

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Институт металлургии, машиностроения и транспорта  
Кафедра «Теория и технология сварки и материалов»

Работа допущена к защите  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ С.Г. Паршин  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**

### **РАЗРАБОТКА ПЛАЗМОТРОНА ДЛЯ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ**

по направлению 22.03.02 Металлургия  
по образовательной программе 22.03.02\_05 Металлургия сварочного  
производства

Выполнил студент группы 43315/1  
Руководитель, зав. кафедрой, д.т.н.  
Консультант, ассистент

М.Е. Гошкодера  
С.Г. Паршин  
А.С. Майстро

Санкт-Петербург  
2019

## Содержание

Введение .....	4
1. Сведения о плазменных процессах .....	6
1.1 Плазма и ее свойства.....	6
1.2 Классификация методов плазменной сварки .....	6
1.3 Методы получения низкотемпературной плазмы .....	7
1.4 Оборудование .....	8
1.5 Виды источников плазмы .....	9
1.6 Газы для плазменной сварки .....	13
1.7 Характеристики плазменного источника .....	14
2. Плазменная наплавка .....	16
2.1 Способы плазменной наплавки .....	16
2.2 Основы плазменной наплавки .....	18
2.3 Качество наплавки .....	19
3. Конструкции плазмотронов для сварки и наплавки.....	22
4. Разработка конструкции плазмотрона для дуговой наплавки .....	30
4.1 Требования к разрабатываемому плазмотрону .....	30
4.2 Конструкция прототипа .....	31
4.3 Элементы конструкции.....	33
4.4 Проверка сборочного чертежа .....	41
Вывод.....	43
Список литературы .....	44

## **РЕФЕРАТ**

На 50 страницах, 40 рисунка, 1 таблица

**ПЛАЗМОТРОН ДЛЯ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ, ПЛАЗМА, ПЛАЗМЕННАЯ СВАРКА, ПЛАЗМЕННАЯ НАПЛАВКА.**

В данной работе представлен обзор, касающийся плазменного метода сварки и наплавки, а так же приведен результат разработанного плазмоторна для дуговой наплавки с комплектацией сопел разного диаметра, для выполнения разного типа работ.

## **THE ABSTRACT**

50 pages, 40 pictures, 1 tables

**PLASMA TORCH FOR ARC SURFACING, PLASMA, PLASMA WELDING, PLASMA SURFACING.**

This paper presents an overview of the plasma method of welding and surfacing, as well as the result of the developed plasma torch for arc surfacing with a set of nozzles of different diameters, to perform different types of work.

## Введение

Плазмотроны являются неотъемлемой частью установок для плазменной дуговой сварки, резки, наплавки, а так же плазменного напыления. Они имеют различную сферу применения. Что бы понять, на чем основан процесс их применения, рассмотрим метод плазменной сварки.

Плазменная дуговая сварка (plasma arc welding – PAW) аналогична аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом в том, что в ней также используется неплавящийся вольфрамовый электрод, чтобы создать дугу. Особенность заключается в том, что при сварке сжатой дугой действие инертного газа в отверстии в сопле сварочной горелки сужает дугу. Это преимущество включает в себя большую концентрацию энергии (то есть, более высокую плотность энергии), более высокое, улучшенную стабильность дуги, более глубокую проникающую способность, более высокие скорости сварки и, как правило, более чистые сварные швы, поскольку вольфрамовый электрод не может случайно прикоснуться к заготовке, вызывая загрязнение.

Плазма в PAW создается потоком инертного газа с низким объемом через внутреннее отверстие горелки. Высокочастотная вспомогательная дуга, установленная между электродом и внутренним соплом, ионизирует газ и зажигает дежурную дугу. Когда заготовка соединена со сварочной горелкой так, что она имеет противоположную полярность постоянному электроду, плазма притягивается к заготовке, и генерирование плазмы называется работой в режиме первичной дуги.

Преимущества и характерные особенности метода включают в себя:

- Надежное зажигание дуги;
- Концентрированная высокостабильная дуга при малых токах дуги с небольшой чувствительностью к изменениям длины дуги;
- Высокая скорость сварки: до 400% выше, чем у обычного TIG;
- Низкое тепловое воздействие;
- Надежное проникновение с помощью метода «замочной скважины» (глубокого проплавления);

- Возможна стыковая сварка толстых материалов (8 мм) без использования наполнителей;
- Сварка плавлением возможна даже в очень тонких материалах (0,1 мм);
- Низкая выпуклость сварного шва и корневого валика. Это особенно полезно при сварке конструкций, которые будут подвергаться усталостной нагрузке, в дополнение к уменьшению работы, требуемой в других сварных швах, где в противном случае корневая кромка должна была бы быть отшлифована. Плазменная сварка аустенитной нержавеющей стали толщиной 5 мм обеспечивает выпуклость сварного шва около 0,3 мм и корневого валика около 0,2 мм;
- Оценка качества сварки возможна во время сварки;
- Высокое металлургическое качество по сравнению с обычными сварочными материалами TIG;
- Гибкость, благодаря возможности выполнять сварку глубокого проплавления и сварные швы с использованием одного и того же оборудования.

Единственный большой недостаток плазменной дуговой сварки – это необходимое оборудование. Источники питания, газовые контроллеры и горелки все сложнее и дороже, а горелки имеют тенденцию быть большими, что затрудняет управление при ручном использовании. Что касается газовой вольфрамовой дуги, плазменные горелки могут использоваться с некоторыми модификациями для резки [1].

На основе вышеизложенного, цель работы заключается в разработке универсальной конструкции плазмотрона, которая будет использоваться как для наплавки, так и для сварки материалов.

## **1. Сведения о плазменных процессах**

### **1.1 Плазма и ее свойства**

Плазма часто считается четвертым состоянием материи. Остальные три – газ, жидкость и твердое тело. Плазма возникает, когда газ нагревается до высокой температуры и превращается в положительные ионы, нейтральные атомы и отрицательные электроны. Когда вещество переходит из одного состояния в другое, требуется скрытое тепло, чтобы превратиться в пар, и аналогичным образом плазменная горелка подает энергию газу, чтобы превратить его в плазму. Когда плазма снова превращается в газ, выделяется тепло. Любая сильноточная дуга состоит из плазмы, которая представляет собой не что иное, как ионизированный проводящий газ. Плазменный газ нагнетается через горелку, окружающую катод. Основной функцией плазменного газа является защита корпуса горелки от экстремального нагрева катода.

Наиболее часто используется аргон и смеси вместе с ним (поскольку они не воздействуют на вольфрамовый или медный катод). Плазменная дуга состоит из плазменного газа электронной дуги и газов, используемых для защиты струйного столба [2].

### **1.2 Классификация методов плазменной сварки**

Существует три различных класса плазменной сварки в зависимости от текущего диапазона:

- Микроплазменная сварка (0,1 – 25 А). Концентрированная дуга позволяет ей оставаться стабильной вплоть до тока около 0,1 А, что означает, что процесс можно использовать для сварки металлов толщиной до около 0,1 мм. Это делает процесс привлекательным, например, для аэрокосмической промышленности.
- Плазменная сварка на средних токах (25 – 150 А). В этом диапазоне метод более непосредственно конкурирует со сваркой TIG. Он подходит для ручной или механизированной сварки и используется в таких областях, как автомоби-

лестроение, для сварки тонколистовых материалов без искажения или недопустимых сварных соединений, как при сварке MIG, или для сварки труб на пивоваренных заводах или молочных заводах.

- Плазменная сварка глубокого проплавления (на больших токах) ( $> 150$  А). Третий тип плазменной сварки получил свое название от «замочной скважины», которая создается, когда стыковые кромки в стыковом сварном шве расплавляются при прорезании через них плазменной струи. Когда струя движется вперед, расплавленный металл прижимается назад, заполняя соединение позади струи.

Основные преимущества плазменной сварки заключаются в том, что метод сварки глубокого проплавления можно использовать для стыковых сварных швов от примерно 3 мм до 7–8 мм. Глубокое проплавление дает гарантию полного проникновения; для сравнения, метод TIG подходит только для стыковых сварных швов толщиной до 3–4 мм. Соединения с более толстыми материалами должны быть подготовлены с V или U соединением, а затем заполнены наполнителем.

Сварка глубокого проплавления не подходит для более тонких материалов толщиной менее 3 мм. В этих обстоятельствах процесс становится намного более похожим на сварку TIG. Снижение расхода плазменного газа до низкого уровня может привести к тому, что плазменная горелка может работать так же, как и обычная горелка TIG, что может быть полезно при изготовлении прихваточных или наплавочных швов. Основным преимуществом по сравнению с обычной сваркой TIG является прежде всего отличная стабильность дуги [3].

### **1.3 Методы получения низкотемпературной плазмы**

Основным способом получения низкотемпературной плазмы, используемой для технологических целей, является создание электрического разряда между электродами в газах. Нейтральные и неионизированные газы обычно не проводят электрический ток, однако при высокой напряженности электрического поля происходит ионизация газа, что является электрическим пробоем. Дело в том, что при прохождении электрического тока через ионизированный газ происходит нагрев газа до состояния термодинамического равновесия.

На данный момент различают 4 типа самостоятельных разрядов: искровой, дуговой, тлеющий, коронный.

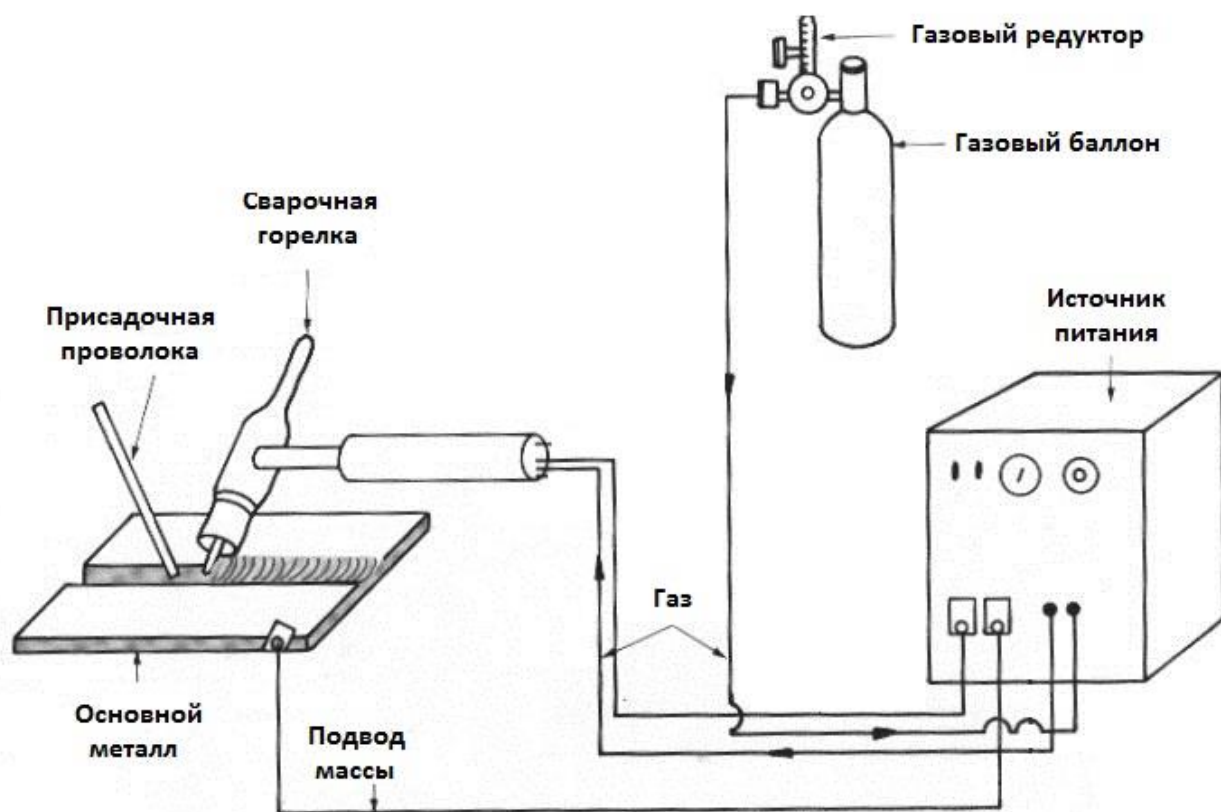
Они изменяются в зависимости от давления газа, конфигурации электродов и параметров внешней цепи.

### **1.4 Оборудование**

Для плазменной сварки/наплавки требуется следующее оборудование:

- сварочная горелка;
- источник питания;
- генератор;
- контрольное оборудование;
- баллоны с газом;
- оборудование для подачи порошка;
- блок водяного охлаждения.





*Рисунок 1 Общая схема сварочного поста*

Здесь применяются те же основные требования, что и к сварке TIG. Плазменные сварочные горелки обычно охлаждаются водой.

### **Источник питания**

В плазменной сварке используется постоянный ток, а для алюминия и алюминиевых сплавов также переменный ток с характеристикой понижения, как и для сварки TIG. Напряжение холостого хода должно быть не менее 80 В.

### **Высокочастотный генератор**

В принципе, назначение высокочастотного генератора такое же, как и при сварке TIG. Однако при использовании в плазменной сварке генератор

обычно не попадает на основную дугу. Вместо этого он поражает вспомогательную дугу как непередаваемую дугу с током, текущим между электродом и плазменным соплом. Другими словами, пилотная дуга может поддерживаться в воздухе. Когда горелка приближается к заготовке, главная дуга зажигается, а вспомогательная дуга гаснет.

### **Контрольное оборудование**

Необходимое контрольное оборудование зависит от того, в какой степени процесс сварки механизирован. Однако обычно автоматически контролируется предварительный и последующий поток защитного газа, генератора и вспомогательной дуги. Часто существует автоматическое управление, чтобы гарантировать, что дуга зажигается в чистом аргоне, после чего подача газа переключается на конкретный газ, который используется.

