеству сварных соединений из циркония предъявляются, как правило, весьма высокие требования, которые в условиях производства стабильно могут быть обеспечены лишь автоматической сваркой. При выборе способа сварки химически активных металлов обычно исходят из возможности обеспечения надежной защиты сварного соединения от атмосферных газов [13].

«Известно, что для герметизации оболочечных конструкций изделий активных зон атомных реакторов используют различные способы сварки: плавлением – дуговую неплавящимся электродом в среде инертных газов (СНЭ); лазерным (ЛС) и электронным лучами (ЭЛС); контактную – точечную (КТС); контактно-стыковую (КСС), магнитно-импульсную (МИС); диффузионную (ДС) в твердой фазе; а также пайку высокотемпературными припоями» [10, с.37].

Наиболее часто подлежит сварке цирконий легированный 2-3% ниобия, но использование данного сплава ограничено оборудованием, работающим под давлением (таблица 2).

Таблица 2 – Химический состав часто используемых циркониевых сплавов

Наименование сплава	Массовая доля легирующего элемента, %			
	Nb	Sn	Fe	O
Э110	0,90-1,10	-	< 0,05	< 0,099
Э635	0,90-1,10	1,10-1,30	0,30-0,40	0,05-0,12

Ниобий повышает коррозионную стойкость циркония в воде и перегретом паре до 450-500°C. В системе цирконий – ниобий имеются три группы сплавов с большой коррозионной стойкостью в перегретом паре: а) 0,5-2% Nb, б) 20-30% Nb, в) 80-90% Nb.

Оптимальное количество ниобия, которое обеспечивает повышение коррозионной стойкости зависит от рабочей температуры, для температуры 500°C содержания ниобия составляет 1%. Так например ниобий устраняет вредное влияние углерода на коррозионную стойкость циркония. Из легирующих элементов наибольший интерес представляет ниобий который отличается сравнительно малым поперечным сечением поглощения тепловых нейтронов [22].

Фазовые превращения в циркониевом сплаве Zr-1%Nb, сходны с происходящими в титане и его сплавах. В цирконии при 862°C происходит полиморфное превращение. При быстром охлаждении которое присуще процессу сварки, превращения осуществляются по бездиффузионному механизму. В циркониевом сплаве при быстром охлаждении также происходит мартенситное превращение, образуются две мартенситные фазы: гексагональная α' и ромбическая α'' . Как и в титановых сплавах, переход от α' -фазы к фазе α'' сопровождается существенным понижением твердости и прочности. При температурах выше (500-525°C) из метастабильного β -твердого раствора выделяется α -фаза и распад продолжается до тех пор, пока β -фаза не примет равновесный состав. При более низких температурах в β -фазе в начале образуется ω -состояние. Спустя некоторое время метастабильная ω -фаза сменяется равновесной α -фазой. Таким образом последовательность процессов при распаде метастабильной β -фазы ниже 500-525°C можно описать схемой $\beta_0 \rightarrow \beta_{II} + \omega \rightarrow \beta_{II} + \omega + \alpha \rightarrow \beta_R + \alpha$ где β_0 , β_{II} , β_R - β -фаза исходного, промежуточного и равновесного состава.

«Сплавы Э110 и Э635 нашли применение в состоянии, близком к рекристаллизованному. В исходном состоянии это обеспечивает их более высокую пластичность. В результате легирования ниобием они поглощают существенно меньше количество водорода, что выгодно отличает их от сплавов типа циркалой. Сплавы Э110 и Э635 обладают высоким

сопротивлением коррозии при эксплуатации в воде под давлением, из-за образования на поверхности изделий тонких оксидных плёнок» [10, с.38].

«Цирконий весьма близок по свариваемости к титану, поэтому для него приемлема та же технология и техника, что и для титана. Однако цирконий более чувствителен к примесям-газам, а так же к углероду, который не только в большей степени ухудшает пластичность и вязкость сварного шва, но и резко снижают коррозионную стойкость соединений циркония, оказывают углерод и азот, поэтому их содержание ограничивают до следующих количеств: N₂-0,003; C – 0,03» [14, с.16].

Фазовые превращения в цирконии и диаграммы состояния с легирующими элементами схожи с превращениями для титана. Цирконий имеет две аллотропические модификации (низкотемпературную α -модификацию и высокотемпературную β -модификацию. По влиянию на полиморфизм циркония все легирующие элементы можно разбить на α (Sn, Hf)-и β (Fe, Cr, Mo, Nb)-стабилизаторы, структуру циркониевых сплавов можно разделить на α -, $\alpha+\beta$ -и β -сплавы. Структура сплавов первого класса представлена α -фазой или α -фазой с интерметаллидами; сплавы второго класса к ним относятся сплав Э110 имеют структуру, представленную α - и β -фазами; β -сплавы могут иметь структуру, представленную β -фазой или β -фазой с интерметаллидами.

В циркониевых сплавах, как и в титановых, при быстром охлаждении происходит мартенситное превращение. Образуются две мартенситные фазы – гексагональная α' и ромбическая α'' . Полностью стабилизируют β -фазу лишь ниобий и молибден. В отличии от титана полиморфное $\alpha\leftrightarrow\beta$ превращение циркония происходит со значительным изменением объема. Плотность α -циркония при температуре полиморфного превращения составляет 6,36 г/см³, а β -циркония - 6,40 г/см³ [30]. Диаграмма состояния системы Цирконий-Ниобий (Zr-Nb) приведена на рисунке 4.

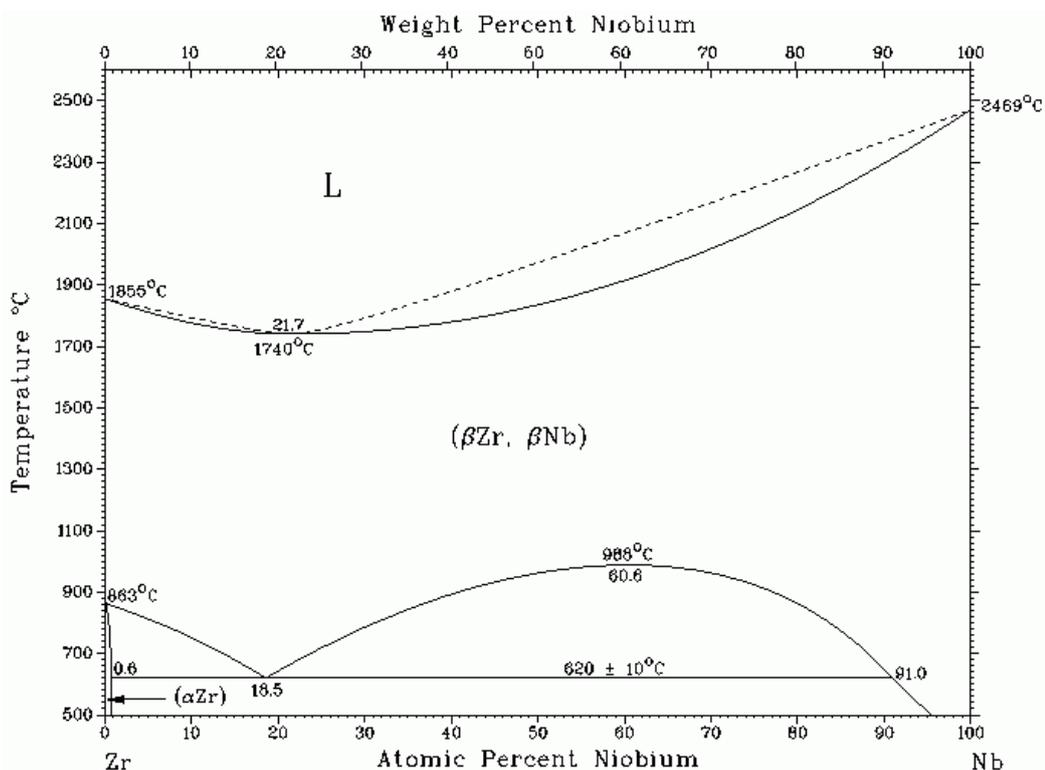


Рисунок 4 - Диаграмма состояний Zr-Nb

Перед сваркой кромки соединяемых изделий подвергают механической обработке с целью уменьшения вероятности насыщения поверхностных слоёв металла водородом. Отсюда следует то, что перед сваркой следует избегать травления кромок, однако в отдельных случаях изделия подвергают химическому травлению в водном растворе (45% HNO₃, 10% HF, остальное H₂O), приведено в работах [1],[17]. Данный вид химического травления позволяет избавиться от оксидных плёнок на поверхности металла, которые могут оказаться в сварном соединении, образуя дефекты.

В настоящее время для соединения циркония и его сплавов, а так же создания в нём внутреннего давления, наиболее широкое применение в машиностроении нашла лазерная импульсная сварка, контактно-стыковая сварка и сварка неплавящимся (TIG) электродами в инертных газах – аргоне, гелии и их смесях [30]. При сварке изделий из циркония, в зависимости от их размеров и конфигурации, применяются метод защиты зоны сварного

соединения в камере с контролируемой атмосферой. Применение таких камер обеспечивает наиболее надёжную и стабильную защиту зоны сварки.

Своё распространение на территории СССР лазерная сварка получила в начале 1970-ых годов. Ими являлись установки КВАНТ-10 и КВАНТ-12, но самыми распространёнными оказались установки КВАНТ-15 (рисунок 5). В наше время производством установок для лазерной сварки на территории России занимаются множество конструкторских бюро, но отдельно можно выделить установки производства «ОКБ Булат», расположенных в городе Зеленограде. Оборудование их производства отличается высоким качеством и простотой в работе, относительно установок других производителей. Так же технологический центр при ОКБ позволяет проектировать оборудование под индивидуальные требования заказчика.



Рисунок 5 - Установка импульсной лазерной сварки КВАНТ-15

Лазерная сварка с каждым годом получает всё большее развитие и расширяет свою область применения, так как данный способ позволяет проводить сварку особо малых и тонкостенных изделий [31]. Скорость процесса сварки в разы выше, чем при других способах. По сравнению с

вышеперечисленными способами лазерная сварка обладает следующими преимуществами:

- Малая зона термического влияния;
- Локальность воздействия позволяет выполнять сварку в непосредственной близости от термочувствительных элементов;
- Отсутствие вредных припоев и флюсов;
- Возможность использования гибких световодов позволяет выполнять сварку в труднодоступных местах;
- Малая длительность лазерного сварочного импульса способствует предотвращению возникновения нежелательных структурных изменений, которые способны изменить свойства сварного соединения [12].

За рубежом лазерная сварка используется при заполнении гелием твэлов и других изделий атомной техники. Суть процесса заключается в «прожигании» лазером тела изделия, заполнении гелием под давлением, а потом герметизации полученного отверстия. Все операции осуществляют на одной установке, которая позволяет обслуживать сразу несколько постов заполнения гелием.

К недостаткам данного способа можно отнести высокую стоимость оборудования для лазерной сварки, которая обусловлена технологичностью и сложностью оборудования. Энергетическая эффективность данного метода невысока из-за КПД установки, который редко превышает 10-15%. Персонал, выполняющий работы и обслуживающий установку, должен обладать высоким уровнем знаний и квалификации [4]. Так же данный способ приемлем только к материалам, которые мало склонны к образованию трещин при сварке, например, сварка аустенитных сталей, которые не обладают стойкостью к образованию горячих трещин, является проблематичной. При сварке циркониевых сплавов трещины, как правило, не наблюдаются.

Таким образом, не смотря на то, что лазерная импульсная сварка обеспечивает существенное увеличение производительности, ее широкое применение в нашем случае сдерживается из-за сложностей в реализации данного способа в условиях дистанционной защитной камеры.

«Контактно-стыковая сварка широко применяется в атомной промышленности при изготовлении циркониевых твэлов. Данный способ обеспечивает возможность сварки в вакуумной или заполненной газом требуемого состава и давления, микрокамере. Это позволяет исключить воздействие нагретого металла с атмосферой и обеспечить необходимую атмосферу внутри изделия» [9, с.36].

Преимуществами данного способа можно обозначить высокую производительность процесса, малый расход вспомогательных материалов, а так же высокое качество и надёжность сварных соединений [26].

Положительной особенностью данного способа является тот факт, что при его применении исключается расплавление металла оболочки и заглушки. При этом, «в результате динамической рекристаллизации в месте соединения образуется мелкозернистая структура. Протяженность зона термического влияния – в 4-10 раз меньше, чем при сварке плавлением. При этом полностью исключаются дефекты металлургического происхождения: поры, трещины, шлаковые включения» [26, с.9].

Однако, данный способ не лишён недостатков, так, например, проведение неразрушающего контроля качества сварных соединений является невозможным в современных реалиях [31]. Выявить дефекты сварного соединения ультразвуком или магнитным полем является сложным процессом, поэтому единственным вариантом является проведение разрушающего контроля. Получить давление газа внутри изделия, соответствующее КД, является проблематичной задачей из-за особенностей способа. Стоимость оборудования для контактно-стыковой сварки, так же как и в случае с лазерной сваркой, высока. Поэтому использование данной

технологии сварки сдерживается соображениями технического и экономического характера.