## **1.5 Виды источников плазмы**

Устройства, с помощью которых возможно создание потоков плазмы с широким диапазоном параметров, делят на два класса:

- плазменные ускорители;
- плазмотроны.

Плазменными ускорителями называют устройства, образующим поток плазмы с высокой плотностью и энергией ионов. Скорость частиц при этом составляет более 195 м/с. Достижение в плазменных устройствах таких высоких значений основных параметров потока определяется тем, что в них ионы, также как в ускорителях заряженных частиц, ускоряются электромагнитным полем.

Под плазмотронами понимают устройства для получения низкотемпературной плазмы, в которых электрическая энергия внешнего источника питания преобразуется в ионизацию частиц рабочего вещества и энергию частиц плазмы. Получаемая в плазмотронах плазма имеет электронную температуру, не превышающую  $10^5$  К, скорость ее частиц обычно не выше  $10^4$  м/с, а энер-

гия ионов не более 10 эВ/нуклон. Вместе с тем высокая плотность частиц может обеспечить передаваемую потоком мощность до 10 МВт.

Для получения плазмы, используемой в технологических целях, применяют плазмотроны, подразделяемые на дуговые и высокочастотные.

В дуговых плазмотронах плазма с требуемыми характеристиками получается при взаимодействии электрического дугового разряда, возбуждаемого между двумя электродами, с подаваемым в зону разряда под давлением плазмообразующим газом. Дуговой плазмотрон постоянного тока состоит из следующих основных узлов: одного электрода (катода) или двух электродов (катода и анода), разрядной камеры и узла подачи плазмообразующего газа. По способу создания плазмы выделяют два типа дуговых плазмотронов: прямого действия с одним электродом и косвенного действия с двумя электродами, рис. 2.

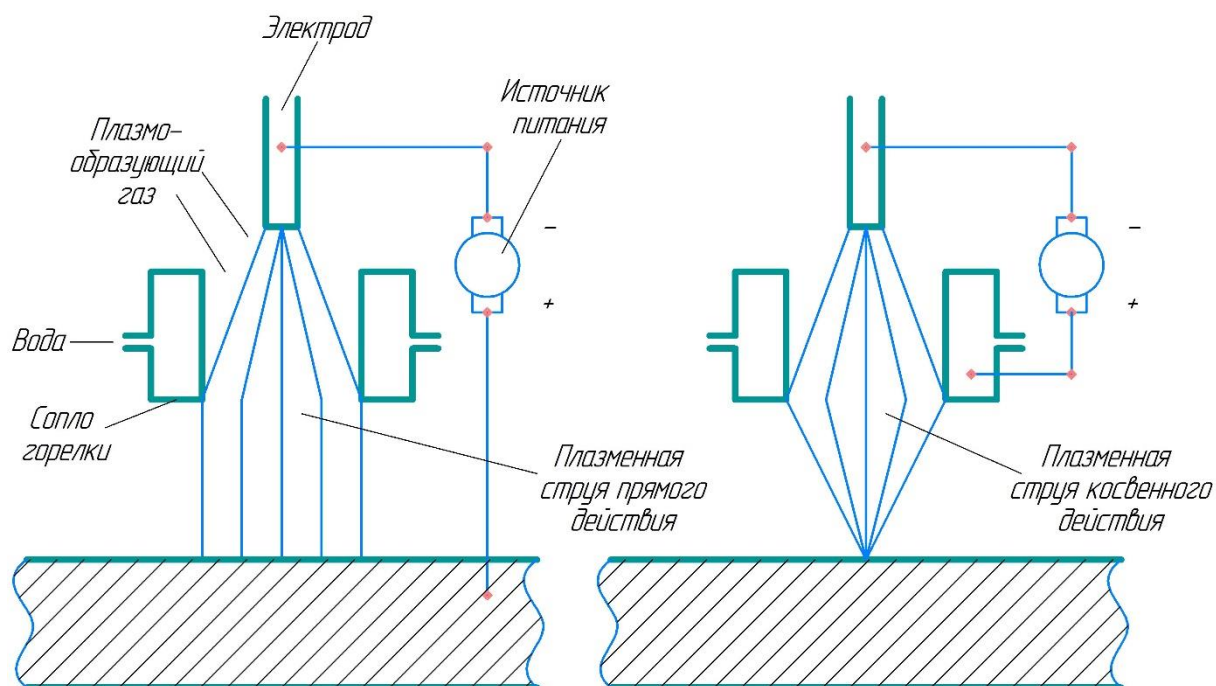


Рисунок 2 Плазменная струя прямого и косвенного действия

В плазмотроне прямого действия электрическая дуга возбуждается и устойчиво горит между катодом плазмотрона и поверхностью заготовки. Работа такого плазмотрона возможна только при электропроводной заготовке, являющейся одним из полюсов (анодом) дугового разряда. Деталь разрядной камеры с отверстием, через которое истекает плазма, называется соплом плазмотрона. Вихреобразный поток плазмообразующего газа продувается через сопло, отделяет электрическую дугу от его стенок и при этом сжимает ионизированную область дуги. Это приводит к повышению плотности потока ионов и, соответственно, повышению температуры в дуговом канале.

Зажигание дуги между катодом и заготовкой в дуговых плазмотронах прямого действия осуществляется в два этапа. Это связано с тем, что постоянного напряжения между заготовкой и катодом недостаточно для первоначального электрического пробоя значительного по длине промежутка между ними. Поэтому на первом этапе осуществляют электрический искровой пробой между катодом и соплом за счёт высоковольтного разряда. В результате ионизации газа между ними зажигается дежурная электрическая дуга, которая ионизирует поток газа, доходящий до заготовки. Только после этого происходит зажигание основной электрической дуги. Питание дежурной дуги после этого отключают.

Обычно в плазмотронах прямого действия, использующих воздух в качестве рабочего газа, катод изготавливают из меди с центральной вставкой из гафния. Катод и вставка интенсивно охлаждаются водой по каналам. Катодное пятно располагается на поверхности гафниевой вставки, которая при высокой температуре покрывается проводящей электрический ток окисной плёнкой, предохраняющей вставку от дальнейшего окисления. За счёт нагрева до высокой температуры поступающего в плазмотрон газа его объём резко увеличивается, и он выходит из сопла плазмотрона со скоростью, многократно превышающей скорость звука (в воздухе 331 м/с).

В плазмотронах косвенного действия дуговой разряд осуществляется между анодом и катодом, являющимися элементами конструкции плазмотро-

на. Дуга электрически не соединяется с обрабатываемым изделием, а плазменный поток выдувается плазмообразующим газом на заготовку. При использовании таких плазмотронов возможна обработка неэлектропроводных материалов, но термический коэффициент полезного действия этих плазмотронов несколько ниже, чем плазмотронов прямого действия. Схема реализации плазменной обработки с использованием плазмотронов косвенного действия получила название плазменной струи.

Воздействие высоких температур на детали плазмотронов требует их интенсивного охлаждения и применения специальных термостойких материалов. Охлаждение обычно осуществляют водой по каналам, а в плазмотронах малой мощности – воздухом.

В процессе работы электроды дуговых плазмотронов разрушаются. Происходит их эрозия, идущая интенсивно при высоких температурах. Даже такие тугоплавкие материалы, как вольфрам и графит, подвергаются при дуговом разряде плавлению и испарению, особенно в зонах эмиссии электронов на катоде (катодных пятнах), где плотность электрического тока достигает  $10^7 \text{ А/см}^2$ , а температура 5000 К.

Плазма дуговых плазмотронов в связи с эрозией электродов содержит частицы вещества электродов. Когда этот процесс по технологическим соображениям полезен, его инициируют (плазмотрон с расходуемыми электродами).

Мощность дуговых плазмотронов составляет  $10^2$ – $10^7$  Вт; температура струи на срезе сопла 25000 – 30000 К; промышленное КПД 50 – 90 %. В качестве плазмообразующих веществ используют воздух,  $N_2$ ,  $Ar$ ,  $H_2$ ,  $NH_4$ ,  $O_2$ .

В основе работы высокочастотных плазмотронов лежит создание высокотемпературных плазменных потоков в переменном электрическом поле. В зависимости от способа возбуждения высокочастотного газового разряда различают индукционные, ёмкостные, факельные и коронные высокочастотные плазмотроны.

Для технологических целей наибольшее распространение получили индукционные высокочастотные плазмотроны. Основными узлами устройства являются разрядная камера, выполненная в виде электрической трубки, система подачи рабочего вещества, источник высокочастотного электропитания, индуктор, подключённый к этому источнику энергии. Индукционный высокочастотный плазмотрон является безэлектродным разрядным устройством, в котором плазмообразующий газ нагревается вихревыми токами. Механизм ионизации атомов и молекул в нём, как и в дуговом плазмоне, определяется столкновениями с электронами. Отсутствие в разряде неоднородностей, характерных для дугового плазмона (катодные, анодные пятна и др.) делают высокочастотный разряд более стабильным. Сам разряд представляет собой плазму с неравномерным распределением температуры и проводимости по её объёму.

Температура в центре разрядной камеры высокочастотного плазмона и на начальном участке плазменной струи достигает 104 К, а скорость истечения плазмы –  $10^3$  м/с. Мощность потока может составлять 106 Вт, а КПД преобразования энергии для разных высокочастотных плазмон достигают 50 – 80 % [4].

В таких плазмонах, как и в рассмотренных выше дуговых плазмонах, для термоизоляции разряда используется «закрутка» дополнительного газового потока. Газ подаётся в разрядную камеру по спиральным каналам, в результате чего образуется газовый вихрь, обдувающий столб дуги и генерируемую плазменную струю. Это позволяет применять для изготовления разрядной камеры плазмона материал со сравнительно низкой термостойкостью.

В высокочастотных плазмонах могут быть использованы любые рабочие газы, в том числе и агрессивные. Поэтому плазмотроны этого типа нашли применение в основном в технологиях плазмохимии при создании новых веществ в химических реакциях, протекающих при очень высоких температурах.

Очень близкими к индукционным высокочастотным плазмотронам по принципу получения плазмы и устройству являются сверхвысокочастотные плазмотроны. Преимущество сверхвысоких частот в основном связано с более высоким коэффициентом поглощения их в плазме. В этой связи эффективная передача энергии электромагнитного поля в плазму происходит уже при температуре около 4000 К. Кроме того, использование сверхвысокочастотных плазмотронов позволяет получать сильно неравновесную плазму при давлениях, близких к атмосферному.

Принцип работы высокочастотного ёмкостного плазмотрона основан на ёмкостной связи источника питания с проводящей зоной разряда между электродами. Передача энергии в зону разряда с образованием плазмы осуществляется с помощью ёмкостного тока, подаваемого на обкладки конденсатора. Образование плазменной струи осуществляется продувкой плазмообразующего газа [5].

## 1.6 Газы для плазменной сварки

Обычно один и тот же газ используется как для плазмы, так и для защитного газа. Это исключает риск изменений в плазменной струе при использовании двух разных газов или газовых смесей.

Таблица 1 Свойства газов [6]

Наименование газа	Химическая формула	Плотность (плотность воздуха = 1,293), кг/м <sup>3</sup>	Плотность относительно плотности воздуха	Точка кипения при 0,101 МПа, °С	Реакционная способность при сварке
Аргон	<i>Ar</i>	1,784	1,380	-185,9	Инертный
Гелий	<i>He</i>	0,178	0,138	-268,9	Инертный
Двуокись углерода (Углекислый газ)	<i>CO<sub>2</sub></i>	1,977	1,529	-78,5	Окислитель

кислый газ)					
Кислород	$O_2$	1,429	1,105	-183,0	Окислитель
Азот	$N_2$	1,251	0,968	-195,8	Малоактивный
Водород	$H_2$	0,090	0,070	-252,8	Восстановитель

Из ГОСТ Р ИСО 14175–2010 самыми часто используемыми газами для образования плазмы и защитного газа обычно используется смесь аргон/ водород. Однако водород нельзя использовать в качестве компонента при сварке мягкой стали или химически активных металлов, таких как алюминий, титан или цирконий. Чистый аргон или смеси аргон / гелий хорошо подходят для сварки мягкой стали и химически активных металлов, для которых нельзя использовать водород или азот.

Смеси аргон/гелий/азот используются при сварке дуплексных нержавеющей сталей, так как они содержат азот при легировании. Чистый гелий не подходит, так как возникающие в результате высокие тепловые потери в плазменном газе существенно уменьшают срок службы плазменной горелки.

Смеси аргон/гелий приводят к увеличению энергии в плазменной струе при постоянном токе. Однако смесь должна содержать не менее 50% гелия, если необходимо отметить какое-либо существенное различие. Смеси, содержащие более 75% гелия, имеют те же характеристики, что и чистый гелий.

### 1.7 Характеристики плазменного источника

Основными характеристиками плазменного источника энергии являются его эффективная тепловая мощность, рассчитываемая как отношение количества теплоты, вводимой в основной металл, ко времени ввода и коэффициент сосредоточенности, характеризующий распределение удельного теплового потока по поверхности обрабатываемого изделия.

При использовании в качестве источника энергии плазменной струи часть энергии дополнительно расходуется на нагрев анода-сопла. В этом случае значение величины меньше, чем для плазменной дуги. Поэтому с энерге-



тической точки зрения рациональнее использовать плазменную дугу. Высоко-частотные плазмотроны, как правило, имеют худшие энергетические характеристики по сравнению с дуговыми и соответственно меньшие значения термического КПД.