Сварка неплавящимся электродом в среде инертных газов является универсальным и широко распространённым способом, как при сварке особо ответственных изделий активных зон ядерных реакторов, так и при сварке обычных изделий, к которым не предъявляются повышенные требования к качеству сварных соединений. Данный способ обладает низкой стоимостью оборудования в сравнении с ранее перечисленными способами. По опыту ранее проведённых работ на предприятии выявлено, что преимуществами данного способа является возможность использования несложного и надежного оборудования с выполнением оперативного контроля параметров процесса. Такой способ в случае необходимости легко реализуется при работе в дистанционных условиях радиационно-защитных камер и боксов, приведено в работах [10], [25].

В настоящее время способ сварки неплавящимся электродом применяется и при сварке в среде повышенного давления. Используется данный способ, в основном, при герметизации изделий активных зон ядерных реакторов, однако японские коллеги используют данный способ при сварке под толщей воды[6].

При дуговой сварке плавлением в камерах с контролируемой атмосферой инертных газов создаётся предварительный вакуум в 0,04 Па. После вакуумирования в камеру напускается защитный газ, в качестве которого используется как аргон так и гелий. Так же на некоторых производствах с целью уменьшения дорогостоящего гелия используют смеси этих двух газов, к примеру, самая распространённая смесь из 27% Ar и 73% He [14].

Способ дуговой сварки неплавящимся электродом является наиболее предпочтительным при герметизации неплавящимся электродом ввиду его преимуществ: оперативность контроля параметров процесса сварки, а так же

простота и надёжность оборудования. Узел герметизации при этом можно выполнить в виде торцевого соединения оплавленного стационарной дугой. На рисунке 6 можно увидеть схему, на которой изображена конструкция торцевого сварного соединения, предназначенная для дуговой сварки неплавящимся электродом в среде повышенного давления. Слева показан капилляр до сварки, а справа после.

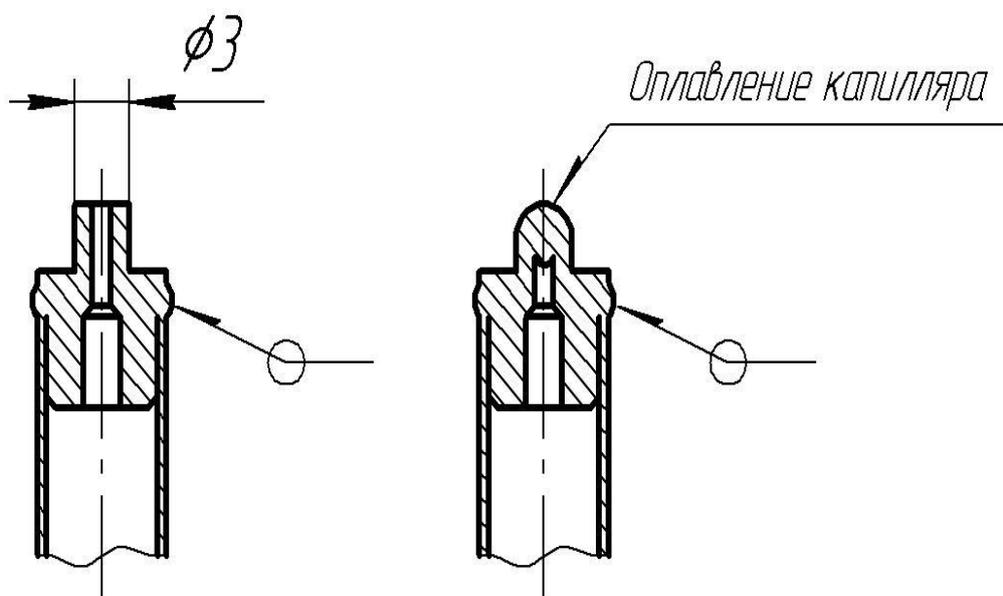


Рисунок 6 - Схема конструкции сварного соединения для дуговой сварки неплавящимся электродом

Сварку тонкостенных изделий рекомендуется осуществлять в медной цанге, которая охлаждает тонкостенную оболочку, снижая вероятность её прожога и перегрева [16]. Цанга плотно фиксирует изделие во вращателе, либо в камере установки сварки без повреждения оболочки за счёт пластичных свойств меди. Дополнительным параметром, напрямую влияющим на качество сварного соединения, является величина вылета изделия из цанги, так как медь, из-за хорошей теплопроводности оказывает значительное влияние на температурные поля в процессе сварки изделия.

При дуговой сварке циркония неплавящимся электродом в инертной среде, сварка изделия должна проводиться на постоянном токе прямой полярности («+» на изделии, а «-» на горелке). В данном случае достигается максимальная глубина проплавления основного металла, что положительно сказывается при прохождении контроля качества сварного соединения.

Режимы сварки кольцевых соединений циркониевых сплавов характеризуются повышенными сварочными токами, поэтому для выбора величины сварочного тока рекомендуется приближённое соотношение: 1А на 0,03 мм провара[14].

1.4 Защита сварного соединения при сварке циркония

Очень важно в процессе сваривания циркония исключить загрязнение металлов примесями внедрения. По этой причине для соединения циркония требуется применять методы электродугового сваривания в среде инертных газов в камерах с контролируемой атмосферой, а также электроннолучевое сваривание.

Для предохранения сварочной ванны от воздействия кислорода и азота воздуха используются различные защитные газы, оттесняются воздух от зоны сварки. В качестве таких газов применяются инертные и активные газы, а также их смеси в различных пропорциях.

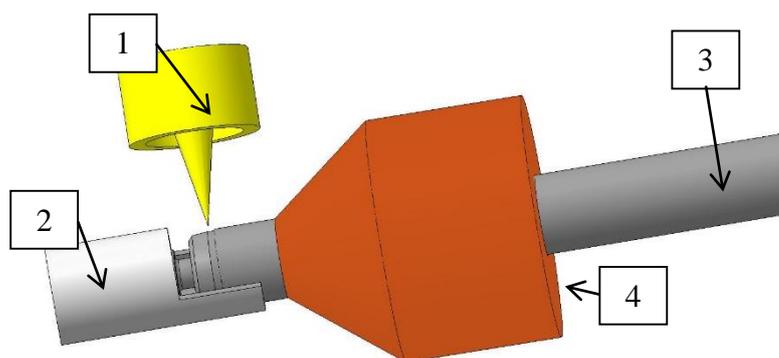
Перед тем как заполнять камеры, газ подвергается очистке от влаги с помощью пропускания его через силикагель марок КСМ и ШСМ, которые соответствуют ГОСТу 3956-54, а также через алюмогель. Помимо этого используются различные методы дополнительной очистки газа от кислорода. Наиболее простым методом является пропускание газа через нагретую титановую стружку или губку, температура которых составляет 900 – 1000 градусов по Цельсию.

Для обеспечения высокой чистоты инертного газа внутри камеры и внутри изделия необходимо выполнить многократный обмен атмосферы путем вакуумирования и заполнения камеры гелием до определённого давления. Для качественного наполнения внутреннего объёма изделия газом, время выдержки на каждом из этапов составляет 5-10 минут.

Основополагающей тенденцией современной техники является снижение процента образования брака на производстве. Для этого, как правило, используются современные материалы и технологии позволяющие снизить вероятность их образования. Использование сверхчистых инертных газов так же является одним из способов.

Для тугоплавких металлов в большинстве случаев отдается предпочтение гелию, потому как гелиеводуговом сваривании эффективная мощность дуги намного больше, чем при сваривании в среде аргона. Помимо этого содержание вредных примесей можно довести при очистке до меньшей величины, чем при очистке аргоном. Для того чтобы избежать загрязнения шва, сваривание производят неплавящимися электродами без использования присадок. В большинстве случаев используются стыковые и нахлесточные соединения без разделки кромок. При сваривании вне камеры необходимо использовать специальные устройства для защиты зоны сваривания, а также остывающих участков шва, околошовной зоны и обратной стороны шва. Однако, использование дополнительного обдува при сварке в среде аргона позволяет его использовать наравне с гелием.

С целью более качественной защиты соединения при выполнении процесса сварки кольцевых швов, со сводного торца изделия надвигается сопло, которое выполняет коаксиальный обдув изделия инертным газом, что позволяет обеспечивать дополнительную защиту металла от окисления (рисунок 7).



1 – Горелка с электродом, 2 – коаксиальный обдув сварного соединения, 3 – изделие, 4 – охлаждающая цанга

Рисунок 7 - Обдув изделия инертным газом при сварке кольцевых швов

1.5 Дефекты, возникающие при сварке циркониевых сплавов

Цирконий, так же как и другие свариваемые материалы, склонен к образованию дефектов, таких как выплески, трещины, цвета побежалости и т.д. Использование технологии сварки в среде повышенного давления, при герметизации капилляра, не избавляет от образования дефектов, а в некоторых случаях наоборот провоцирует их появление.

Трещины, как правило, возникают из-за неподобающей подготовки поверхностей подлежащих сварке. Оксидные плёнки и загрязнения, находящиеся на поверхности свариваемых деталей, попадают в сварочную ванну и при кристаллизации абсорбируются на границах зерен, впоследствии провоцируя трещины в сварных соединениях.

Одним из самых распространённых дефектов при сварке циркониевых сплавов является образование на поверхности свариваемого металла цветов побежалости. Известно, что цвета побежалости возникают из-за интерференции света в тонкой оксидной плёнке, которая появляется на поверхности металла в процессе сварки. По ОСТ 95-503-2016 известно, что

поверхностное окисление (цвета побежалости) у соединений из сплавов циркония, титана и других тугоплавких материалов очень интенсивное, поэтому это не считается дефектом.

Так же распространённым дефектом как при сварке капилляра из циркониевого сплава, так и многих других материалов, является заваливание сварного торцевого шва. В первую очередь это связано с некорректной центровкой электрода над свариваемым капилляром. В случае неверного позиционирования электрода над сварным соединением сварочная дуга начинает проплавливать металл в точке наименьшего электрического сопротивления, которое, как правило, расположено со смещением относительно центра шва, тем самым образуя завал.

При сварке изделия находящегося в подогретом состоянии необходимо регулировать энергозатраты в сварном шве, чтобы не допустить прожога, нарушения геометрии сварного соединения и других дефектов. При аргонодуговой сварке неплавящимся электродом это можно осуществить снижением тока сварки или увеличением её скорости. Увеличение скорости процесса снижает эффект автоподогрева изделия — нагрева сварного соединения от сварочной дуги, что положительно сказывается на формировании сварного соединения [19].

Самым опасным дефектом при герметизации изделий активных зон ядерных реакторов из циркониевого сплава, в среде повышенного давления, является газовый пузырь. Устранить этот дефект возможно повторным импульсом, однако существует риск того, что активное вещество, располагаемое внутри ампулы, может выйти за пределы изделия, что в свою очередь чревато последствиями. Данный дефект вызван нарастанием давления в свободном объеме внутри изделия, которое напрямую зависит от разогрева газа внутри изделия при сварке. Для минимизации вероятности образования подобных дефектов, при выполнении кольцевого шва,

существует несколько приёмов, но наиболее технологичным, для такого диаметра, будет применение сварки на импульсных режимах [23].

Образование пористости в сварных швах, выполненных из циркониевого сплава, связывают с присутствием водорода в соединении. Поры в швах в основном располагаются по границе сплавления с основным металлом. Механизм образования пор связывают с различной степенью растворимости водорода в зависимости от температуры нагрева и от парциального давления водорода в окружающей среде.

Образование пор в металле сварного шва зависит от скорости сварки. При сварке в условиях быстрой кристаллизации металла пузырьки водорода не успевают всплыть на поверхность шва и при затвердевании расплавленного металла образуют в нем поры.

Для повышения стабильности бездефектного выполнения сварных соединений в среде повышенного давления, требуется:

- Провести анализ причин образования дефектов торцевого соединения;
- Выполнить расчёт режимов обеспечивающих стабильное проплавление удовлетворяющее требованиям КД;
- Разработать и отработать технологию сварки.

Выводы по главе

На основании литературного анализа были выделены типовые дефекты, возникающие при сварке изделий из циркониевых сплавов, а так же определены задачи магистерской диссертации, позволяющие добиться поставленной цели.

2 Технологическая часть

2.1 Описание установки сварки под давлением

Универсальность способа сварки неплавящимся электродом в среде газов достигается благодаря успешной автоматизации процесса, простоте осуществления (используется несложное и надежное оборудование), возможности оперативного контроля параметров сварки [26].

Данный способ является разновидностью газодуговой сварки, его особенность заключается в том, что сварку ведут в среде защитного инертного газа – гелия, в результате чего достигается высокая температура дуги – 19600°K [21].