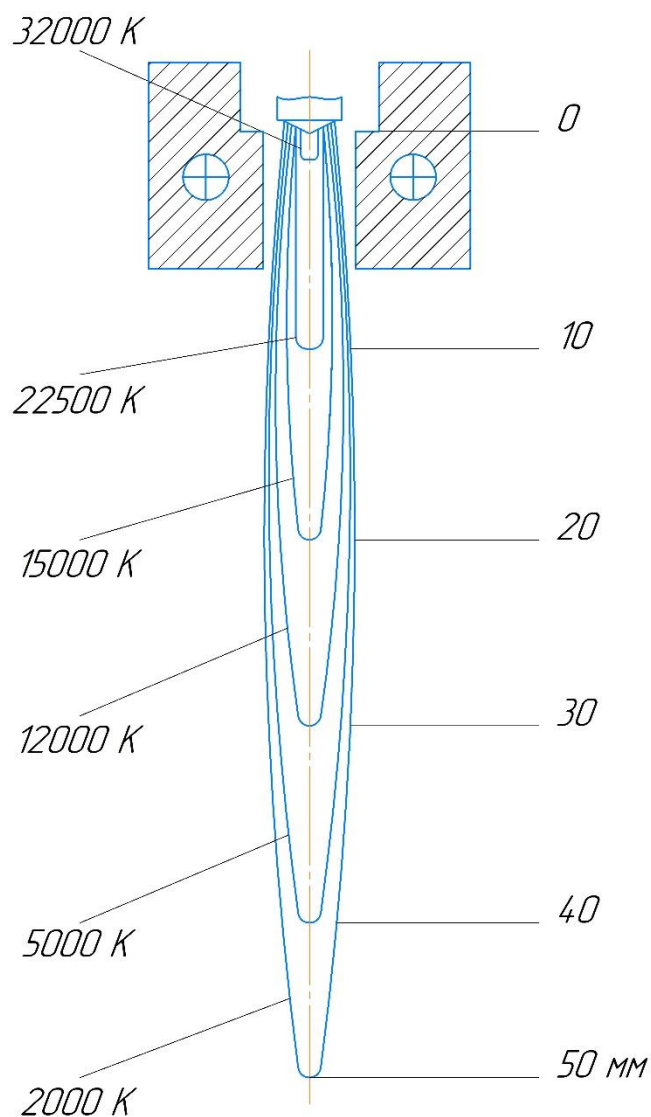


Рисунок 3 Распределение температуры в плазменной дуге

Максимальная температура наблюдается в центре на оси плазменного потока, причём она значительно выше, чем у электрической дуги, которая свободно горит в воздухе и не подвергается каким-либо специальным воздействиям, ускоряющим процесс её угасания. Плотность теплового потока для

плазменных источников энергии также выше, чем для открытой дуги. Нагрев газа в плазмотроне приводит к резкому уменьшению его плотности. За счёт этого скорость истечения газа из сопла увеличивается, достигая максимума в центре потока.

Большая скорость потока плазмы при выходе его из плазмотрона позволяет получать значительный газодинамический напор, который растёт с увеличением силы тока. Этот напор плазмы может быть использован в различных технологических целях, например, выдувания расплавленного материала из зоны обработки.

## 2. Плазменная наплавка

### 2.1 Способы плазменной наплавки

В настоящее время разработаны и широко применяются в промышленности различные способы наплавки металлов, рис. 4. При наплавке однородных металлов путем применения проволок и флюсов соответствующего состава удастся получить металл наплавки такого же состава, что и основной металл и соответственно свойства соединения, аналогичные свойствам основного металла. Способ наплавки в этом случае практически не оказывает влияния на свойства соединения. Поэтому при наплавке стремятся применять такие способы, которые, обеспечивая качество соединения, в то же время обеспечивают максимальную производительность и эффективность процесса.

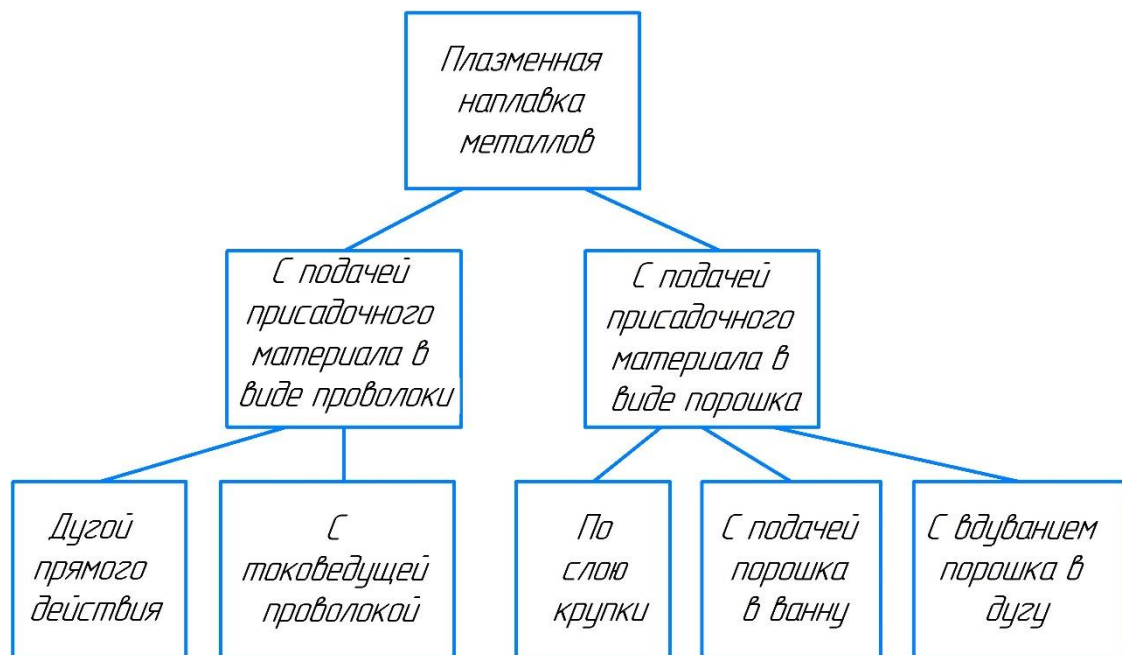


Рисунок 4 Способы плазменной наплавки

При необходимости наплавки на изделие металлов, отличных по химическому составу и теплофизическим свойствам от основного металла, задача получения качественного соединения усложняется. Это вызвано тем, что при

соединении разнородных металлов в результате перемешивания основного и наплавляемого металлов, растворения твердого основного металла в жидком металле сварочной ванны и диффузионных процессов на межфазной границе в металл наплавки переходит значительная доля основного металла. Высокое содержание доли основного металла в металле наплавки, как правило, недопустимо, и наплавку приходится осуществлять в 4 – 6 и более слоев для обеспечения необходимой чистоты наплавленного слоя. Это вызывает весьма значительное удорожание наплавленных изделий и, как правило, не обеспечивает их необходимых свойств [7].

Высокая тепловая мощность, стабильность дугового разряда, возможность регулирования теплового воздействия и высокая температура плазменной струи позволяют эффективно использовать плазменную обработку при наплавке на поверхность изделия как тонких, так и толстых слоев материала. Обычно толщины наплавки составляют от десятых долей миллиметра до 10 миллиметров и выполняются наплавкой одного или нескольких слоёв.

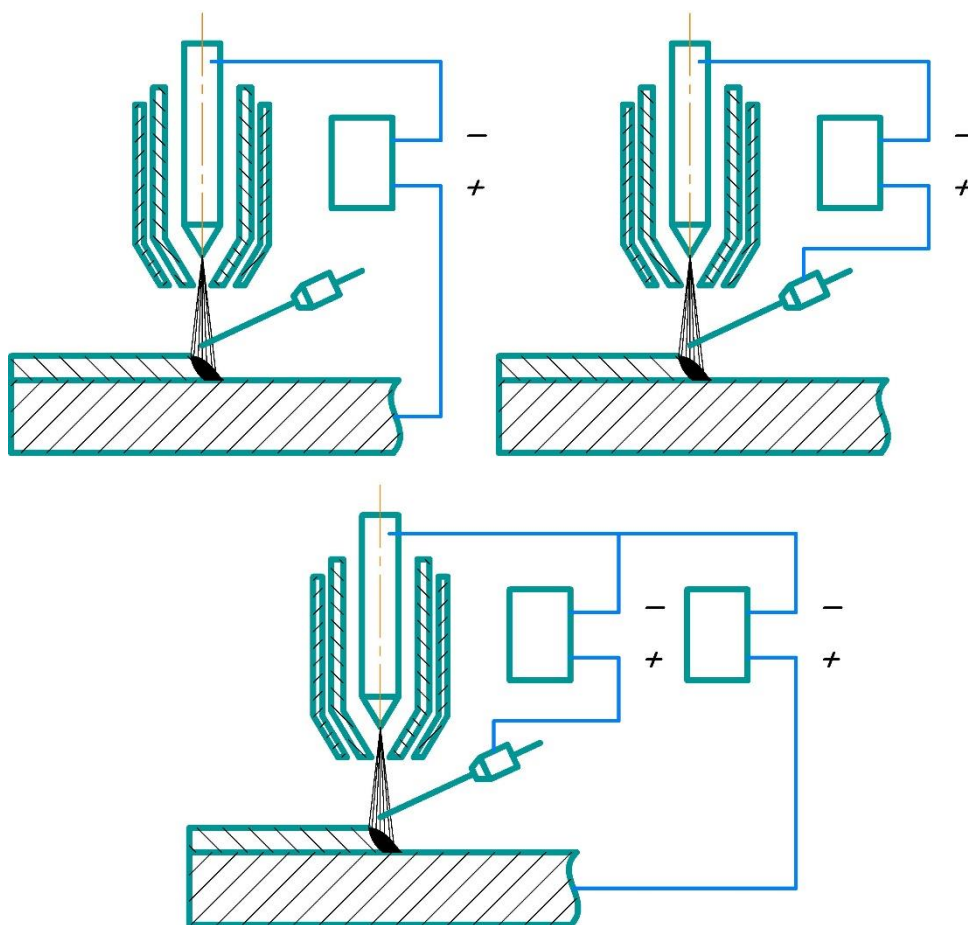
Плазменная наплавка может осуществляться по схемам прямого действия, косвенного действия и комбинированным способом. В некоторых случаях реализуются также схемы наплавки с плавящимся электродом.

Плазменная наплавка прямого действия осуществляется зажиганием дуги между катодом плазмотрона и электропроводной заготовкой. При зажигании плазменной дуги между катодом плазмотрона и присадочным материалом возможно плавление любого тугоплавкого материала и достигается меньшее проплавление материала исходного изделия, чем при реализации схемы прямого действия. Реализация комбинированного способа наплавки даёт возможность более тонкой регулировки степени проплавления основного материала и толщины наплавляемого слоя, рис. 5.

Поток защитного газа предохраняет наплавляемый материал от окисления. В качестве защитного и плазмообразующего газов используют инертные газы, чаще всего аргон и азот. При наплавке стали в качестве плазмообразующего газа в некоторых случаях используют углекислый газ. При этом способе

обычно реализуется глубокое проплавление материала заготовки, что допустимо при наплавке материала однородного с основным металлом, например, при ремонте изделия. Для снижения глубины проплавления основного материала уменьшают мощность плазменной дуги. Но при этом неизбежно падает производительность процесса.

Процессы плазменной наплавки могут быть весьма эффективными при ремонте и восстановлении поверхностей изношенных деталей машин, для получения биметаллических изделий, характеризующихся тем, что на поверхности детали создаются зоны, обладающие специфическими свойствами, отличными от свойств основного материала, например, зоны с повышенной износостойкостью, химической устойчивостью, жаростойкостью, электропроводностью, твёрдостью.



*Рисунок 5 Схемы плазменной наплавки*

## 2.2 Основы плазменной наплавки

В получаемых наплавкой изделиях образуется соединение между основным металлом и металлом наплавки. При этом только незначительная доля основного материала растворяется в присадочном материале. Так, при наплавке нержавеющей аустенитной стали на конструкционную сталь глубина расплавленного слоя основного материала не превышает 0,6 мм. Это практически не оказывает влияние на свойства наплавленного слоя, и уже в первом наплавленном слое его свойства незначительно отличаются от свойств наплавленного металла.

Наплаваемый материал используется в виде проволоки, ленты или порошка. Если материал подаётся в зону плазменной струи в виде порошка, то такой процесс обычно реализуется по схеме плазменного напыления.

Плазменная наплавка материала может производиться как на плоские поверхности и поверхности тел вращения, так и на поверхности более сложных пространственных форм. Форма наплаваемой поверхности определяет виды движений обрабатываемой заготовки, параметры расположения плазмотрона относительно заготовки и режимы обработки.

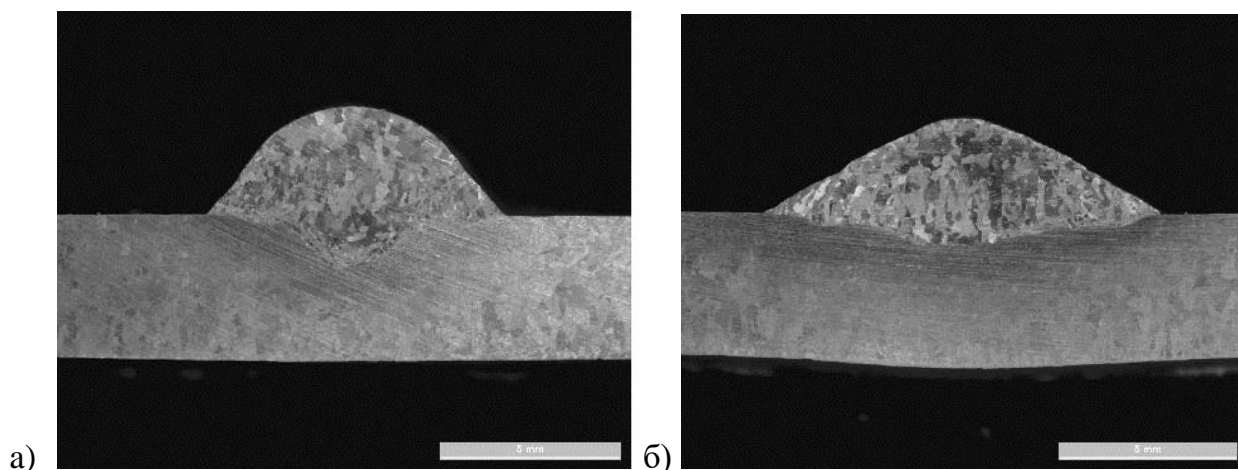
Для реализации процесса наплавки поток плазменной струи и капель расплавленного металла направляется перпендикулярно наплаваемой поверхности. Расплавленный присадочный металл должен попадать только в расплавленную на поверхности основного металла ванну. Рекомендуется для получения равномерного по толщине наплавленного слоя производить процесс наплавки при поперечных (перпендикулярно оси наплавочного шва) колебаниях потока расплавленного металла.

## 2.3 Качество наплавки

Выделяют следующие основные показатели качества наплавки:

- высота наплавки;
- ширина валика;
- глубина проплавления основного металла;
- твёрдость наплавленного металла;
- наличие трещин в наплавленном металле;
- несплавление основного и присадочного материалов;
- коэффициент использования наплавляемого материала;
- напряжение и деформации конструкции.

В связи с тем, что наплавленный слой необходимо подвергать механической обработке, наплавка лишнего металла нецелесообразна. Следует стремиться к тому, чтобы припуски на обработку не превышали 1,5 – 2 мм, а после наплавки поверхность была бы достаточно ровной, без значительных наплывов и провалов между валиками.



*Рисунок 6 Макрошлиф: а) наплавки импульсной дугой, б) наплавки короткой дугой*

Наличие поперечных колебаний плазменной головки относительно наплавляемой поверхности позволяет получить плавный переход от металла

наплавки к основному материалу и успешно сплавлять валики наплавки между собой и с основным металлом при необходимости получения широкого слоя наплавки. Амплитуда колебаний устанавливается в зависимости от необходимой ширины валика и может находиться в пределах 10 – 50 мм. При этом частоту колебаний выбирают так, чтобы капли присадочного материала попадали только в жидкую ванну и валик по ширине не разрывался на отдельные части.

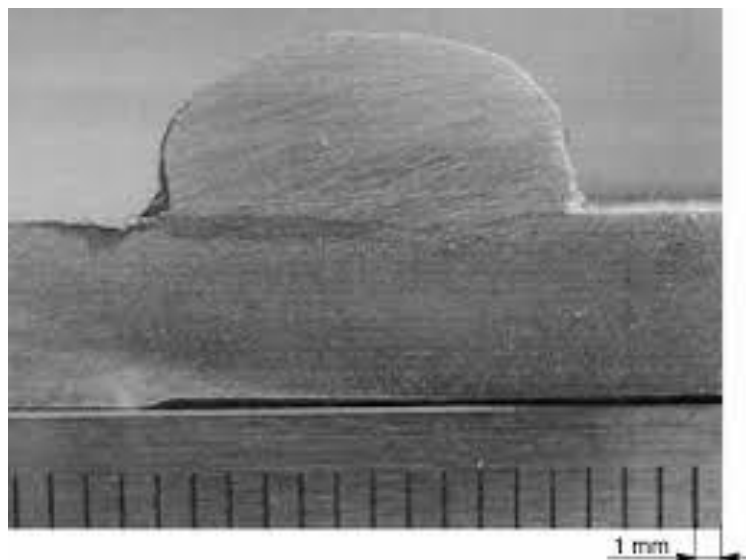
Скорость подачи проволоки оказывает большое влияние на характер переноса металла в сварочную ванну. Так как дуговой разряд горит независимо от изделия, то характер переноса металла легко регулируется увеличением скорости подачи проволоки. Различают мелкокапельный и крупнокапельный виды переноса. Увеличение скорости подачи проволоки при неизменной тепловой мощности источника питания приводит к уменьшению напряжения на электродах и резкому увеличению силы тока. Именно эти процессы приводят к уменьшению размера капель расплавленного присадочного металла и увеличению частоты их переноса. При наплавке желательно, чтобы характер переноса был крупнокапельным.

Расстояние от присадочной проволоки до изделия очень сильно влияет на эффективную тепловую мощность источника теплоты: с уменьшением этого расстояния эффективная тепловая мощность, а следовательно, и нагрев поверхности основного металла увеличиваются. Это приводит к повышению доли элементов основного металла, переходящего в металл наплавки. Однако при чрезмерном уменьшении расстояния от присадочной проволоки до изделия ухудшатся газовая защита зоны наплавки из-за образования высокой турбулентности потока в результате подсоса воздуха. Увеличение расстояния более 25 мм приводит к резкому ухудшению газовой защиты, вызывая дефекты в металле наплавки.

При плазменной наплавке порошком большое значение имеет размер зерна порошка, особенно в случае наплавки с вдуванием порошка в дугу. Слишком крупные зерна порошка могут недостаточно проплавляться в плаз-



менной струе и попасть на подложку в твердом состоянии. Мелкие зерна коагулируются и могут забивать шланги горелки или даже спекаться между собой в сопле горелки.



*Рисунок 7 Макрошлиф наплавки покрытым электродом*

Выбор скорости наплавки определяется принятыми электрическими параметрами режима наплавки, углом наклона плазменной головки к изделию, расстоянием от торца присадочной проволоки до поверхности основного металла, а также качеством подготовки основного металла к наплавке. Оптимальной можно считать такую скорость наплавки, при которой капли перегретого жидкого металла присадочной проволоки попадают в ванну жидкого металла, перемещающуюся по поверхности изделия, на расстоянии 2 – 3 мм от головной части ванны. При уменьшении скорости наплавки увеличивается нагрев поверхности основного металла и длительность контактирования твердой и жидкой фаз, что приводит к увеличению содержания примесей основного металла в металле наплавки. Слишком большая скорость ведет к нарушению формирования поверхности и к неравномерной по длине толщине наплавленного слоя.

Диаметр токоведущей присадочной проволоки в принципе может быть любым. С увеличением диаметра присадочной проволоки можно обеспечить крупнокапельный перенос металла, а, следовательно, и меньший перегрев основного металла при более высоких значениях сварочного тока, чем применяемых при наплавке тонкими проволоками. Кроме того, с увеличением диаметра присадочной проволоки повышается КПД процесса наплавки, так как более полно используется тепло плазменного факела, увеличивается скорость наплавки, повышается коэффициент расплавления.

Качество наплавленного слоя во многом зависит от подготовки поверхностей основного материала и присадочной проволоки, которые не должны иметь следов загрязнений, ржавчины. Для этого присадочная проволока подвергается очистке химическим травлением, а наплавляемую поверхность рекомендуется механически обрабатывать и обезжировать. Металлы, покрытые окислами, смачиваются, как правило, очень плохо. Поэтому для обеспечения необходимых условий смачивания поверхности жидким металлом изделие должно быть тщательно очищено от плёнки окислов, всегда имеющих на его поверхности.

### 3. Конструкции плазмотронов для сварки и наплавки

В процессе работы было изучено несколько видов плазмотронов, что позволило разобраться в конструкционных узлах плазмотронов различного назначения.

ОБ–1115 и ОБ–1160А были разработаны в ИЭС имени Е.О. Патона. Конструкции этих плазмотронов примерно одинаковы, их различие заключается в размерах каналов для охлаждающей воды, в форме токопроводящего сопла, конструкции выводов и в некоторых других незначительных деталях.

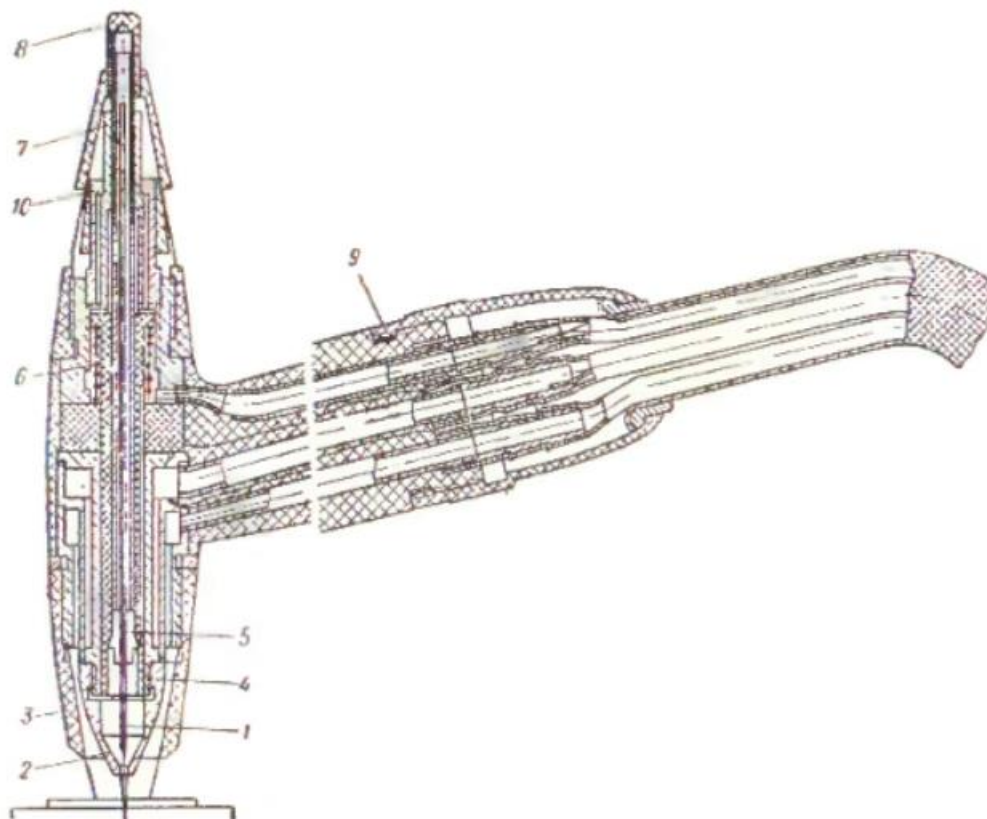
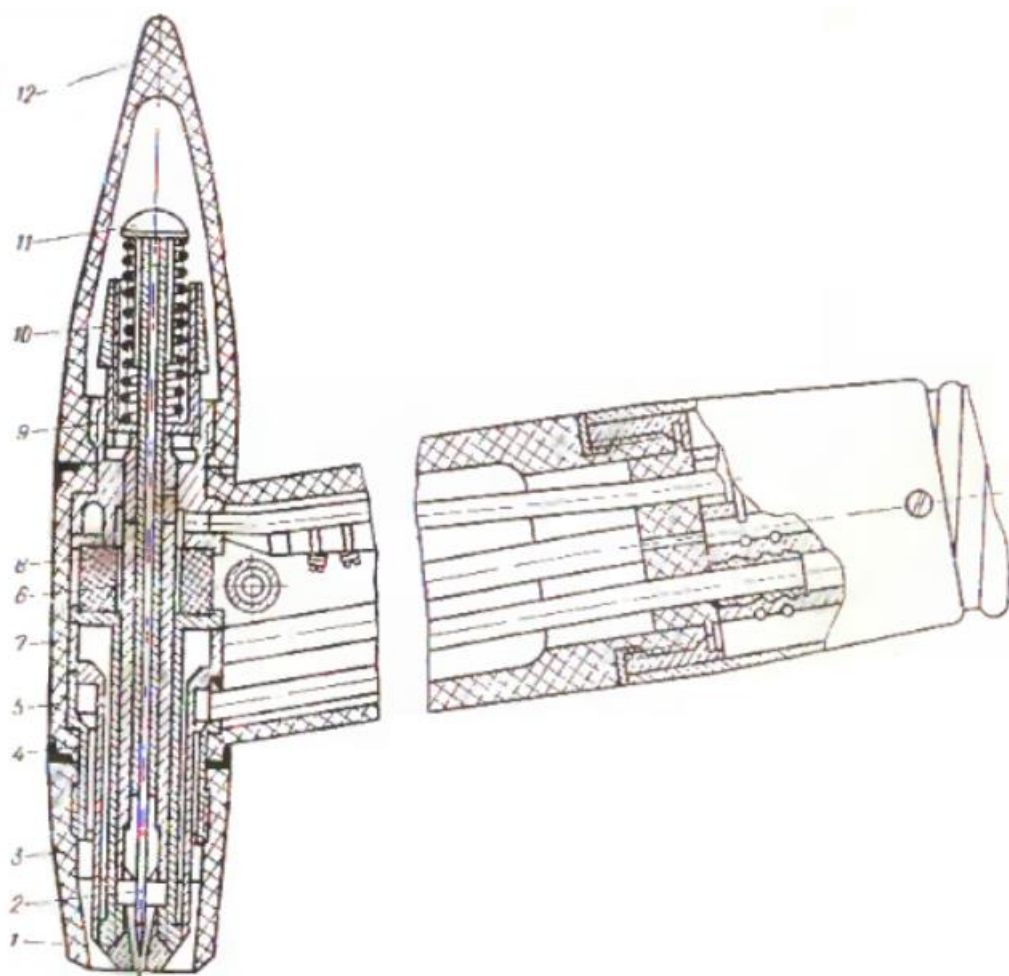