Особенности установки сварки под давлением обусловлены отличием сварки под давлением от дуговой сварки открытой дугой:

- повышенное напряжение на дуге (требуется разработка специального источника питания);
- специальная конструкция сварочной камеры (высокое давление, возможность наблюдения, схема подвода тока);
- необходимость автоматического поддержания заданных режимов сварки (автоматическая выдержка времени, регулируемый ток сварки, регулирование установочной длины дуги).

Основные узлы, которые должна содержать установка:

- газовые коммуникации (сварочная камера, манометр, вакуумметр, баллон с газом, вакуумный насос);
- электрическая часть (силовой трансформатор, выпрямитель, блок регулировки тока, блок управления).

Важным условием получения сварного шва высокого качества является устойчивость процесса сварки. Для этого источник питания дуги должен обеспечить возбуждение и стабильное горение дуги.

Возбуждение дуги в разрабатываемой установке должно происходить контактным способом при отрывании вольфрамового электрода от изделия с одновременным автоматическим включением сварочного источника. Такое возбуждение дуги необходимо по причине невозможности использования стандартных осцилляторов, выдающих недостаточно высокое напряжение и мощность для возбуждения дуги при высоком давлении газа.

Известно, что в ГП НИКИМТ для дуговой сварки твэлов создана установка, позволяющая обеспечить в них остаточное давление до 4 МПа. По данным в МВТУ им. Н.Э. Баумана созданы две автоматические установки для СНЭ – ВУАС-1 и КЗ-11 [21]. Данные установки имеют различие в объеме камерами для герметизации изделий. В установке с большой камерой деталь перемещается, а сварочная головка остается неподвижной; в установке с малой камерой – наоборот. Общий вид установки сварки под давлением можно увидеть на рисунке 8. Под номером 1, на рисунке, указан источник питания установки, под номером 2, установка сварки, под номером 3 газовый баллон, в котором находится газ, подаваемый в сварочную камеру.

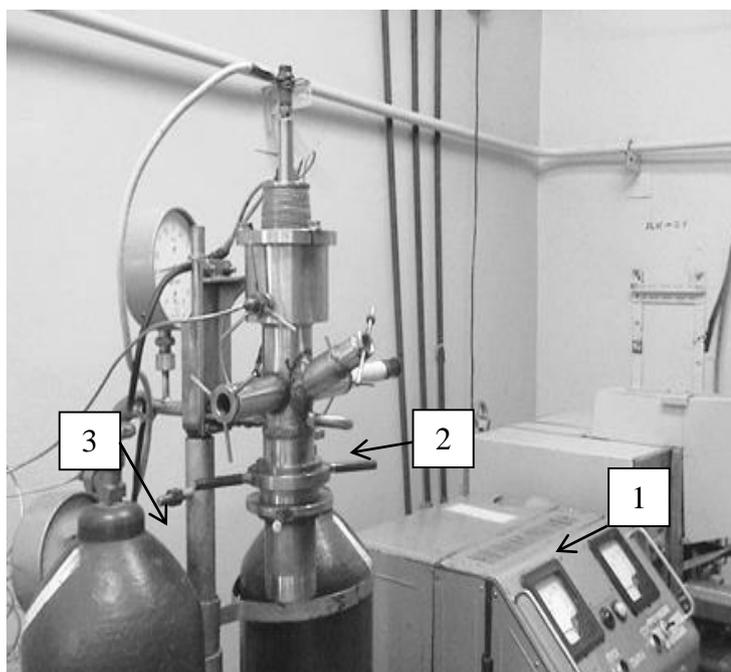


Рисунок 8 - Общий вид установки сварки под давлением

Поскольку для ионизации дугового промежутка при высоком давлении инертного газа осциллятор должен иметь напряжение и мощность существенно выше типовых значений, проблема затрудненного возбуждения дуги была решена применением на данной установке принципа контактного возбуждения дуги [28]. Отрыв вольфрамового электрода от изделия обеспечивается электромагнитом. В результате кратковременного (до ~ 0,01 сек) нахождения электрода в контакте с образцом в момент возбуждения дуги обеспечивается нормальное протекание термоэмиссионного процесса, возникающего в результате разогрева электрода в режиме короткого замыкания, что позволяет стабилизировать возбуждение дуги. Выбранная для герметизации конструкция сварного соединения обеспечивает контакт внутренней поверхности капилляра по образующей конуса заточки вольфрамового электрода. Таким образом, исключается возможность скола концевой части электрода и его попадание в сварочную ванну.

Практически у всех серийно выпускаемых сварочных источников, напряжение холостого хода ограничено 60-70 В. Для данной установки, с целью обеспечения стабильного возбуждения и горения дуги был разработан специальный источник постоянного тока, имеющий напряжение холостого хода равное 220 В. Высокое напряжение холостого хода источника питания принято с условием изоляции токоведущих частей установки и автоматического ведения процесса сварки. Получение круто падающей вольт-амперной характеристики источника обеспечивается токоограничивающим проволочным реостатом. Для сварки изделий при давлении, превышающем давление в баллоне (>15 МПа), использовали ресивер с нагревателем. При сварке длинномерных образцов уплотнение происходит по оболочке самого изделия. Для точной установки длины дуги подвижный шток с электродом устанавливается на основании неподвижной половины камеры.

Преимуществами данного способа сварки можно назвать возможности использования несложной и надёжной оснастки, а так же возможность

выполнения оперативного контроля параметров процесса. Так же технология сварки в установке сварки под давлением гарантирует невозможность попадания воздуха и кислородосодержащих сред в сварочную камеру, что в свою очередь защищает сварное соединение от образования оксидов циркония, что приводит к появлению пор и трещин.

Схема установки сварки под давлением приведена на рисунке 9.

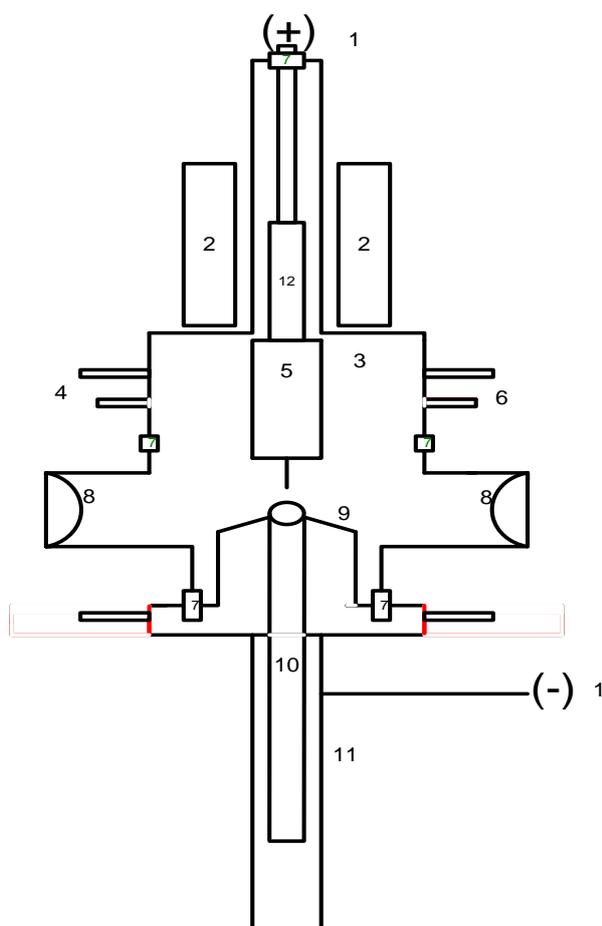


Рисунок 9 - Схема установки сварки под давлением

Состоит она из: токопровода (1), электромагнита (2), камеры сварки (3), патрубка вакуумирования и опрессовки камеры сварки (4), цанги с электродом (5), патрубка сброса (6), уплотнителя (7), смотровых тубусов (8), разъёмных цанг (10), съёмного цангодержателя (11) и сердечника электромагнита (12).

Изделие зажимается в разъёмной цанге-холодильнике, которая в свою очередь помещается в цангодержателе. После установки изделия электрод опускается с помощью электромагнита и центруется так, чтобы электрод располагался строго посередине капилляра. Зазор между электродом и капилляром выставляется с помощью специального калибра.

Принципиальная блок схема установки сварки под давлением изображена на рисунке 10.

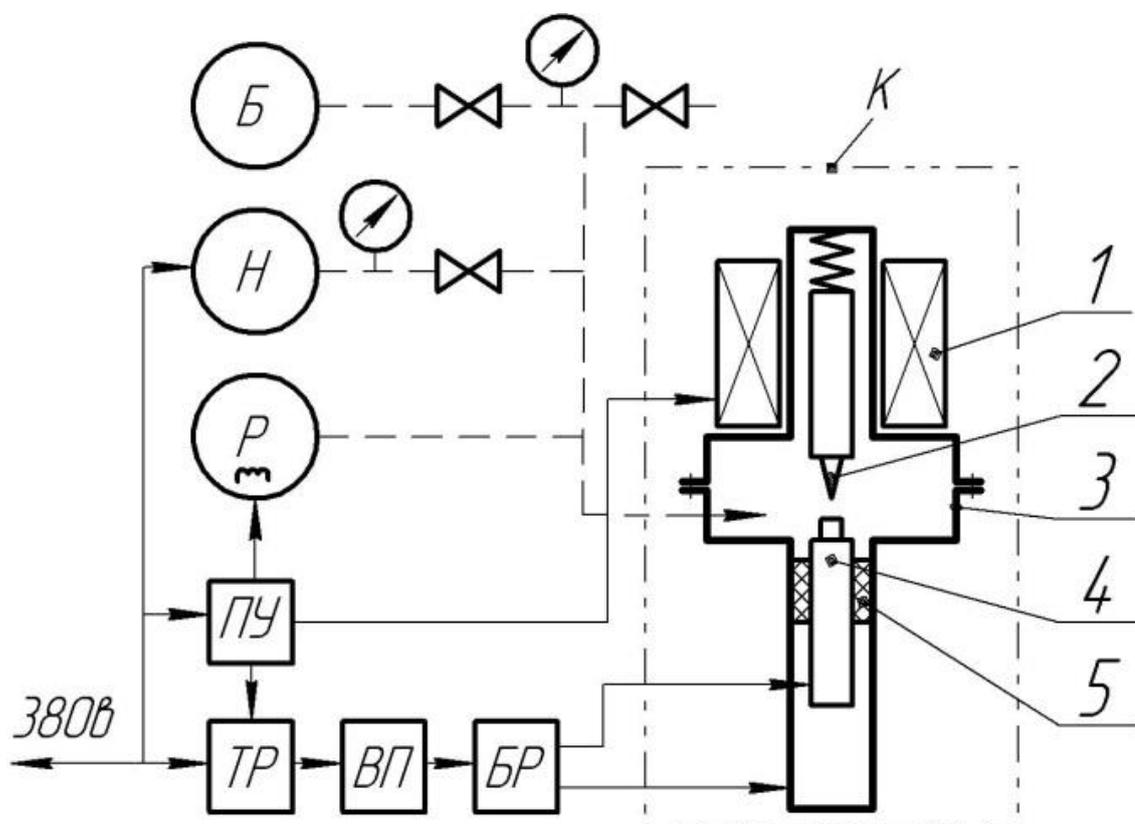


Рисунок 10 - Принципиальная блок-схема установки сварки под давлением (——— электрические цепи, - - - газовые коммуникации)

Условные обозначения на рисунке: ПУ – пульт управления; ТР – трансформатор сварочный; ВП – выпрямитель; БР – балластный реостат; Р – ресивер; Н – насос вакуумный; Б – баллон с газом; К – камера сварочная; 1 – электромагнит контактного возбуждения дуги; 2 – подвижный шток с

электродом; 3 – разъемный корпус камеры; 4 – герметизируемая оболочка; 5 – изолятор.

Установка имеет две герметичные сварочные камеры. Одна камера служит для сварки образцов длиной до 200 мм, другая камера позволяет установить длинные изделия с уплотнением по их оболочке.

Для сварки изделий при давлении, превышающем давление в баллоне (>15 МПа), используется ресивер с нагревателем. Контроль за устанавливаемым в камере сварки давлением осуществляли по образцовому манометру МТИ-100 производства группы «Элемер», который способен показать давление до 16 МПа (рисунок 11).



Рисунок 11 - Манометр «Элемер» МТИ-100/М2

Газовые коммуникации установки сварки под давлением изображены на рисунке 12.