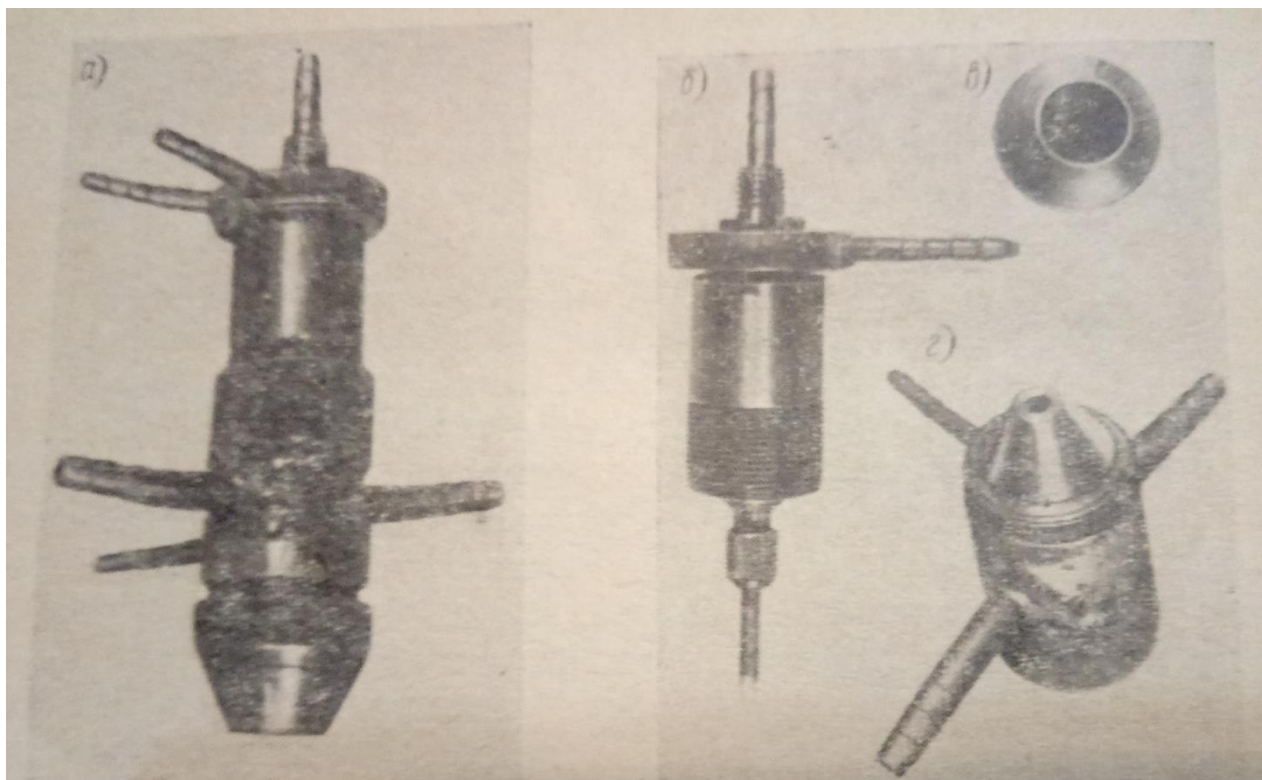
Рисунок 8 Микроплазменная горелка ОБ–1115[8]



*Рисунок 9 Микролазменная горелка ОБ–1160:*

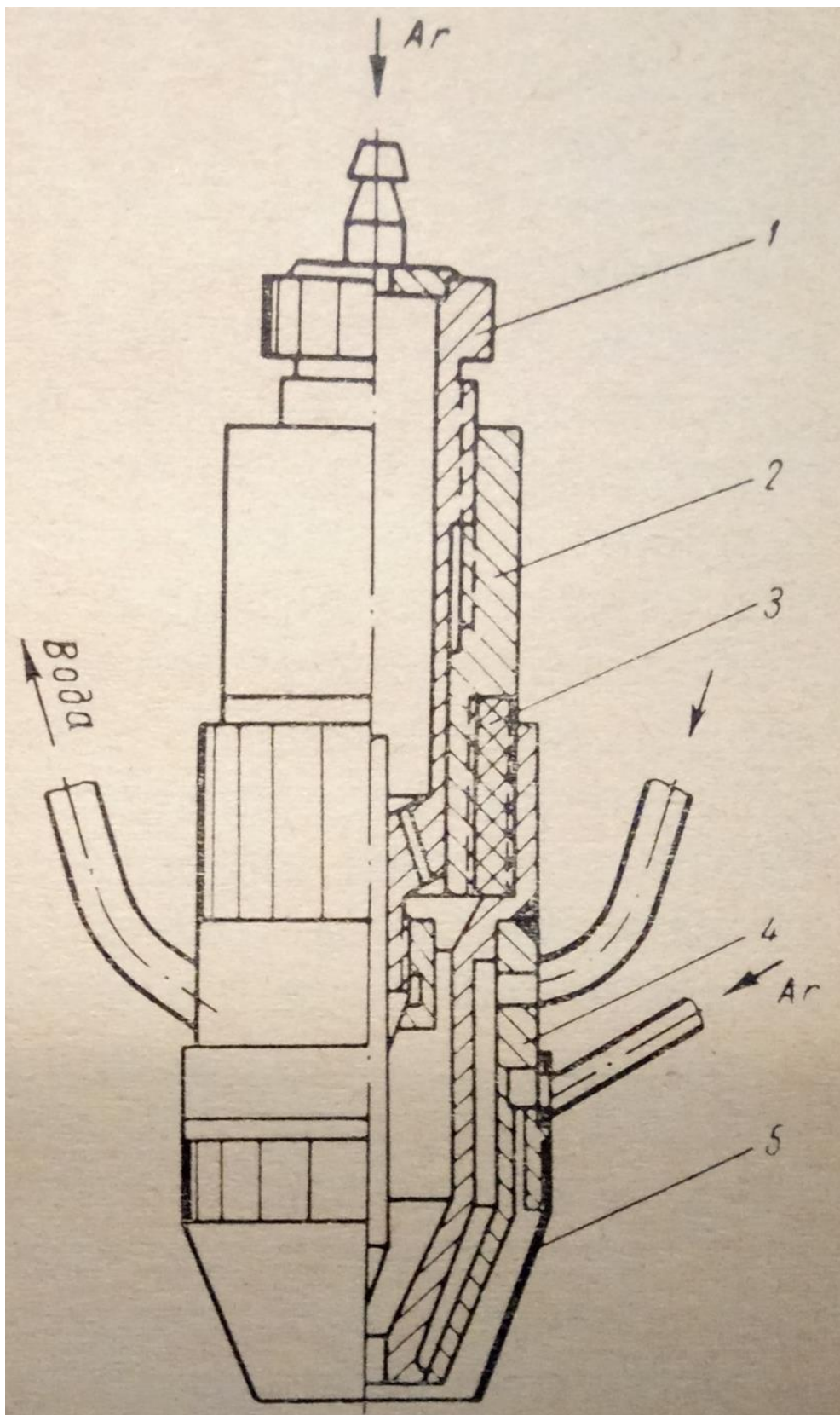
*1 – наконечник; 2 – электрод; 3 – сопло; 4 – каркас; 5 – пластмассовый наконечник; 6 – керамическая втулка; 7 – корпус; 8 – шайба; 9 – каркас верхний; 10 – гайка; 11 – цанга; 12 – колпачок [8]*

Плазменная головка ИМЕТ–107 выполнена по схеме с совмещенным каналом и соплом. Водоохлаждаемое сопло-канал изготавливается из красной меди или жаропрочного медного сплава, остальные детали головки из латуни. Цельнопаяное сопло-канал позволяет сделать головку наиболее простой, надежной в работе и удобной для осуществления качественной защиты сварочной ванны от атмосферы воздуха.



*Рисунок 10 Плазматрон ИМЕТ–10:*

*а) – общий вид плазматрона в сборе; б) – электрододержатель; в) – сопло для подачи защитного газа; з) – водоохлаждаемое сопло-канал [9]*



*Рисунок 11 Конструкция плазменной головки ИМЕТ-107:*

*1 – электрододержатель; 2 – корпус; 3 – изолирующая втулка; 4 – водоохлаждаемое сопло-канал; 5 – сопло для подачи защитного газа [9]*

Следующий плазмотрон был разработан в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Пермский государственный технический университет". Его использование возможно как для сварки, так и для резки.

Технический результат изобретения заключается в обеспечении интенсивного охлаждения теплонагруженных элементов плазмотрона при упрощении конструкции и исключении возможности двойного дугообразования в процессе эксплуатации.

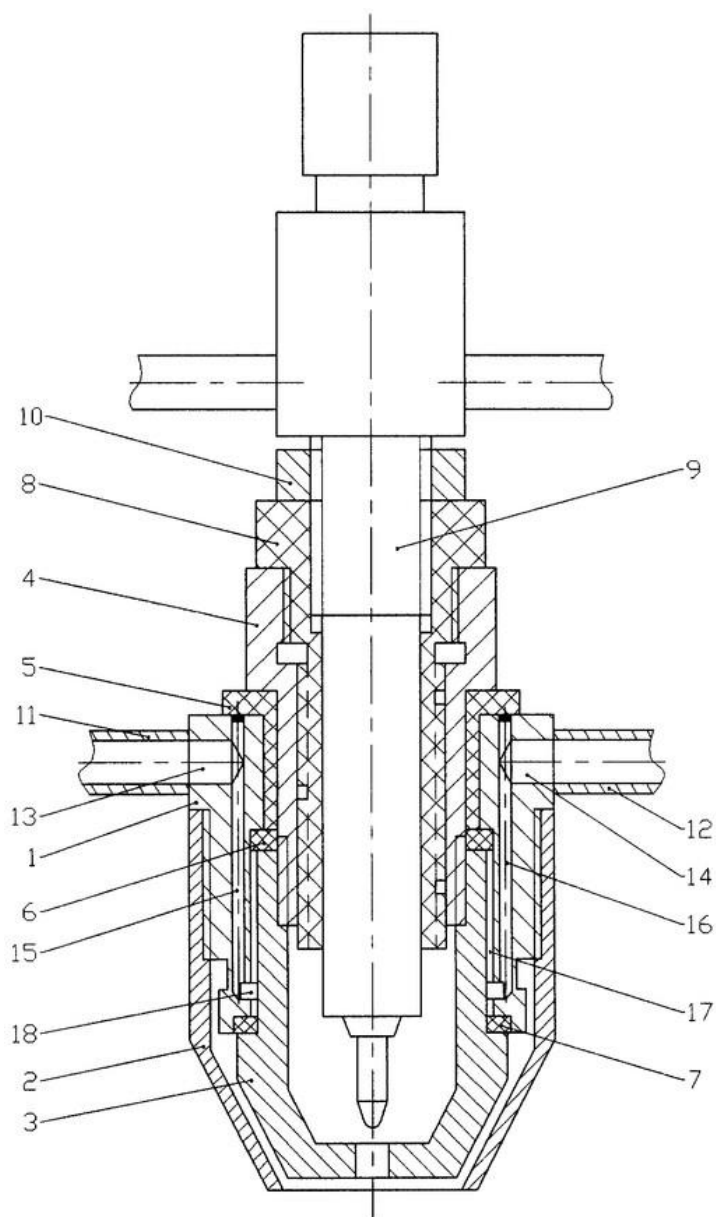


Рисунок 12 Общий вид плазмотрона с продольным разрезом по системе подвода и отвода охлаждающей жидкости [10]

Плазмотрон состоит из корпуса 1, установленного на нем при помощи резьбового соединения защитного сопла 2, размещенного в корпусе 1 плазмообразующего сопла 3, которое закрепляется винтом 4 и электрически изолируется от корпуса 1 втулкой 5 и изоляторами-уплотнителями 6 и 7, при этом обеспечивается электрическая изоляция плазмообразующего сопла 3 от защитного сопла 2. В винт 4 установлен на резьбе изолятор 8, выполненный, например, из фторопласта. В изоляторе 8 размещен на резьбе электродный узел 9, имеющий автономную систему охлаждения (на схеме не показана), электродный узел 9 фиксируется контргайкой 10. Корпус 1 имеет штуцера 11 и 12 и радиальные каналы 13 и 14 для подвода и отвода охлаждающей жидкости системы охлаждения плазмообразующего сопла, диаметрально противоположные и параллельно расположенные каналы 15 и 16, засверленные с торца корпуса 1, а затем заглушенные, и кольцевой канал 17, охватывающий плазмообразующее сопло 3 вблизи теплонагруженной зоны. Каналы 15 и 16 нижними концами выходят в проточку 18, выполненную в корпусе 1, соединяющуюся с нижней частью кольцевого канала 17. Корпус 1 имеет штуцер 19 и каналы 20 и 21 для подачи защитного газа под защитное сопло 2. Винт 4 снабжен штуцером 22 и каналом 23 для подвода плазмообразующего газа, на внешней цилиндрической поверхности изолятора 8 выполнена винтовая проточка 24, которая при установке изолятора 8 в винт 4 образует винтовой канал для тангенциальной подачи плазмообразующего газа в плазмообразующее сопло 3 [10].



Общество с ограниченной ответственностью "ПЛАЗМА" разработала портативный плазмотрон для напыления и наплавки покрытий.

Портативный плазмотрон для напыления и наплавки покрытий содержит корпус с установленным на нем питателем в сборе с дозатором, резервуар для приема пара, сопло-анод и катод, размещенный в электроизоляционной трубке с помощью контактно-крепежных элементов, установленной внутри теплопроводной трубки, контактирующей с соплом-анодом и проходящей через резервуар для приема пара, на аналогичных контактно-крепежных элементах, с возможностью перемещения катода вручную и автоматической поднастройки его положения относительно сопла-анода с помощью специального механизма, представляющего собой мотор-редуктор механизма сервопривода катода [11].

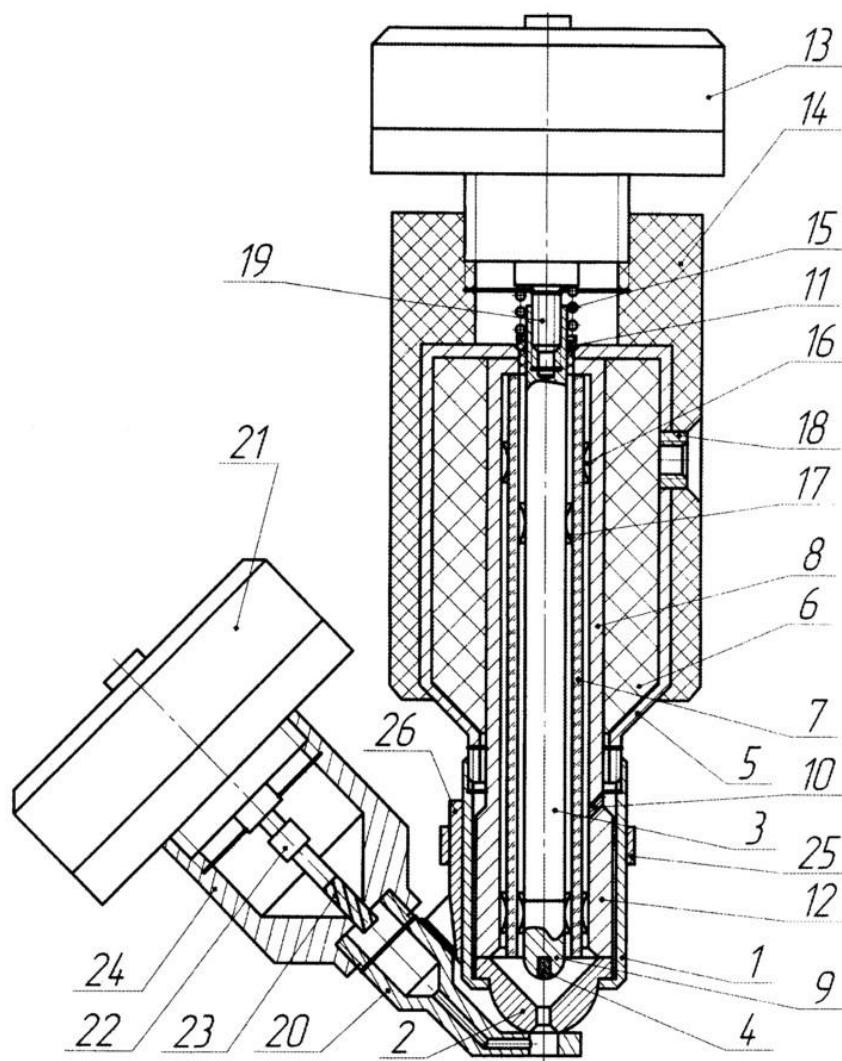


Рисунок 13 Портативный плазмотрон для напыления и наплавки покрытий [11]

Такая конструкция портативного плазмотрона для напыления и наплавки покрытий позволяет обеспечить равномерную подачу порошка при осуществлении процессов напыления или наплавки, существенно снизить время прогрева горелки перед началом работы и повысить продолжительность установившегося режима работы.

В исследовательском центре имени М.В. Келдыша разработали плазменную горелку для обработки материалов, в частности для нанесения покрытий.

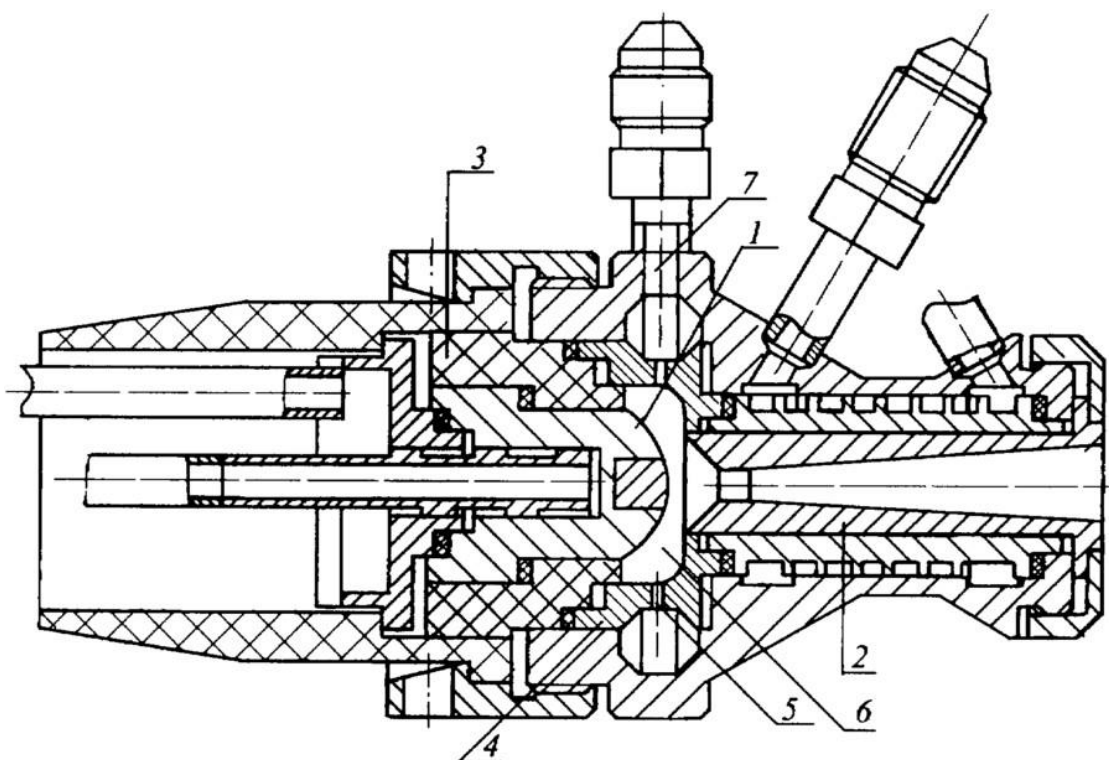


Рисунок 14 Сечение плазмотрона для нанесения порошковых материалов [12]

Задачей предлагаемого изобретения является повышение эффективности нагрева и увеличение коэффициента использования порошка с одновременным упрощением конструкции плазмотрона и улучшением эксплуатационных и физико-механических характеристик покрытий, а также качества покрытий путем повышения прочности сцепления покрытия с основой [12].

## **4. Разработка конструкции плазмотрона для сварки и дуговой наплавки**

### **4.1 Требования к разрабатываемому плазмотрону**

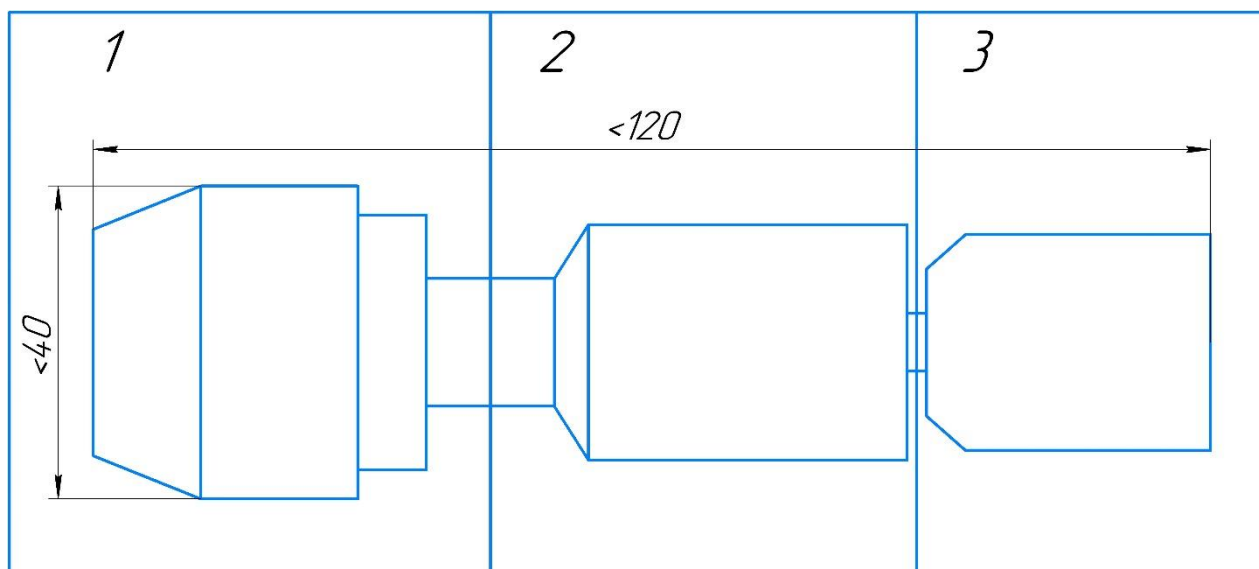
Плазмотрон, как специальная сварочная горелка является в конструктивном отношении достаточно сложным устройством. Из-за содержания деталей, работающих в условиях высоких температурных нагрузок, требующих интенсивного охлаждения в процессе сварки/наплавки, а так же влияние формы плазмообразующего узла на защитные свойства, плазмотрон является такой сложной конструкцией.

Требования, которым должна соответствовать разрабатываемая горелка:

- Термически нагруженные элементы должны иметь максимальную теплопроводность;
- Плазмообразующий узел должен иметь при постоянной площади поверхности максимально возможный объем;
- Отсутствие смещений плазмообразующего узла относительно расчетного положения;
- Отсутствие изломов поверхностей в проточной части;
- Применяемый электрододержатель должен обеспечивать надежную центровку неплавящегося электрода;
- Отсутствие явления двойного дугообразования;
- Соответствие определенным габаритным размерам (не более 120x40x40);
- Использование на больших токах (300А);
- Возможность производить замену электрода на медный и вольфрамовый;
- Возможность использования, как для сварки, так и для наплавки;
- Наличие в конструкции двойного водяного охлаждения расположенного в разных частях плазмотрона.

## 4.2 Разработка конструкции прототипа

Изначально необходимо разбить конструкцию на важные составные части, которые должны присутствовать в разрабатываемом плазмотроне. Вышло 3 основных узла: плазмообразующий узел, узел электрододержателя, узел дополнительного водяного охлаждения.



*Рисунок 15 Эскиз разрабатываемого плазмотрона, основные узлы: 1. Плазмообразующий узел; 2. Узел электрододержателя; 3. Узел дополнительного водяного охлаждения.*

Все чертежи, 3D элементы конструкции и сборка готовых частей была выполнена с помощью программы «КОМПАС 3D». Данная программа используется во многих вузах и предприятиях. С помощью нее появляется возможность освоить твердотельное и поверхностное моделирование 3D объектов.

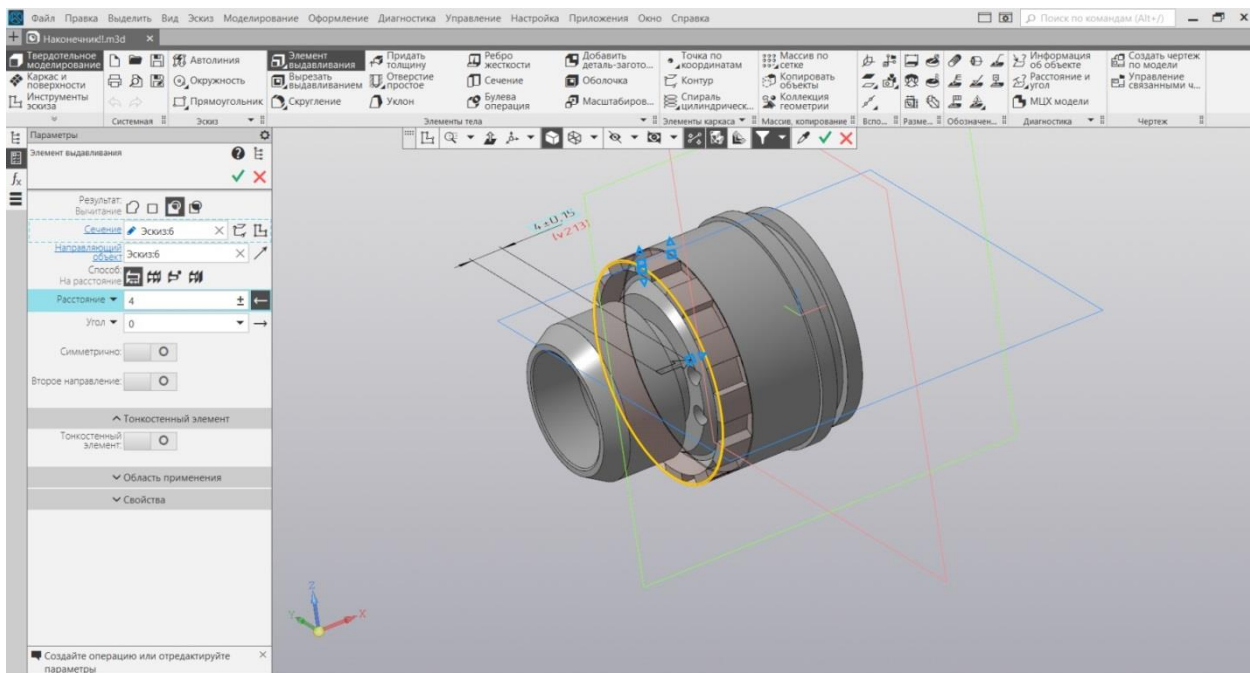


Рисунок 16 Скриншот из программы «Компас 3D»

В результате проектирования плазмотрона были достигнуты требования, которым должна соответствовать разрабатываемая горелка.