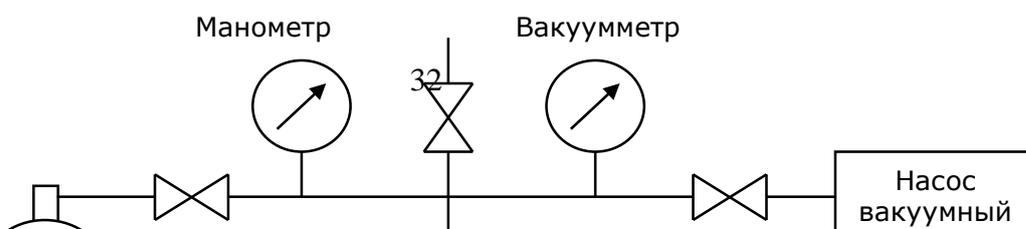


Рисунок 12 - Газовые коммуникации установки

2.2 Ключевые моменты при сварке в среде повышенного давления

Известно то, что ранее проводились исследования по изучению возможности сварки при повышенном давлении инертного газа вплоть до 8-10 МПа, приведено в работах [11], [27], [28]. Были созданы экспериментальные установки, позволяющие проводить герметизацию *циркониевых* оболочек до давления 4-10 МПа. Однако отмечалось, что при реализации данного способа сварки сопутствует ряд проблем: повышенная чувствительность процесса сварки к длине дугового промежутка, сложность возбуждения дуги под давлением и отсутствие стабильности горения дуги во время процесса сварки, трудность возбуждения дуги при сварке на малых токах (как частный случай первой проблемы), когда требуется провести сварку соединений малых толщин; отсутствие стабильности результата сварки – нужной геометрии сварного шва, приведено в работах [11], [24], [27], [28].

Известно, что при сварке в гелии удастся получить более высокие скорости сварки, нежели в аргоне [21]. Это подтверждается результатами работы в которой проводились исследования о влиянии гелия на давление сварочной дуги при такой критической скорости сварки, которое обеспечит плавление основного металла – стали, меди. В результате было установлено,

что критическая скорость сварки в гелии значительно выше, чем при сварке в аргоне, приведено в работах [5], [7]. Авторами было установлено, что критическая скорость зависит от наклона электрода, ее максимальное значение было получено при угле в 45° . Давление дуги в гелии значительно ниже, чем в аргоне, и менее чувствительно к углу заточки и наклону электрода.

Известно, что на сосредоточенность дуги, распределение потока энергии, давление дуги и глубину проплавления влияет угол заточки электрода. Для наших целей оптимальным является угол в $25^\circ \dots 30^\circ$, так как данный угол заточки электрода позволяет дуге не терять способность к поджигу при высоком качестве сварки, приведено в работах [29], [32].

Технология герметизации торцевых швов малогабаритных изделий мало отличается друг от друга в зависимости от материала, разница наблюдается только в режимах сварки, среде, в которой выполняется процесс, в вылете изделия из цанги, а так же в величине зазора между электродом и капилляром.

Сварку в защитных газах можно использовать для соединения материалов различной толщины (от десятых долей до десятков миллиметров) Применение защитных газов с различными теплофизическими свойствами и их смесей изменяет тепловую эффективность дуги и условия ввода тепла в свариваемые кромки и расширяет технологические возможности процесса сварки. При сварке в инертных газах повышается стабильность дуги и снижается угар легирующих элементов, что важно при сварке высоколегированных сталей [1].

2.3 Описание системы центровки электрода

Работа на установке сварки под давлением может показаться очень трудоёмкой для неподготовленного сварщика, поэтому перед выполнением операций по сварке требуется провести ликбез для работника, в результате которого им будут усвоены ключевые моменты и нюансы процесса.

Работа на установке должна выполняться в следующей последовательности:

- Установить изделие в цангу;
- Выставить зазор между электродом и изделием;
- Закрыть сварочную камеру;
- Установить реле времени на необходимое время сварки;
- На лицевой панели управления включить тумблер «ПОДСВЕТКА»;
- Проверить ход штока с электродом кратковременно нажав кнопку «ПРОВЕРКА ЭЛЕКТРОДА»;
- Включить вакуумный насос;
- При достижении заданного вакуума закрыть вентиль, насос выключить;
- Произвести напуск инертного газа (аргон, гелий или их смеси) в камеру до необходимого давления;
- Проверить, что сварочная камера отсечена от вакуумного насоса, баллона с газом и напускного вентиля (все вентили закрыты);
- Установить переключатель тока в необходимое положение;
- Включить тумблер «ЭЛЕКТРОД»;
- Провести сварку изделия кратковременно нажав кнопку «ПУСК»;
- После остывания сварочной ванны (3 - 5с) выключить тумблер «ЭЛЕКТРОД»;
- Отключить установку от электросети;
- Выпустить газ из камеры;
- Открыть камеру и извлечь готовое изделие из цанги.

Процесс центровки перед сваркой состоит из следующих действий:

- Установить изделие в цангу и поместить в цангодержатель;
- Установить центратор над изделием;

- Закрывать камеру;
- Через окуляры камеры визуально оценить центровку изделия.
- В случае нарушения центровки электрода вышеперечисленные действия повторяются до полного устранения нарушения.

Очевидно, что данная технология не является совершенной, так как каждый раз при подготовке изделия приходится выполнять центровку, что в свою очередь занимает некоторое время, уменьшая тем самым производительность процесса.

Опираясь на вышесказанное, было разработано и создано устройство центровки, которое позволяет снизить время, затрачиваемое на центровку электрода.

Конструкция нового центратора представляет собой нержавеющей болванку с отверстием, выполненным по центру, которая закрепляется строго над цангодержателем. В теле центратора располагаются координатные болты, которые перемещают направляющую втулку с расположенным в ней электродом. Данное устройство позволяет снизить время, затрачиваемое на подготовительную операцию электрода перед сваркой тем самым увеличив производительность.

2.4 Описание сварки кольцевых швов дуговой сваркой неплавящимся электродом

Сварка кольцевых соединений дуговой сваркой неплавящимся электродом является базовым промышленным процессом. Номенклатура используемых источников питания для сварки, представленных в данный момент на рынке, колоссальная. Стоимость их зависит от максимальной мощности источника и функций реализованных в них.

В службе главного сварщика АО «ГНЦ НИИАР» самыми распространёнными являются источники производства LORCH и KEMPPИ (рисунок 13).



а – Lorch T220 AC/DC ControlPro, б – Kemppi Master-3500 MLS

Рисунок 13 - Сварочные инверторы

Данные источники имеют ряд преимуществ перед инверторами других производителей:

- Невысокая стоимость;
- Мобильность и компактность;
- Наличие импульсного режима сварки;
- Простая регулировка параметров;
- Горячий старт;
- Регулировка времени продувки изделия газом перед и после сварки.

Так же весомым преимуществом для отработки технологий сварки является возможность подключения к сварочным инверторам регистраторов сварочных процессов. Благодаря им возможна фиксация и запись изменений

параметров сварки, которые отслеживаются по осциллограммам, которые сохраняются в памяти регистратора и с помощью специализированного программного обеспечения открываются на персональном компьютере.

Сварочный инвертор в паре с установкой сварки АСТЭ-7 (рисунок 14) позволяет проводить сварку кольцевых швов изделий. Установка оснащена механизмом перемещения сварочной головки, что позволяет осуществлять точное позиционирование электрода над стыком комплектующих частей изделия. Скорость вращения регулируется в полуавтоматическом режиме в пределах от 0,5 до 15 об/мин. Изменение напряжения на двигателе отображается на вольтметре. Расход газа задаётся ротаметром РМ-0.4 ГУЗ.



Рисунок 14 - Установка сварки кольцевых швов

Всё сварочное оборудование, находящееся в службе, в обязательном порядке проходит периодическую и текущую проверки работоспособности по ОСТ 95 877-2011 и СТО 086-198-2017. Периодическую проверку работоспособности осуществляют не реже одного раза в три месяца путем изготовления технологического образца, который подвергается комплексу неразрушающих и разрушающих испытаний. Текущая проверка работоспособности оборудования осуществляется в начале смены, перед

изготовлением продукции, путем сварки и визуального, измерительного контроля сварного шва.

2.5 Анализ опасных и вредных производственных факторов

При эксплуатации установок аргонодуговой сварки обслуживающий персонал может подвергаться воздействию большой группы опасных и вредных факторов, которые могут негативно сказаться на здоровье и дальнейшей жизнедеятельности человека. Наиболее характерными являются следующие факторы.

Ультрафиолетовое излучение (УИ). Источниками УИ является электрическая дуга, вызывает заболевание глаз, которое характеризуется острой болью и слезотечением, данный вид воздействия проходит через 2-3 дня не вызывая никаких последствий. Следует отметить, что при импульсно дуговой сварке интенсивность ультрафиолетового излучения в 2,5 раза ниже, чем при сварке непрерывной дугой, а озона, оксидов азота образуется в 1,5 раза меньше.

Высокое напряжение в электрической цепи источника питания. Электрический ток является вторым опасным фактором, воздействию которого может подвергаться персонал во время работы. Поражающее действие электрического тока зависит от следующих факторов:

- значение и длительность проникания тока через тело человека;
- род и частота тока;

Наиболее опасным является переменный ток с частотой 20...100 Гц. Для предотвращения поражения электрическим током применяются следующие основные методы защиты:

- изоляция, защитное заземление;
- недоступность токоведущих путей;

- использование двойной (рабочей и дополнительной изоляции);
- защитное отключение;
- применение специальных электрозащитных средств;
- организация безопасной эксплуатации.

Шум и вибрация. При аргонодуговой сварке импульсной дугой основным источником шума является вентилятор, охлаждающий трансформатор источника питания ВСВУ-400, это воздействие мало и можно не применять средства защиты от шума и вибрации. При работе установки сварки под давлением – насос и источник питания.

Пульсирующее световое излучение. Излучение возникающее в результате горения импульсной дуги оказывает негативное воздействие на сетчатку глаза, повышает утомляемость и является неблагоприятным фактором импульсной сварки;

Инфракрасное излучение (ИК). Для инфракрасного излучения (ИК) - излучения характерны электромагнитные волны с длиной волны от 0,76 до 420 мкм. Инфракрасное излучение испускается любым нагретым телом, температура которого определяет интенсивность и спектр излучаемой электромагнитной энергии. Тела, нагретые выше 100⁰С, являются источниками коротковолнового инфракрасного излучения (0,7 ... 9 мкм). С уменьшением температуры тела до 50 - 100⁰С ИК - излучение характеризуется длинноволновым спектром. При длительном облучении вызывает общую потерю зрения (катаракта хрусталика).

В зависимости от длины волны излучения меняется и его проникающая способность. Наибольшей проникающей способностью обладает ИК - излучение с $\lambda=0,76...1,4$ мкм, которое способно проникать в ткани человека на глубину нескольких сантиметров. ИК - лучи длинноволнового диапазона задерживаются в поверхностных слоях кожи. Большая проникающая способность короткого ИК - излучения вызывает непосредственное

воздействие на жизненно - важные органы (мозговая оболочка, глаза и др.), поэтому опасность его воздействия существенна.

При импульсно дуговой сварке ампул, как правило, нет мощных источников ИК - излучения. Оборудование нагревается умеренно, что не приводит к образованию опасного коротковолнового ИК - излучения. Его источником может стать зона взаимодействия электрической дуги с обрабатываемым изделием.

Запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны продуктами взаимодействия электрической дуги и изделия. Атмосферный воздух в своем составе содержит (% по объему): азота - 78,08; кислорода - 20,95; аргона, неона и других инертных газов - 0,93; углекислого газа - 0,03; прочих газов - 0,01. Воздух такого состава наиболее благоприятен для дыхания.

Воздух рабочей зоны отличен от приведенного выше состава из-за того, что в процессе импульсно дуговой сварки выделяются различные газы, кроме того, повышается концентрация аргона в атмосфере рабочей зоны в связи с его использованием в качестве технологического газа.

Процесс сварки сопровождается выделением мелкодисперсной пыли, содержащей до 90% частиц размером менее 5 мкм, что делает ее особо вредной для организма человека, так как она практически не оседает в воздухе производственного помещения, находится во взвешенном состоянии и легко проникает в легкие. Эта пыль имеет в своем составе такие вещества, как марганец, хром, никель и т. д., являющиеся канцерогенными и мутагенными веществами, влияющими, кроме того, на репродуктивную функцию человека и приводящими в некоторых случаях к заболеванию пневмокониозом. Данные вещества относятся к 1 классу опасности с допустимой концентрацией 0,01-0,05 мг/м³. Однако концентрация этих веществ в воздухе очень мала в связи с небольшими габаритами изделия и высокой скоростью процесса сварки [27].

Технологический газ аргон при атмосферном давлении вреден лишь в той мере, в какой он своим присутствием снижает содержание кислорода в воздухе. Однако потребность в аргоне при изготовлении одного узла - около 0,01 м³, а указанный объем не является опасным для оператора.

Поражение от взрыва баллона со сжатым газом. Взрыв сосуда может произойти при любом газе, находящемся в сосуде под большим давлением. Взрыв баллонов возможен при небрежном обращении с ними во время погрузки, разгрузки, транспортировки. Транспортировка баллонов разрешается только на рессорных транспортных средствах-машинах и тележках. При утечке газа из баллона, баллон должен быть удален в безопасное место. Эксплуатация его не допускается. На баллоне, вентиле и месте расположения баллонов не должно быть следов ЛВЖ, посторонних предметов. На рабочих местах баллоны устанавливаются вертикально и прочно укрепляются хомутами. Баллоны не должны быть расположены вблизи нагревательных приборов, металлоконструкций, электропроводки.