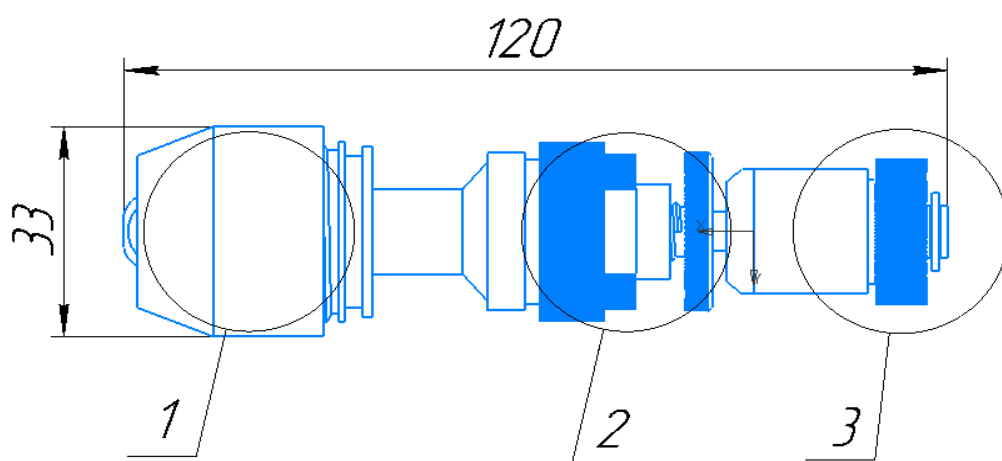
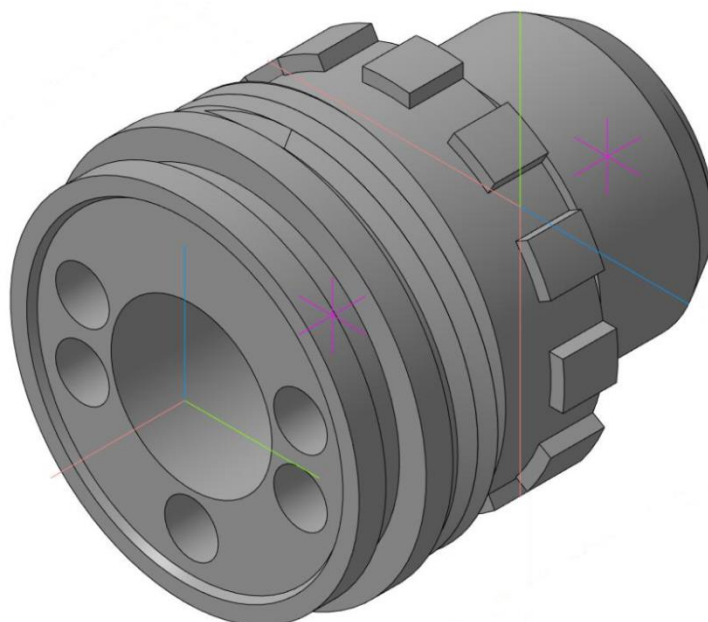


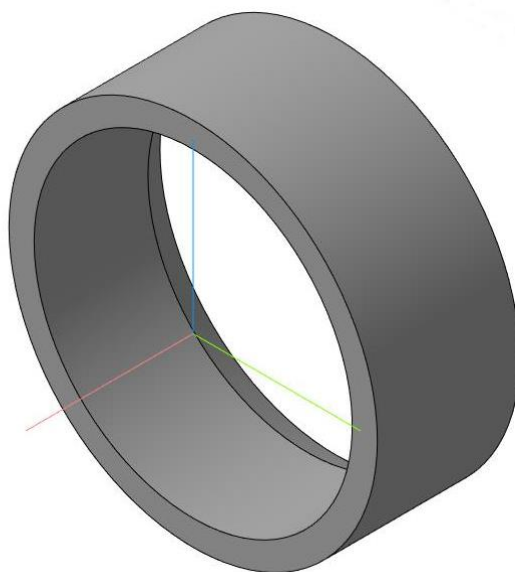
Рисунок 17 Габаритный чертёж, с основными узлами конструкции: 1. Плазмообразующий узел; 2. Узел электрододержателя; 3. Узел дополнительного водяного охлаждения.

### 4.3 Элементы конструкции

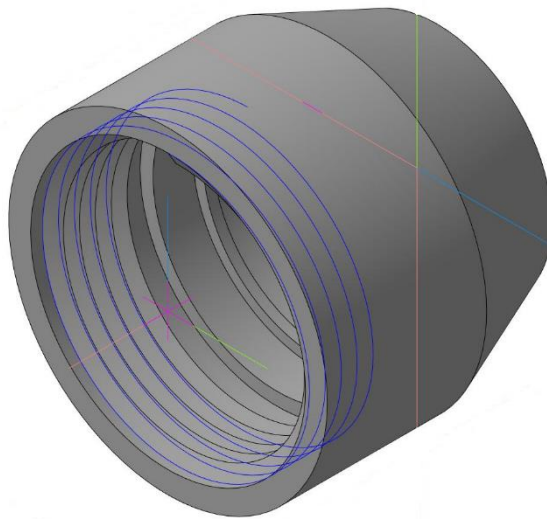
Данная конструкция состоит из 19 сборочных элементов. Все элементы плазмотрона были разработаны в программе «КОМПАС 3D» и представлены в изометрической проекции.



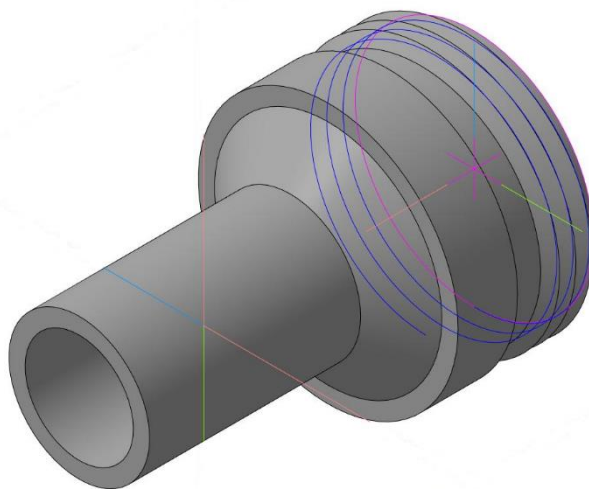
*Рисунок 18 Водоохлаждаемое сопло канал. 3D модель*



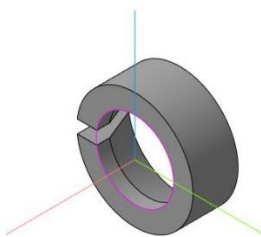
*Рисунок 19 Кольцо для наконечника. 3D модель*



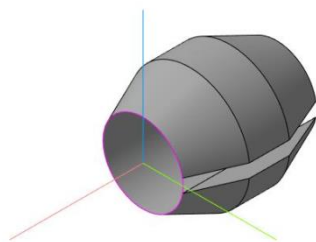
*Рисунок 20 Сопло для подачи защитного газа. 3D модель*



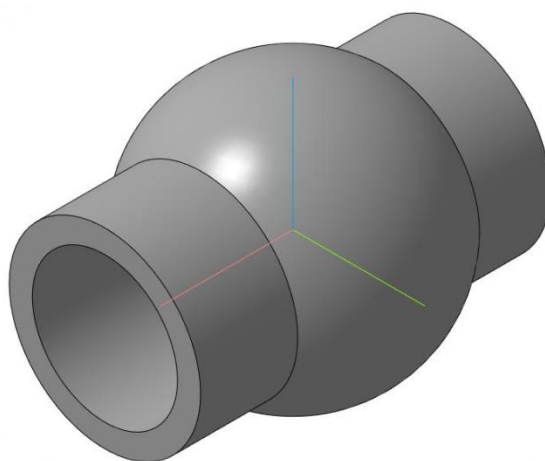
*Рисунок 21 Проточная часть для рабочего газа. 3D модель*



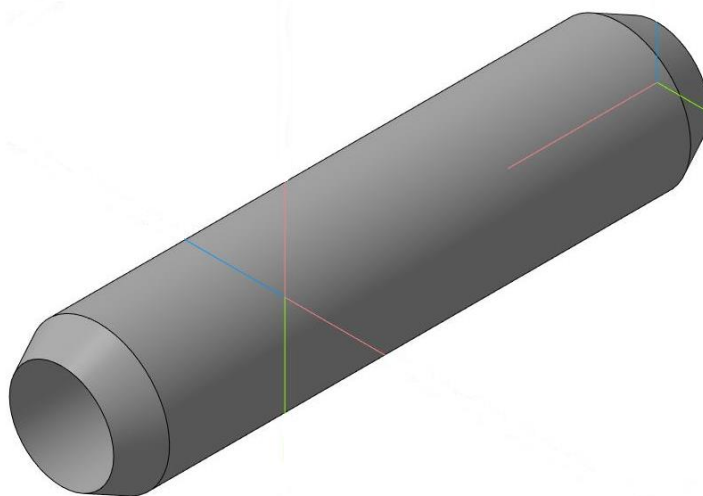
*Рисунок 22 С-образная для выравнивания электрода (2х). 3D модель*



*Рисунок 23 Конусообразная для выравнивания электрода. 3D модель*

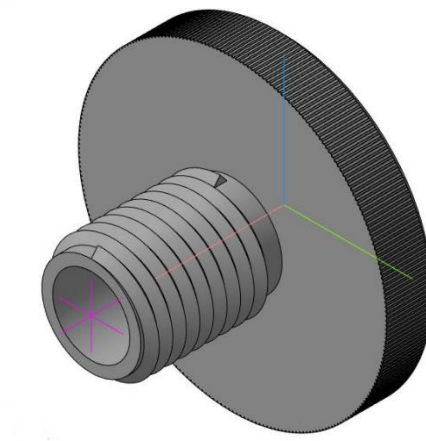


*Рисунок 24 Шаровая для выравнивания электрода. 3D модель*

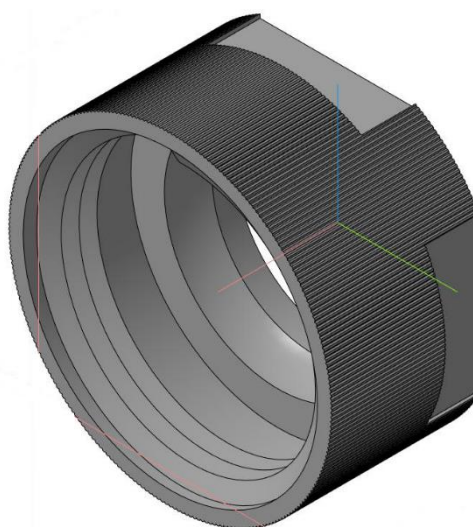


*Рисунок 25 Диффузор. 3D модель*

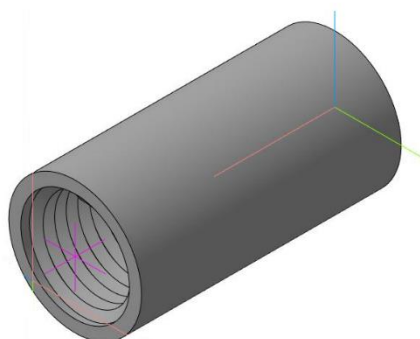




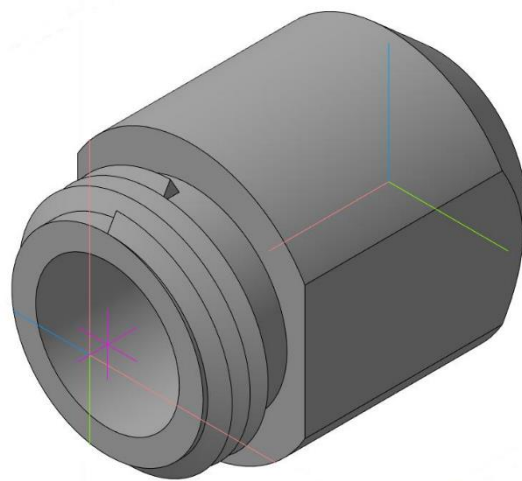
*Рисунок 26 Зажим для шаровой. 3D модель*



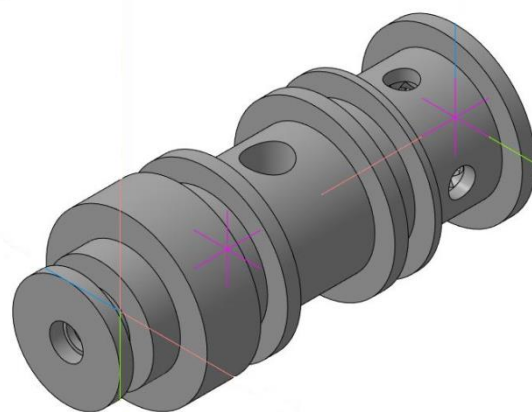
*Рисунок 27 Резьбовая гайка для шаровой. 3D модель*



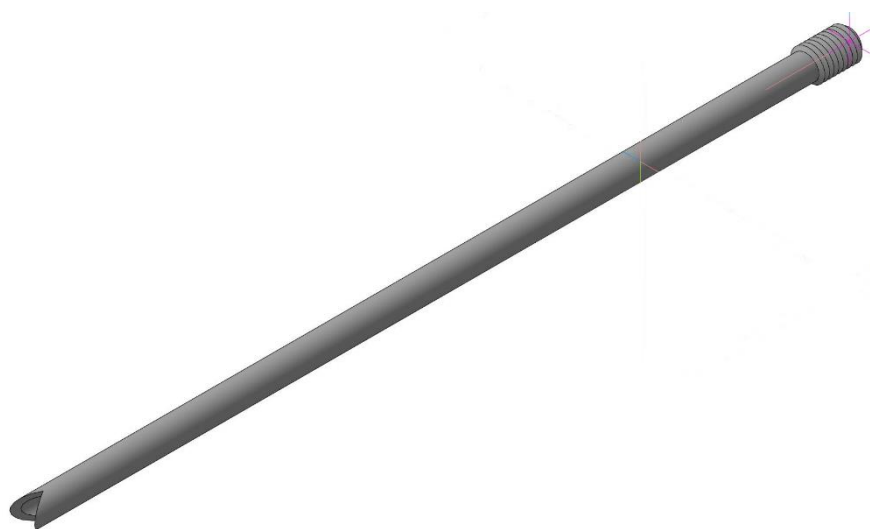
*Рисунок 28 Внутренняя полость шаровой. 3D модель*



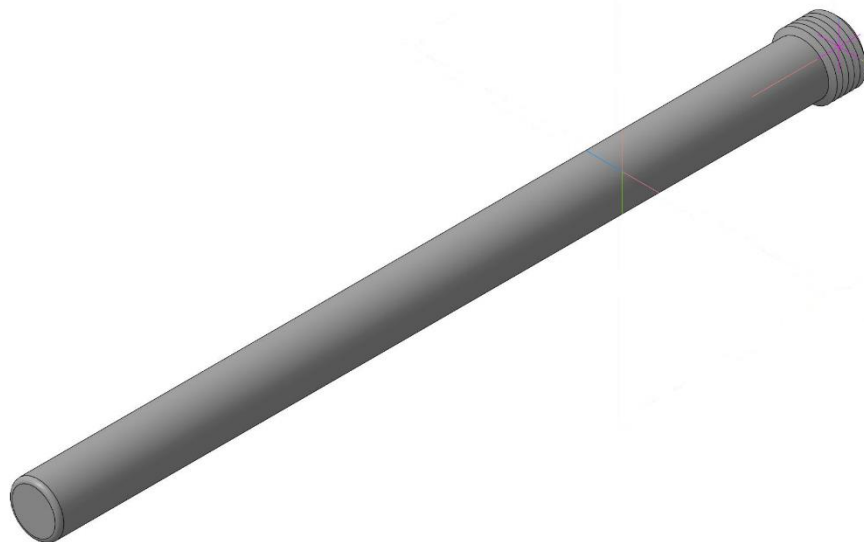
*Рисунок 29 Корпус дополнительного Водяного охлаждения. 3D модель*