Перечень опасных и вредных факторов, воздействующих на персонал, одновременно и степень их проявления зависят от конструкции, характеристик сварочной установки и особенностей выполняемых с ее помощью операций.

Таким образом, обслуживающий персонал при работе на данном оборудовании подвергается воздействию практически всех вышеперечисленных факторов.

2.6 Техника безопасности и организация рабочего места

Техника безопасности при производстве изделий любого характера, является основополагающим фактором, так как она направлена на создание безопасных и здоровых условий труда.

Выполнение производственного процесса, при неправильной его организации приводит к появлению опасных и вредных производственных факторов. Поэтому необходимы мероприятия по разработке безопасных условий труда.

Производственные помещения для проведения электросварочных работ должны отвечать требованиям действующих норм и правил, санитарных норм проектирования промышленных предприятий. При выполнении сварочных работ в одном помещении с другими работами должны быть приняты меры, исключающие возможность воздействия опасных и вредных производственных факторов на работающих.

Стены и оборудование участков электросварки необходимо окрашивать в серый, желтый или голубой тона с диффузным (рассеянным) отражением света.

Ширина проходов с каждой стороны рабочего стола и стеллажа должна быть не менее 1 м.

Полы производственных помещений для выполнения сварки должны быть несгораемые, обладать малой теплопроводностью, иметь ровную не скользкую поверхность, удобную для очистки, а также удовлетворять санитарно-гигиеническим требованиям. В нашем случае пол покрыт пластиком. Он обеспечивает условия электробезопасности при работе на оборудовании, а также обеспечивает быстрое и качественное удаление радиоактивных материалов в случае загрязнения.

Единичное и опытное производство связано с травматизмом, который чаще всего имеет место при ремонте и обслуживании техники. Перед началом работы рабочий должен устранить все отмеченные им неполадки, убедиться в исправном состоянии основного и вспомогательного технологического оборудования и средств обеспечения безопасности (ограждений, блокировок,

сигнализации) и отсутствия посторонних лиц, предметов в рабочем пространстве.

Одним из необходимых условий здорового и высокопроизводительного труда, является обеспечение чистоты воздуха и нормальных метеорологических условий в рабочей зоне. Эффективным средством обеспечения чистоты и допустимых параметров воздуха рабочей зоны является вентиляция.

Для эффективной работы системы вентиляции важно, чтобы еще на стадии проектирования были выполнены следующие технические и санитарно-гигиенические требования. Производственные помещения оборудованы общей приточно-вытяжной вентиляцией, соответствующей строительным нормам и правилам отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха.

Количество приточного воздуха $L_{пр}$ должно соответствовать количеству удаляемого (вытяжки) $L_{выт}$. Разница между ними должна быть минимальной.

Приточные и вытяжные системы в помещении должны быть правильно размещены. Свежий воздух необходимо подавать в те части помещения, где количество вредных выделений минимально (или их нет вообще), а удалять, где выделения максимальны.

Система вентиляции не должна вызывать переохлаждения или перегрева работающего персонала.

Система вентиляции не должна создавать шум на рабочих местах, превышающий предельно допустимые уровни.

Система вентиляции должна быть электро-, пожаро- и взрывобезопасна, проста по устройству, надежна в эксплуатации и эффективна.

Естественное и искусственное освещение сварочных, сборочно-сварочных участков, площадок и рабочих мест должно быть организовано в

соответствии со строительными нормами и правилами естественного и искусственного освещения.

К самостоятельной работе в качестве электросварщика ручной сварки, электрогазосварщика и газорезчика допускаются лица не моложе 18 лет, прошедшие медицинское освидетельствование, инструктаж по охране труда, соответствующее обучение безопасным методам и приемам работ по утверждённой программе, проверку знаний требований инструкций по охране труда и пожарной безопасности с оформлением в специальных журналах, а также стажировку на рабочем месте.

Электросварщик ручной сварки, электрогазосварщик и газорезчик должны иметь вторую группу по электробезопасности, пройти инструктажи по охране труда и технике безопасности. В процессе производственной деятельности сварщик должен пройти проверку знаний.

Выполнение сварочных работ может быть начато лишь при наличии на рабочих местах:

- исправного оборудования, принятого в установленном порядке по акту;
- необходимого полного комплекта инструмента и технологической оснастки, основные размеры которой поверены (согласно КД) и срок поверки их не истек;
- средств измерения, аттестованных и поверенных;
- средств индивидуальной и коллективной защиты.

При выполнении сварки обязательным требованием к сварщику является соблюдение техники безопасности.

Перед началом проведения сварочных работ сварщик обязан:

- проверить исправность пускового устройства (рубильник, кнопочный выключатель);

- проверить изоляцию проводов и убедиться в надёжном заземлении.

В любой аварийной ситуации первоочередно требуется отключить оборудование и вентиляцию, работу прекратить, персонал должен немедленно сообщить о случившемся непосредственному руководителю и руководителю службы, на котором производятся работы. При возникновении пожара сообщить об этом в пожарную часть, назвав перед этим наименование подразделения, объект загорания, свою фамилию и номер помещения.

При несчастном случае необходимо:

- оказать пострадавшему первую доврачебную помощь;
- при необходимости вызвать скорую медицинскую помощь;
- сообщить о случившемся несчастном случае, независимо от его тяжести непосредственному руководителю пострадавшего или вышестоящему руководству;
- сохранить без изменения обстановку, при которой произошёл несчастный случай, если это не угрожает жизни и здоровью людей.

Главным требованием по окончании работы является отключение источника питания. Газовые баллоны закрыть и снять давление на редукторе. Во избежание пожароопасных ситуаций по окончании работы нужно обследовать помещение и оборудование. В случае выявленных нарушений и несоответствий сообщить о них непосредственному руководителю.

Выводы по главе

Была составлена последовательность действий при работе на установке сварки под давлением, обеспечивающая стабильную и бесперебойную работу механизмов и агрегатов.

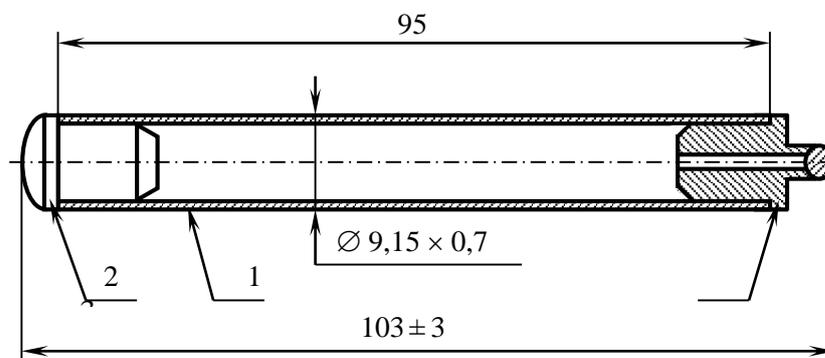
Было разработано центрирующее устройство, для сварочного электрода позволяющее снизить время, затрачиваемое на подготовительную операцию, тем самым увеличив производительность процесса сварки.

Был проведён анализ вредных и опасных производственных факторов при выполнении сварочных работ и выявлено, что обслуживающий персонал при работе на данном оборудовании подвергается воздействию практически всем вредным производственным факторам. Поэтому, все сварочные работы должны выполняться согласно технике безопасности.

3 Экспериментальная часть

3.1 Общие сведения об экспериментальном образце

Для проведения эксперимента по разработке технологии сварки газонаполненных образцов из циркониевых сплавов было использовано 20 изделий из сплава Э-110. Конструкция изделия (рисунок 15) представляет собой рабочую часть образца, выполненную из тонкостенной трубки диаметром 9,15 мм толщиной 0,7 мм, с расположенными по торцам заглушками. Одна из заглушек имеет сквозное отверстие для заполнения внутренней полости образца гелием под давлением.



1 – рабочая часть, 2 – заглушка, 3 – заглушка с отверстием

Рисунок 15 - Конструкция газонаполненного образца из сплава Э110

Образцы, нагружаемые внутренним давлением инертного газа (гелия), во время испытаний находились в облучательном устройстве (ОУ), размещённом в корпусе высокотемпературного канала, установленного в ячейку первого ряда отражателя реакторной установки СМ-3. Среда в канале – вода в условиях естественной циркуляции при давлении 14-16 МПа.

Облучение изделий выполнялось при следующих условиях:

- температура теплоносителя – до 330 °С;
- давление теплоносителя – до 16 МПа;

- рабочая температура образцов – до 330 °С;
- давление газа в образцах – до 31 МПа (при нагреве);
- давление газа в образцах – до 15 МПа (до нагрева);
- время облучения – около 10 эффективных суток.

Сварные соединения данного изделия относятся ко II категории по ОСТ 95 503-2016 «Соединения сварные и паяные для изделий активных зон ядерных реакторов.». К соединениям этой категории предъявляют требования по прочности (в том числе жаропрочности), герметичности, коррозионной и эрозионной стойкости и жаростойкости, способности выдерживать вибрационные и ударные нагрузки, определенное количество теплосмен без разрушения и нарушения герметичности в процессе эксплуатации.

3.2 Исследование характеристик

Учитывая то, что на формообразование влияет положение электрода над капилляром, то было принято решение, при сварке выполнять центровку электрода строго над отверстием капилляра. Это позволит избежать бегающей дуги над поверхностью расплавленного металла, что в свою очередь позволит избавиться от заваливания шва.

Чтобы избежать образования газового пузыря, было принято решение уменьшить вылет изделия из цанги, тем самым обеспечив лучший теплоотвод от сварного соединения, не позволяя внутреннему объёму газа перегреваться.

Для полноты картины был проведен эксперимент по исследованию вольт-амперных характеристик дуги. В эксперименте был исследован диапазон сварочных токов, который является самым распространённым для изделий атомной промышленности - 5...25 А. Значения давления инертных газов внутри камеры, варьировались в диапазоне от 0 до 16 МПа для гелия, и в диапазоне от 1 до 10 МПа для аргона. Длины дуг при сварке в инертных газах изменяли в диапазоне от 1 до 1,5 мм. Параллельно с экспериментом

выполнялось измерение анодного пятна сварочной дуги в гелии высокого давления. Сварка выполнялась на цилиндрических стержнях из циркониевого сплава Э110 диаметром 5 мм. Во время эксперимента при постоянном давлении $P_{He}=15$ МПа, сварочном токе $I_{св}=15$ А и времени сварки $t_{св}=0,4$ с изменяли только длину дуги – от 1 до 1,5 мм. Анализ глубины проплавления выполняли с помощью металлографических исследований, на продольных шлифах.

На рисунке приведены вольт-амперные характеристики дуг горящих под различным давлением гелия и аргона, которые были построены по результатам проведенных экспериментов. Было установлено, что повышение давления приводит не только к росту напряжения на дуге, но и к смещению положения отдельных участков вольт-амперных характеристик дуги. Изменение формы вольт-амперных характеристик дуги ярче выражено в среде гелия, что, по-видимому, связано не только с высоким потенциалом ионизации атомов гелия, но и с его высокой теплопроводностью, причем эффект повышения напряжения на дуге максимален при минимальной силе тока [17].

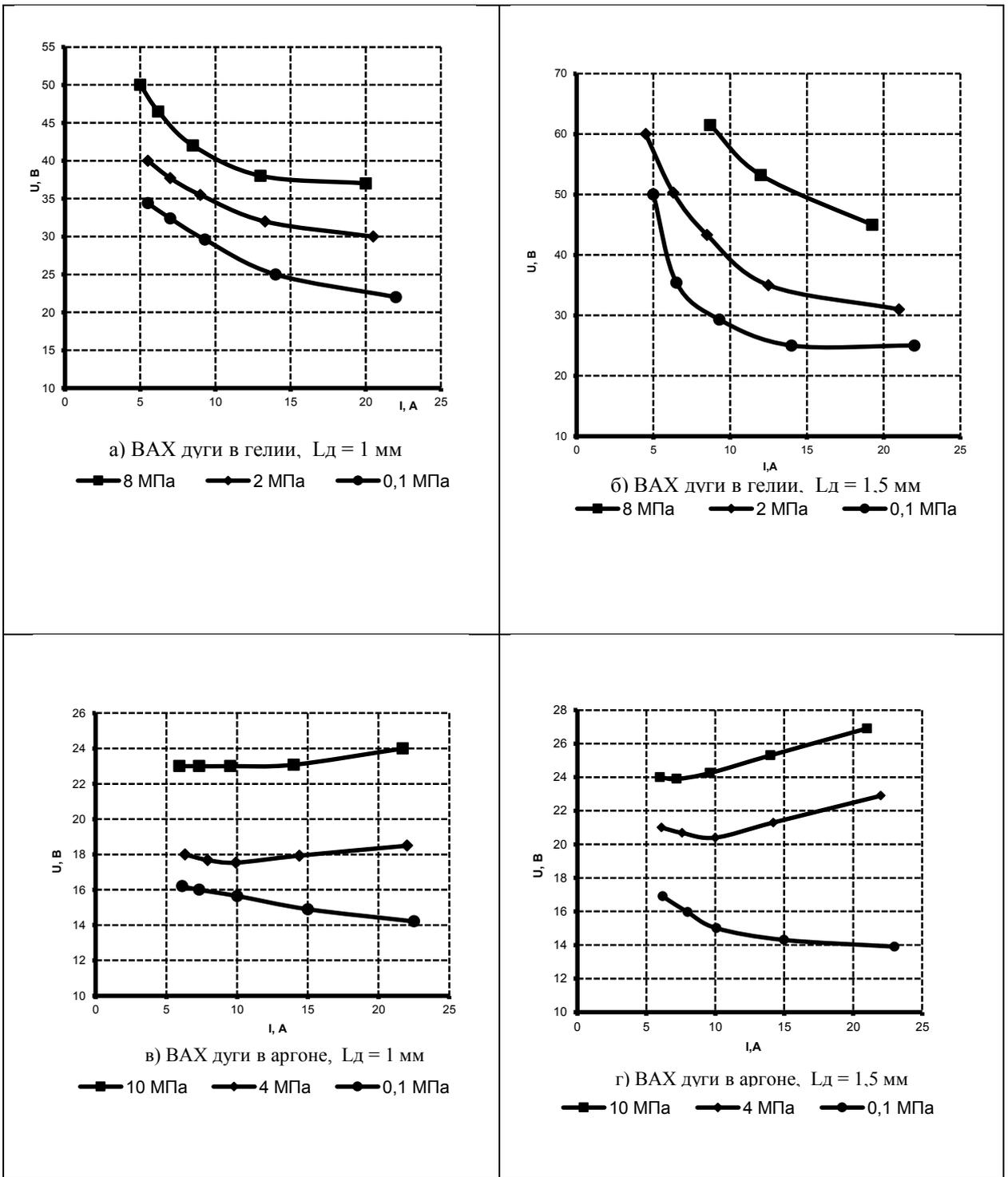


Рисунок 16 - Вольт-амперные характеристики малоамперных дуг

Анализ графиков рисунка 16 показывает, что эффект повышения напряжения на дуге в максимальной степени проявляется в среде гелия причем эффект максимален при минимальной силе тока.

Эксперимент по косвенному определению размера анодного пятна показал, что с изменением длины дуги от 1 до 4 мм, диаметр анодного пятна изменялся от 4,3 до 4,8 мм, при этом глубина проплавления изменилась примерно в 1,7 раза и составила соответственно 1,2 и 2,0 мм. Известно, что с увеличением длины дуги эффективная тепловая мощность дуги снижается, наблюдается рассредоточение мощности, вводимой в основной металл. Полученные данные говорят о том, что с увеличением длины дуги эффективная тепловая мощность дуги напротив возрастает, несмотря на высокую теплопроводность гелия и достаточно высокое давление. Это подтверждает тот факт, что увеличение длины дуги и сжатие её объёма при высоком давлении приводят к росту общего энерговыделения дуги и увеличения количества теплоты выделяемой на изделии [18].

В статье Ю.В. Казакова, А.В. Каплина, Н.А. Костюченко и С.А. Андреева говорится, что «длина дуги и давление инертного газа являются основными параметрами при сварке и оказывают значительное влияние на стабильное формирование сварного шва. Пренебрежение повышением энерговыделения с ростом давления может привести к нарушению качественного формирования сварного шва» [11, с.76].

Опытным путём было выявлено, что при длине дуги в 2 мм процент образования дефектов сварных соединений, меньше чем при других значениях. Поэтому требуется выполнить расчёт режимов, при которых общая тепловая энергия останется неизменной при других режимах.

Поэтому сначала требуется выполнить расчёт тепловой мощность при заданном режиме. Сварка изделий ранее выполнялась на следующих режимах: $I_y=30$ А; $I_{св}=25..27$ А; $U_{св}=35$ А; $t_{св}=0,3с$; $h=3$ мм; $l_{дуги}= 2$ мм.

Общая тепловая мощность рассчитывается по формуле

$$Q = 0,24 * I * U * \eta \quad (1)$$

где 0,24 – коэффициент перевода электрических величин в тепловые, кал/Вт*с,

I – сварочный ток,

U – напряжение на дуге,

η – КПД дуговой сварки.

Благодаря этой формуле можно определить энергию, необходимую для нагрева материала до требуемых температур, что в свою очередь даёт возможность управлять процессами, происходящими при дуговой сварке неплавящимся электродом и оптимизировать параметры, в данном случае силу тока.

При нормальных условиях атмосферное давление равно 101325 Па = 0,1 МПа. При данном значении эффективность процесса сварки равна 55%. Отсюда общая тепловая мощность равна

$$Q = 0,24 * I * U * \eta = 0,24 * 26 * 35 * 1 = 218,4 \text{ Дж} \quad (2)$$

Отсюда следует, что для обеспечения стабильного проплавления U должно равняться:

$$U = (0.025 * I_{уст} * P) + (2.42 * P) - (0.25 * I_{уст}) + 44,31 = 37,12 \text{ В}. \quad (3)$$

Зная напряжение можно рассчитать сварочный ток, необходимый для проведения сварки:

$$I = \frac{Q}{U * 0.24 * \eta}. \quad (4)$$

Оптимальная сила тока при сварке в нормальных условиях составляет 47 А. Однако, для сварки при большем давлении требует изменения режимов сварки. Для этого требуется провести расчёт по ранее приведённым формулам, но для точности расчётов требуется предварительно рассчитать КПД при каждом давлении.

Эффективность процесса сварки при повышении давления снижается, её расчёт выполняется по формуле:

$$\eta = \eta_0(0,9463 - 0,02P), \quad (5)$$

где, η_0 - КПД при нормальных условиях (когда $P=0,1$ МПа),

P – давление в камере при сварке [18].

Полученные данные расчёта КПД при давлении в диапазоне от 0,1 до 15 МПа приведены в таблице 3.

Таблица 3 - КПД сварки при разных давлениях

Р, Мпа	η, %	Р, Мпа	η, %
0,1	55	8	43,2
1	50,9	9	42,1
2	49,8	10	41
3	48,7	11	39,9
4	47,6	12	38,8
5	46,5	13	37,7
6	45,4	14	36,6
7	44,3	15	35,5

По формулам указанным проведём расчёт основных параметров сварки: силы тока и напряжения. В таблице 4 приведены данные зависимости напряжения сварки от давления внутри изделия.

Таблица 4 - Напряжение при изменении давления

Р, Мпа	U, В	Р, Мпа	U, В
0,1	37	8	63
1	46	9	66
2	49	10	68
3	51	11	70
4	53	12	73
5	56	13	75
6	58	14	78
7	61	15	80

На основе полученных данных был построен график зависимости напряжения от давления. График (рисунок 17) визуально показывает, что с увеличением давления растёт и напряжение сварки.

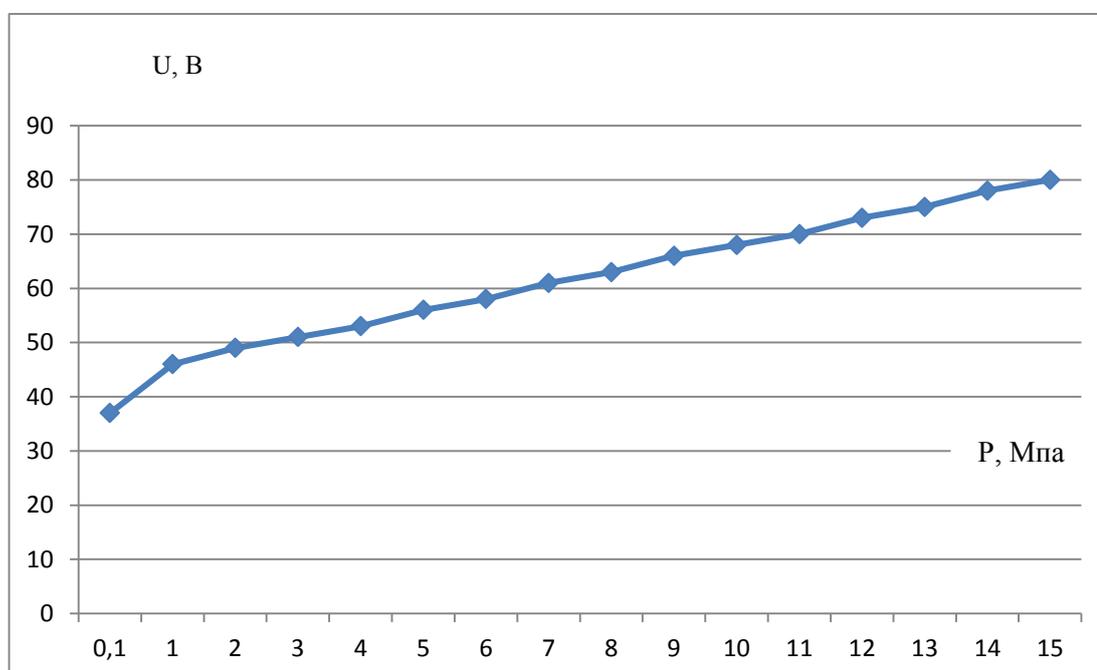


Рисунок 17 - График зависимости напряжения от давления

В таблице 5 приведены данные зависимости силы тока от давления, создаваемого в камере.

Таблица 5 - Сила тока при изменении давления

Р, Мпа	I, А	Р, Мпа	I, А
0,1	47	8	33
1	38	9	32
2	37	10	32
3	36	11	32
4	35	12	31
5	34	13	31
6	34	14	31
7	33	15	31

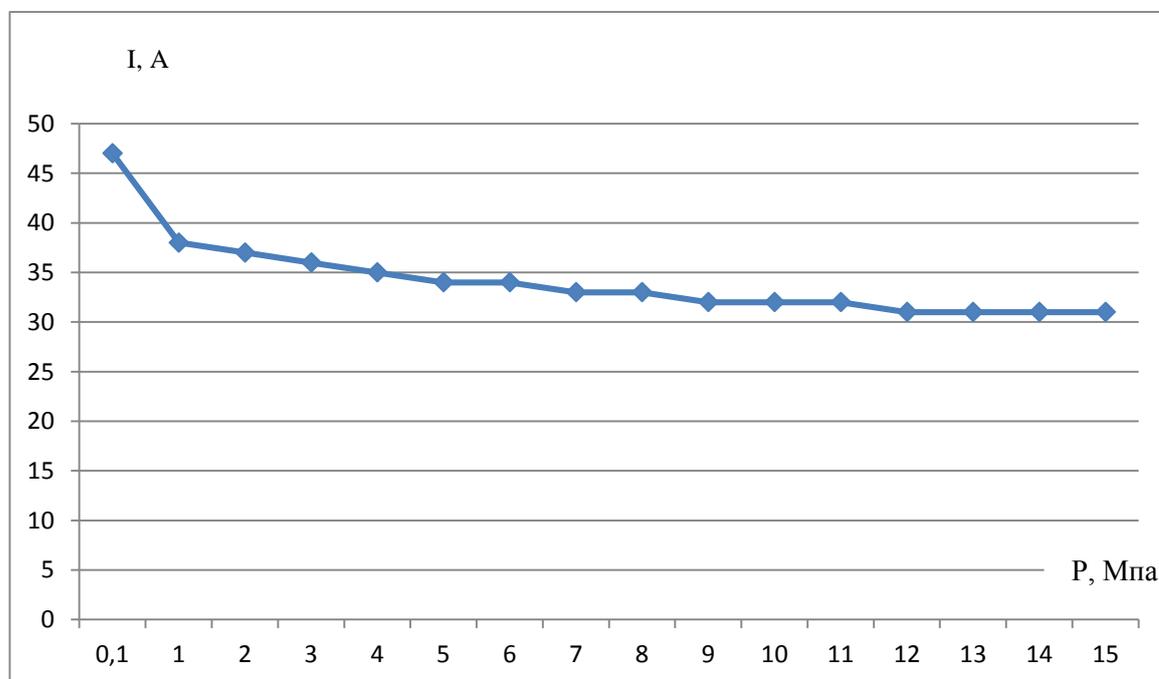


Рисунок 18 - График зависимости силы тока от давления

Полученные данные напряжений и силы тока позволяют составить режимы сварки, которые позволят получить сварные соединения высокого качества как при сварке с малым, так и с высоким давлением.

3.3 Подготовка под сварку

Для предотвращения образования пор в сварных соединениях требуется проводить тщательную подготовку областей сварки, которая включает в себя очистку и сушку поверхностей [14]. В работах [2]-[3] для образцов из Zircaloy-4 используется ультразвуковая очистка в течение 30 минут, с ацетоном в качестве моющей жидкости. Допускается ручная очистка ацетоном или метанолом, с условием применения материала, не оставляющего частиц в зоне сварки [8]. Данная методика применима и для других сплавов на основе циркония.

Так же, известны случаи, когда листы циркония перед сваркой очищаются наждачной шкуркой и пескоструйной обработкой. Выполняется это для того, чтобы избавиться от поверхностных загрязнений, в частности от смазки, которая остаётся после проката, а так же от окисной плёнки.

Учитывая вышесказанное, было принято решение проводить подготовку поверхности по следующей технологии. Все изделия перед сваркой подвергались чистке и обезжириванию. Сначала трубки и заглушки промывались в растворителе «Нефрас» на протяжении 5-10 минут с целью очистки поверхности изделий от органических и неорганических загрязнений. После обезжиривания изделия тщательно протирались бязью со спиртом. Сушка комплектующих выполнялась в вакуумной сушильной печи при температуре 100-150°C и давлении 8-10 Па в течение 10-15 минут и являлась окончательным этапом подготовки изделий к сварке. Качество подготовки поверхности образцов под сварку оценивается визуально. В случае обнаружения загрязнений поверхности (следы масла, краски и др.) необходимо повторить очистку поверхностей.

3.4 Сварка

Отработка режимов аргонодуговой сварки кольцевых периметрических швов выполнялась на установке полуавтоматической сварки неплавящимся электродом АСТЭ-7 с использованием источника питания Lorch T 220 AC/DC. Для защиты сварочной ванны от атмосферного воздействия применялся инертный газ аргон высшего сорта по СТО 37064331-002-2017. При сварке использовался вольфрамовый электрод марки «ВЛ» по ТУ 41-19-2-77 диаметром 2 мм.

Оптимальными режимами для сварки кольцевых периметрических швов являются:

- Род тока: постоянный ток прямой полярности;
- Величина сварочного тока: $I_{св} = 31 \dots 33$ А;
- Длина сварочной дуги: $l_d = 1,2 \dots 1,5$ мм;
- Вылет изделия из охлаждающей цанги: $h = 2,0 \dots 2,2$ мм;
- Скорость вращения изделия: $V_{св} = 3 \dots 4$ об/мин;
- Расход инертного газа: $Q = 6 \dots 10$ л/мин.

Данный режим применим только для сварки трубки с заглушкой, в которой выполнено отверстие. Для приварки сферической заглушки к трубке требуется увеличить сварочный ток, так как из-за повышенного теплоотвода не достигается установленное конструкторской документацией проплавление. Поэтому сварка сферической заглушки будет выполняться на следующем режиме:

- Род тока: постоянный ток прямой полярности;
- Величина сварочного тока: $I_{св} = 34 \dots 36$ А;
- Длина сварочной дуги: $l_d = 1,2 \dots 1,5$ мм;
- Вылет изделия из охлаждающей цанги: $h = 2,0 \dots 2,2$ мм;
- Скорость вращения изделия: $V_{св} = 3 \dots 4$ об/мин;
- Расход инертного газа: $Q = 6 \dots 10$ л/мин.

Оплавление торца капилляра выполнялось на установке сварки под давлением УСПД-200. В качестве защитного газа при герметизации шва №2 использовался гелий марки «А» по ТУ 0271-135-31323949-2005. Вольфрамовый электрод применялся марки «ВЛ» по ТУ 42-19-2-77 диаметром 2 мм.

Известно, что на сосредоточенность дуги, распределение потока энергии, давление дуги и глубину проплавления влияет угол заточки электрода. Для наших целей оптимальным является угол в $25^{\circ} \dots 30^{\circ}$, так как данный угол заточки электрода позволяет дуге не терять способность к поджигу при высоком качестве сварки, приведено в работах [29], [32].

Изделие закрепляется в медной цанге-холодильнике, которая в свою очередь помещается в установку сварки под давлением. Зазор между электродом и капилляром должен варьироваться в диапазоне от 10 до 15 делений, что равносильно 2-3 мм.

Режим сварки, на котором будет осуществляться герметизация торцевого шва, зависит от давления, создаваемого в камере. Так, для изделий с давлением равным $P=12 \dots 15$ МПа, сила тока $I_{св}$ будет равна 30-32А, а при $P = 8 \dots 11$ Мпа – $I_{св} = 32-34$ А. Ток короткого замыкания, время сварки, вылет изделия из цанги и длина дуги для всех диапазонов давлений одинаковы и равны:

- Ток короткого замыкания: $I_{кз}=30$ А;
- Вылет изделия из охлаждающей цанги: $h=3,0$ мм;
- Время сварки $t_{св}=0,3$ с;
- Длина сварочной дуги: $l_{дуги}=2,0$ мм.

В процессе сварки как кольцевых, так и торцевых швов, выплесков расплавленного металла не наблюдалось, горение дуги было стабильным

3.5 Контроль качества сварных соединений

3.5.1 Требования к сварным соединениям

Для сварных соединений, выполненных сваркой плавлением, предъявляются особенные требования по объёмной сплошности и геометрическим размерам в контролируемых сечениях – сечениях, на которых видны составные части соединения в размерах достаточных для проведения планируемых исследований.

Согласно ОСТ 95 503-2016 «Глубина проплавления или провара, оцениваемая на шлифах или неразрушающими методами контроля, должна быть не менее фактической толщины наименее тонкой детали. Трещины любого вида и в любой части сварного соединения не допускаются».

В случае допустимости отдельных пор в сварных соединениях разработчик указывает в конструкторской документации предельный размер поры, количество пор по длине соединения, минимальное расстояние между порами и способ, который применяют для выявления пор. В случае если такие требования отсутствуют, то руководствуются требованиями, которые указаны в ОСТ 95 503-2016.

Сварные соединения II категории должны быть герметичными при испытаниях установленными в КД методами, удовлетворять требованиям по норме герметичности.

Контроль коррозионной стойкости сварных соединений из циркониевых сплавов следует проводить путём автоклавных испытаний в воде или паре при параметрах, указанных в КД, с определением качества пленки и весовых потерь. У сварных соединений не должно быть плёнки белого или серо-белого цвета, или белых пятен, на поверхности, интенсивность которых больше, чем показанная на контрольных образцах внешнего вида.

В случае обнаружения дефектов сплошности сварного соединения часто допускается повторная сварка с целью его устранения, однако, если данное

требование не прописано в конструкторской документации, то использовать данный способ устранения дефектов запрещается.

3.5.2 Проведение контроля качества

Существуют множество методов контроля качества сварных соединений, как разрушающих, по окончании которых нарушается пригодность объекта контроля к использованию, так и неразрушающих. Самыми распространёнными и информативными методами контроля являются визуально-измерительный контроль, металлография и радиационный контроль.

Визуальный и измерительный контроль позволяет измерить геометрические параметры изделия, а так же визуально определить пригодность изделия. Выполнялся контроль с помощью оптических приспособлений, микроскоп и лупа, и измерительным инструментом, микрометр и штангенциркуль. При проведении контроля сварных соединений, поверхностных дефектов, трещин, прожогов, наплывов и подобных, выявлено не было. Внешний вид и геометрические размеры сварных соединений образцов удовлетворяют требованиям ГОСТ Р ИСО 17637-2014, ГОСТ Р 50.05.08-2018 , а так же конструкторской документации.

Изделия II категорий проходят испытания на герметичность для выявления в них крупных и мелких течей. Условное деление на мелкие и крупные течи в соответствии с таблицей 6, в которой приведены нормы герметичности по гелию для масс-спектрометрического контроля при нормальных условиях.

Таблица 6 - Нормы герметичности по гелию

Норма герметичности (НГ)	Диапазон допустимых утечек (натекания)		Условное деление
	(м ³ * Па)/с	(л х рт.ст.)/с	
0	<1,80 x 10 ⁻¹⁰	<1,35 x 10 ⁻⁶	Мелкие течи
1	≥1,80 x 10 ⁻¹⁰ ... <1,80 x 10 ⁻⁹	≥1,35 x 10 ⁻⁶ ... <1,35 x 10 ⁻⁵	
2	≥1,80 x 10 ⁻⁹ ... <1,80 x 10 ⁻⁸	≥1,35 x 10 ⁻⁵ ... <1,35 x 10 ⁻⁴	
3	≥1,80 x 10 ⁻⁸ ... <3,60 x 10 ⁻⁸	≥1,35 x 10 ⁻⁴ ... <2,70 x 10 ⁻³	
4	≥3,60 x 10 ⁻⁸ ... <1,80 x 10 ⁻⁵	≥2,70 x 10 ⁻⁴ ... <1,35 x 10 ⁻¹	
5	≥1,80 x 10 ⁻⁵ ... <1,28 x 10 ⁻³	≥1,35 x 10 ⁻¹ ... <9,6	Крупные течи

В конструкторской документации были указаны требования к проведению контроля герметичности изделия. Выполняется он с целью выявления течей гелия из изделия. Испытания на герметичность выполнялись по ГОСТ 28517-90 по II классу герметичности масс-спектрометрическим методом, способом вакуумной камеры на многофункциональном течеискателе производства ADIXEN модели ASM 340 (рисунок 19).

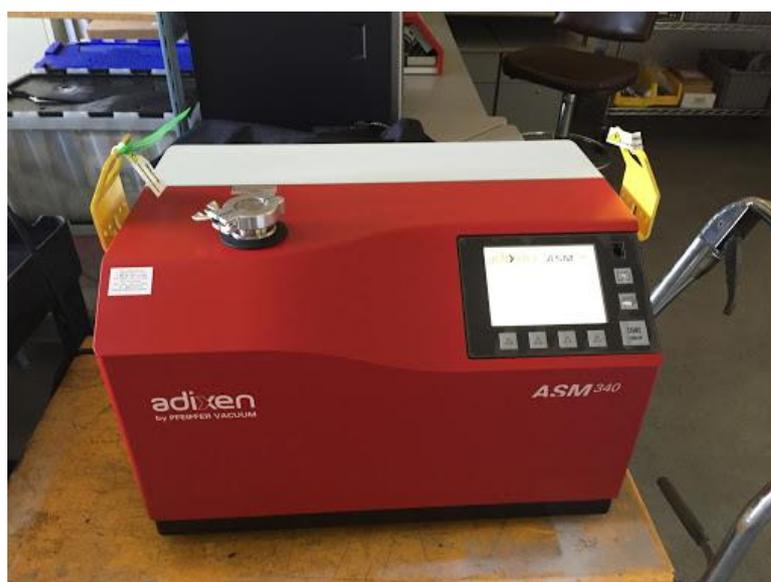


Рисунок 19 - Течеискатель ADIXEN ASM 340

Допускаемое натекание по гелию не превышало $5 \cdot 10^{-9}$ м³·Па/с, что соответствовало установленной норме герметичности и свидетельствовало тому, что течь гелия в сварном соединении отсутствует. Температура проводимых испытаний составляла 300-350 °С.

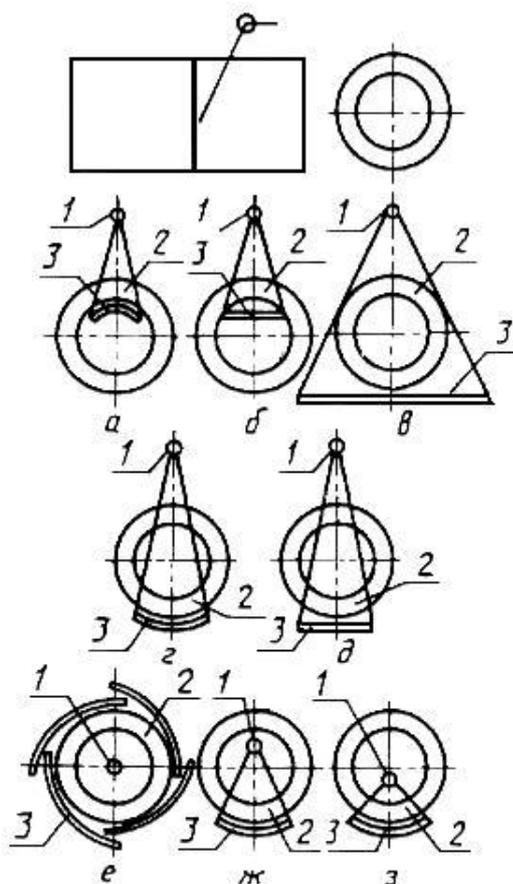


Рисунок 20 - Внешний вид изделий выполненных на разработанных режимах

Испытание на прочность наружным пневматическим давлением выполнялось по ОСТ 95 10054-87 в течение 10 мин, при давлении 6,25 МПа. После проведения испытаний сварных соединений не было обнаружено нарушения формы и деформации изделия.

Следующим этапом в процедуре контроля качества сварных соединений является проведение радиационной дефектоскопии. Радиационные методы контроля сварных соединений необходимо применять для выявления внутренних дефектов в шве и околошовной зоне.

При контроле кольцевых сварных соединений цилиндрических и сферических пустотелых изделий следует, как правило, использовать схемы просвечивания через одну стенку изделия (рисунок 21 а, б, е, ж, з).



1- источник излучения; 2- контролируемый участок;
3- кассета с пленкой

Рисунок 21 - Схемы контроля кольцевых сварных соединений

В службе главного сварщика имеется установка для радиационной дефектоскопии «Бастион» производства группы «Синтез НДТ» (рис.22). Данная установка работает с постоянным напряжением на аноде и постоянным током анода во время экспозиции с предельной мощностью на аноде 900 Ватт, что позволяет просвечивать изделия разных толщин. Рентгеновская плёнка для радиационной дефектоскопии должна обладать малой зернистостью и высокими показателями контраста и чувствительность.

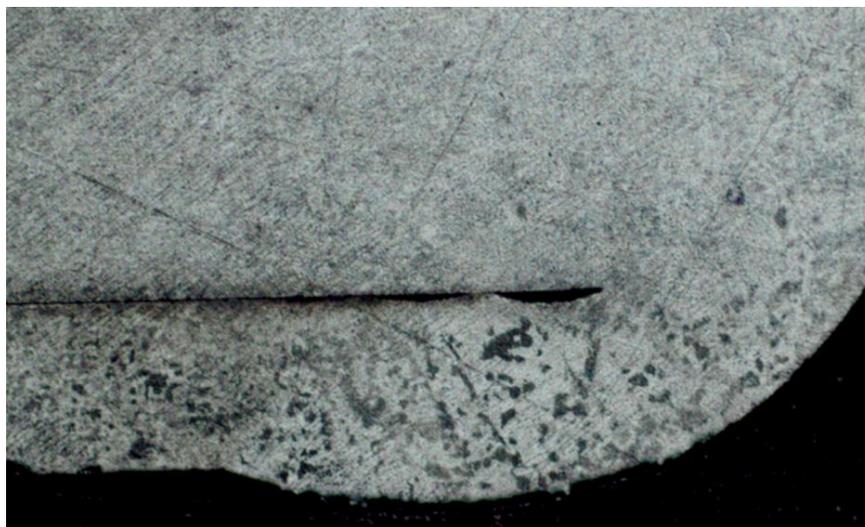
Лучшим производителем плёнки, удовлетворяющим таким условиям является плёнка AGFA Structurix D7, однако для лучшего результата просветки следует использовать проявитель и закрепитель этого же производителя. В ходе выполнения контроля дефектов пор, включений и других дефектов сплошности сварного соединения выявлено не было.



Рисунок 22 - Установка для рентгеновской дефектоскопии «Бастион»

Окончательным этапом проведения контроля качества сварных соединений является разрушающий металлографический контроль. Он выполнялся на образцах-свидетелях, размеры которых полностью соответствуют размерам боевых образцов, на инвертированном металлографическом микроскопе “OLYMPUS GX-51”. Оценка качества кольцевых и торцевых сварных соединений изготовленных образцов неразрушающими методами показала положительный результат. В выполненных сварных соединениях пор, трещин, вольфрамовых включений и

других дефектов сплошности не обнаружено (рисунок 23). Проплавление металла составляет не менее 100% от толщины свариваемой кромки, что удовлетворяет требованиям КД и ТД.



а



б

а – кольцевой шов, б – торцевой шов

Рисунок 23 – Металлографические шлифы сварных соединений

Проплавление в соединениях, герметизируемых по торцу, оценивалось на шлифе в расчетной части шва как минимальное расстояние от точки пересечения внутренней поверхности оболочки с линией сплавления до наружной поверхности шва. Это расстояние не меньше фактической толщины оболочки, что удовлетворяет требованиям КД и ОСТ 95 503-2016.

Выводы по главе

Был проведен эксперимент по изучению вольт-амперных характеристик сварочной дуги, в котором исследовался диапазон сварочных токов, который является самым распространённым для изделий атомной промышленности.

Было выявлено, что длина дуги и давление инертного газа являются основными параметрами при сварке и оказывают значительное влияние на стабильное формирование сварного шва, а так же, что с увеличением внутреннего давления газа увеличивается мощность сварочной дуги, поэтому для минимизации образования дефектов требуется уменьшать сварочный ток.

Разработана и отработана технология сварки кольцевых периметрических и торцевых сварных соединений, обеспечивающая стабильное качество.

Заключение

В магистерской диссертации были решены задачи связанные со снижением вероятности образования дефектов в сварных соединениях изделий из циркониевых сплавов.

В ходе выполнения работы был проведён литературный анализ существующих технологий сварки изделий из циркониевых сплавов, на основе которого были выбраны самые технологичные и рациональные способы для изделий с заданными геометрическими параметрами.

В ходе работы на базе материаловедческой лаборатории ОАО «ГНЦ НИИАР» получены основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, позволяющие сделать выводы, что:

- Длина дуги и давление инертного газа являются основными параметрами при сварке и оказывают значительное влияние на стабильное формирование сварного шва;
- Пренебрежение повышением энерговыделения с ростом давления может привести к нарушению качественного формирования сварного шва;
- При длине дуги в 2 мм процент образования дефектов сварных соединений, меньше чем при других значениях.

Так же было выявлено, что на проплавляющую способность влияет мощность дуги, которая увеличивается вместе с давлением внутри изделия, поэтому для каждого диапазона давления требуется выполнять регулировку сварочного тока. Чем выше давление, тем ниже сварочный ток.

На основе проведённого литературного анализа и экспериментальных исследований были рассчитаны основные параметры, влияющие на процесс сварки торцевых швов. Разработанная технология сварки кольцевых периметрических и торцевых швов экспериментальных газонаполненных

образцов, позволяет получать сварные соединения удовлетворяющие требованиям конструкторской и технологической документации.

Целесообразно продолжить дальнейшие исследования в области сварки изделий атомной промышленности из циркониевых сплавов для повышения производительности. При этом необходимо рассмотреть другие методы уменьшения вероятности образования дефектов в сварных соединениях. Например, актуальным является вопрос о возникновении газового пузыря в торцевом соединении из-за увеличения внутреннего объёма газа при нагреве изделия в процессе сварки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. American Welding Society. Welding Handbook | 8th Ed. – Miami, Florida: AWS, 1998. Vol. 4. – 621 p.
2. Chuang Cai, Wang Tao, Liqun Li. Weld bead formation and corrosion behavior of pulsed laser welded zirconium alloy // Manufacturing Technology. – 2015. – №77. – P. 621–628.
3. Chuang Cai, Liqun Li, Wang Tao. Weld Bead Size, Microstructure and Corrosion Behavior of Zirconium Alloys Joints Welded by Pulsed Laser Spot Welding // Journal of Materials Engineering & Performance. – 2016. – №25. – P. 3783–3792.
4. Duley, W. W. 1983. Laser Processing and Analysis of Materials, p. 71, Plenum Press, New York, N. Y
5. Effects of helium gas on arc characteristic in gas tungsten arc welding» Hiraoka Kazuo, Okado Okira, Inagaki Michio. «Trans. Nat. Res. Inst. Metals» 1986, 28, №2, с. 139-145
6. Fang, Q. T., Anyalebechi, P. N., and Granger, D. A. 1988. Proceedings of TMS Annual Meeting of Light Metals, pp. 477–485.
7. Suga Yasuo, Hasui Atsushi. «Есэцу гаккай ромбунсю, Quart. J. Jap. Weld. Soc.» 1988, 6, №1, с. 86-91.
8. Process fundamentals of industrial laser welding and cutting / Prepared by: David Havrilla – Rofin-Sinar, 1999. – 203 P.
9. Бабкин Л.Г., Сухов К.К., Яшунский А.Я. и др. Герметизация твэлов для ядерных реакторов методом контактной стыковой сварки // Сварочное производство. 1999. №8. С. 35-38
10. Блащук, В.Е. Цирконий: сплавы, сварка, применение (Обзор) / В.Е. Блащук // Автоматическая сварка, 2005, №7. С. 36-44.

11. Бровко В.В., Агафонов В.И., Мирошниченко Г.В., Зинковский В.И. «Сварка под давлением облученных оболочек тепловыделяющих элементов» // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Сварка в ядерной технологии. 1989. №. 4 с.6-10.
12. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н. «Лазерная сварка металлов», серия «Лазерная техника и технология», книга 5, М.: Высшая школа, 1988.
13. Гуревич, С.М., Сварка химически активных и тугоплавких металлов и сплавов. – М.:Машиностроение, 1982.-95с., ил. – (Б-ка электросварщика)
14. Гуревич С. М. Справочник по сварке цветных металлов // Киев: Наукова думка. – 1981. – С. 34-41.
15. Займовский А.С., Никулина А.В., Решетников Н.Г. Циркониевые сплавы в атомной энергетике. – М.:Энергоатомиздат, 1981. – 232с.
16. Иванович Ю.В. Сварка малогабаритных корпусов источников ионизирующих излучений: дис. кан. техн. наук. Тольятти. гос. университет, Тольятти, 2013.
17. Казаков, Ю.В. Технология дуговой сварки малогабаритных изделий атомной техники в среде повышенного давления / Ю.В. Казаков, А.В. Каплин, Н.А. Костюченко, С.А. Андреев // Вектор науки тольяттинского государственного университета, 2015, №2(32-2). С.75-80.
18. Каплин А.В., Табакин Е.М., Андреев С.А. Регулирование параметров сварки при повышенном давлении защитных газов // Всероссийская молодёжная конференция «Научные исследования и технологические разработки в обеспечение развития ядерных технологий нового поколения», г. Димитровград, 27-29 марта 2018 г.: тезисы докладов, 2018. С.75-78.
19. Каплин А.В., Табакин Е.М., Атаманов В.А. Технология сварки источника на основе хрома-51 // X Всероссийская молодёжная конференция

«Научные исследования и технологические разработки в обеспечение развития ядерных технологий нового поколения», г. Димитровград, 17-18 марта 2021 г.: тезисы докладов, 2021. С.122-125.

20. Кириченко В.Г., Азаренков Н.А. Ядерно-физическое металловедение сплавов циркония.- Х.:ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. - 405с.

21. Котвицкий А.Д. Сварка в среде защитных газов. М.: “Высшая школа”, 1974 г. с.10.

22. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. Колачев Б.А., Елагин В.И, Ливанов В.И. Издательство «Металлургия», 1972, 480 с.

23. Нуждов Н.Ю., Каплин А.В. Технология сварки источников гамма-излучения на основе селена-75 // X Всероссийская молодёжная конференция «Научные исследования и технологические разработки в обеспечение развития ядерных технологий нового поколения», г. Димитровград, 17-18 марта 2021 г.: тезисы докладов, 2021. С.125-127.

24. Пиляев А.С., Тюрин В.Н. Цирконий в атомной промышленности. Вып.8. Сварка и пайка циркониевых сплавов в реакторостроении за рубежом: Обзорная информация. АИНФ 563. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1981. – 52 с.: с.3-16:

25. Плышевский, М.И. Влияние условий защиты при сварке и качества подготовки поверхности на коррозионную стойкость сварных соединений циркония / М.И. Плышевский, Н.С. Рассошкина, А.Н. Семенов, В.Н. Тюрин // Сварочное производство, 2001, №1. С.45-48.

26. Решетников Ф.Г., Головнин И.С., Казенов Ю.И. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. Кн.1. – М.: Энергоатомиздат, 1995., с.9,

27. Рябиченко Б.Р., Андреев М.П., Щавелев Л.Н., Татаринов В.Р. «О некоторых особенностях процесса сварки с повышенным давлением гелия» // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Сварка в ядерной технологии. 1989. №4.
28. Рябиченко Б.Р., Татаринов В.Р., Щавелев Л.Н., Дорожкин В.Г. Исследование процесса возбуждения дуги при сварке с повышенным давлением гелия // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Сварка в ядерной технологии. 1986. № 2(17). С. 51-53.
29. Садыров, Р.К. Действие сил на каплю электродного металла при импульсно-дуговой сварке в нижнем положении / Р.К. Садыров, Э.К. Габитов // Всероссийская научно-практическая конференция молодых учёных, аспирантов и студентов «Обработка материалов: современные проблемы и пути решения», 2015. С.25-28.
30. Сазонов А.Г., Справочник по сварке. Том 4. Под редакцией А.И.Акулова. – М.:Машиностроение. 1971. – 416 с: ил.
31. Сварка и резка материалов. Банов М.Д., Казаков Ю.В., Козулин М.Г., по ред. Казакова Ю.В. М.: «Академия», 2000
32. Селиванов А.С. Влияние угла заточки неплавящегося электрода на стабильность глубины проплавления при различных токовых нагрузках // Вопросы науки и техники: материалы международной заочной научно-практической конференции. Часть I. (16 января 2012г.) – Новосибирск: ЭКОР-книга, 2012. – С.41-44.