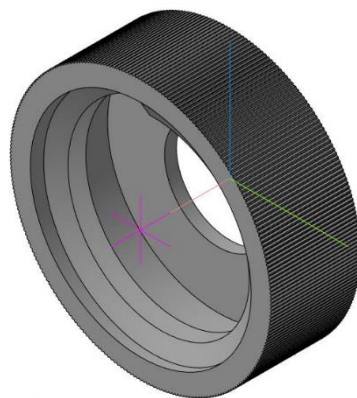
*Рисунок 30 Водоохлаждаемый канал. 3D модель*



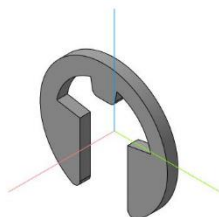
*Рисунок 31 Внутренняя часть медного электрода. 3D модель*



*Рисунок 32 Медный электрод. 3D модель*



*Рисунок 33 Зажим корпуса дополнительного водяного охлаждения. 3D модель*

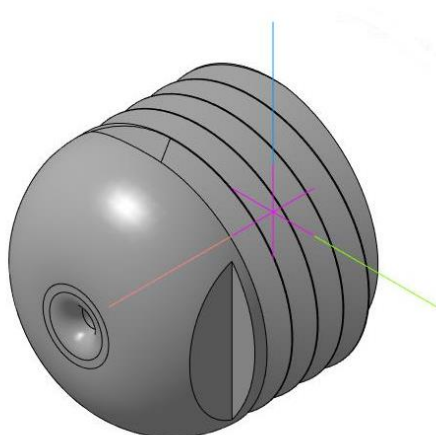


*Рисунок 34 Фиксатор крепления заднего корпуса. 3D модель*

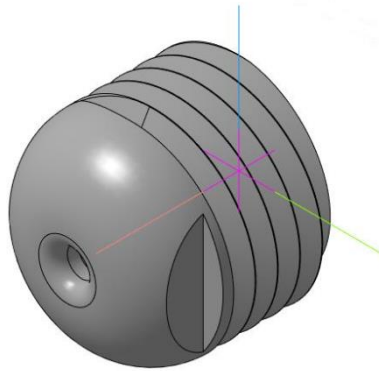
Особое значение конструкции плазматрона имеет сопло, через которое выходит рабочий газ. Ранее в статье было выяснено, что диаметр наконечника сопла оказывает большое влияние на процесс сварки и наплавки. Для данного плазматрона спроектированы четыре наконечника с диаметрами 1,2, 2, 3 и 4,2 мм.

Разработанную 3D модель плазматрона сопоставили с соответствующим наконечником и провели моделирование истечения газа в среде «ANSYS». В качестве плазмообразующего газа использовался аргон. В результате моделирования поведения аргона для вышеперечисленных наконечников в горелке был сделан вывод, что при диаметре 4,2 мм плазмообразующий газ ведет себя наиболее стабильно, образуя равномерное завихрение, позволяющее образовывать плазменную дугу с наилучшими показателями, необходимую для выполнения наплавки.

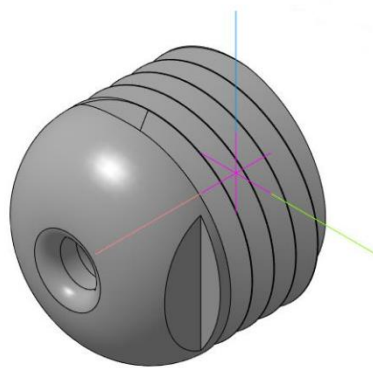
Моделирование необходимо для понимания процессов происходящих при получении сварочных швов, наплавки и напылении при использовании того или иного наконечника. На рисунках 35-38 приведены примеры наконечников плазменной горелки [13].



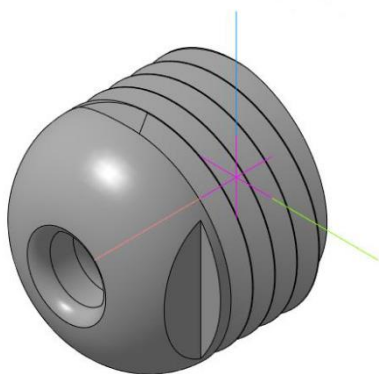
*Рисунок 35 Сопло наконечника, d 1,2. 3D модель*



*Рисунок 36 Сопло наконечника, d 2. 3D модель*



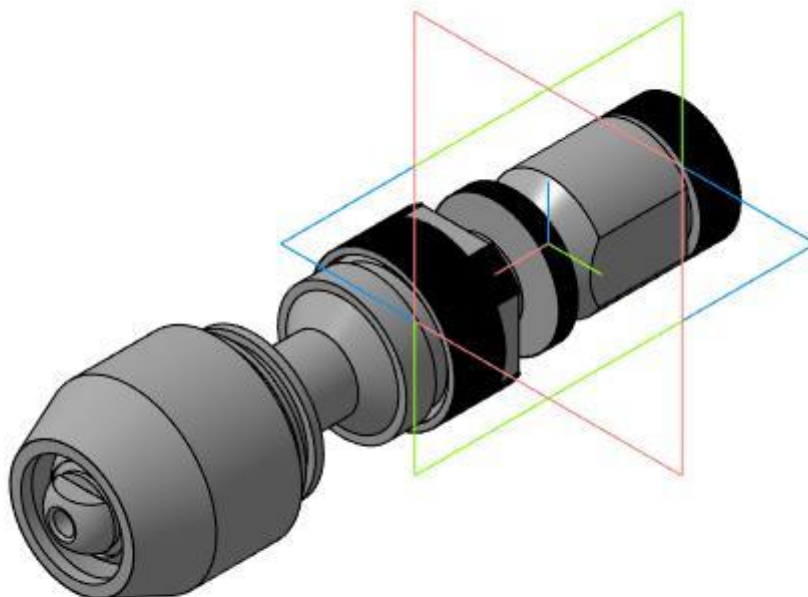
*Рисунок 37 Сопло наконечника, d 3. 3D модель*



*Рисунок 38 Сопло наконечника, d 4,2. 3D модель*

#### 4.4 Проверка сборочного чертежа

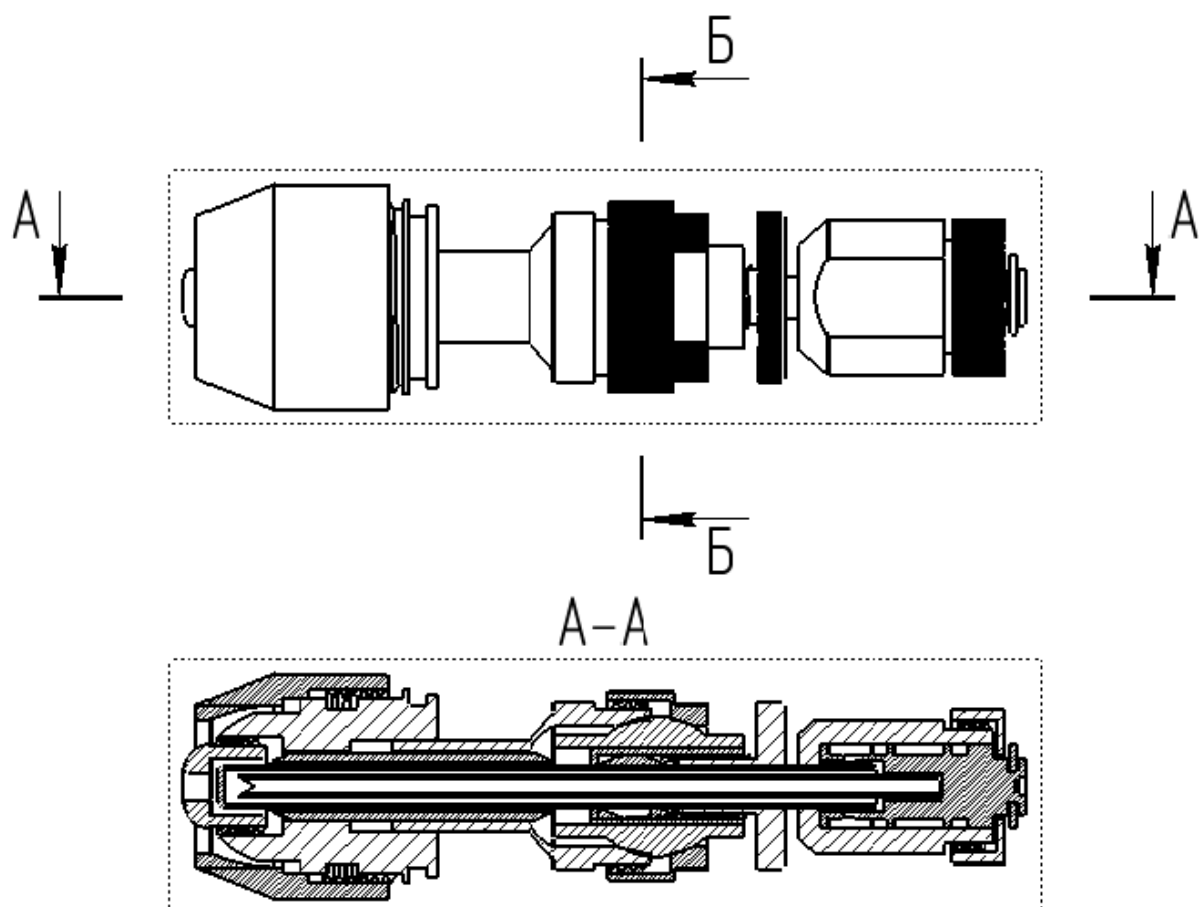
В результате проведенной работы была получена конструкция плазмотрона, которая соответствует перечисленным ранее требованиям и выглядит следующим образом:



*Рисунок 39 Сборка в изометрической проекции*

В данной сборке присутствует водяное охлаждение, которое располагается в двух крайних частях плазмотрона. Внутри используется медный электрод, однако при необходимости есть возможность использовать вольфрамовый электрод с помощью переходника. Данный плазмотрон будет поддерживать средние и большие токи, начиная от 100-150 А. Использовать его можно как для наплавки, так и для сварки.

В сечении данная модель будет выглядеть следующим образом:



*Рисунок 40 Вид в сечении конструкции плазматрона*

Таким образом, проверка сборки элементов конструкции показала правильность данной конструкции, так как итоговый образец соответствует необходимым размерам. Дальнейшим планом является изготовление данной конструкции. Необходимо выяснить теоритическим и экспериментальным путем, какие материалы необходимо использовать для каждого узла конструкции.

## **Вывод**

По результатам работы были выполнены следующие задачи:

1. Проанализированы способы сварки и наплавки, изучено специальное оборудование и их характеристики, а так же рассмотрены газы, используемые при сварке/наплавке сжатой дугой.
2. Изучены ранние и современные конструкции плазмотронов, используемые для сварки, наплавки и напыления.
3. Разработана 3D модель плазмотрона в программе «КОМПАС 3D» и составлены элементы конструкции, которые прошли проверку сборки.

Таким образом, в результате проделанной работы был разработан плазмотрон для сварки и наплавки. Следующий этап разработки плазменной горелки будет включать в себя продолжение моделирования истечения газов, изготовление опытных образцов плазменных горелок и проведении лабораторных сварочных экспериментов.



## Список литературы

- 1) Robert W. Messler, Principles of welding. – 2004. – P. 55– 57.
- 2) Rajput R.K., A textbook of manufacturing technology (Manufacturing Processes). – India. – 2007. – P. 320.
- 3) Klas Weman, Welding processes handbook, second edition. – Cornwall, UK. – 2003. –P. 73.
- 4) Барон Ю.М., Воинов Н.В., Кобчиков В.С., Коротких М.Т., Кудрявцев В.Н., Никифоров В.И., Никифоров И.В., Радкевич М.М., Электрофизические и электрохимические технологии в машиностроении. – Санкт-Петербург, Россия. – 2019. – 330 с.
- 5) Ермаков С.А., Разработка сварочных плазмотронов. Сварочное производство / С.А. Ермаков, Соснин Н.А. // Труды ЛПИ – №364 –Л.: ЛПИ – 1978. – 81– 85 с.
- 6) ГОСТ Р ИСО 14175-2010 «Материалы сварочные. Газы и газовые смеси для сварки плавлением и родственных процессов».
- 7) Вайнерман А.Е., Шоршоров М.Х., Веселков В.Д., Новосадов В.С., Плазменная наплавка металлов. – Ленинград. – 1969. – 5 с.
- 8) Патон Б.Е., Гвоздецкий В.С., Дудко Д.А. и др., Микроплазменная сварка. – Киев. 1979. – 124 – 125 с.
- 9) Вайнерман А.Е., Шоршоров М.Х., Веселков В.Д., Новосадов В.С., Плазменная наплавка металлов. – Ленинград. – 1969. – 80 – 81 с.
- 10) Патент РФ №2259262, 27.08.2005. Плазмотрон // Щицын Ю.Д., Щицын В.Ю., государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский государственный технический университет».
- 11) Патент РФ №2354460, 10.05.2009. Портативный плазмотрон для напыления и наплавки покрытий // Марков А.М., Балашов А.В., Федоров В.А., общество с ограниченной ответственностью «Плазма».
- 12) Патент РФ №2366122, 27.08.2009. Плазмотрон для нанесения покрытий // Ребров С.Г., Ризаханов Р.Н., Полянский М.Н., Федеральное государ-

ственное унитарное предприятие «Исследовательский Центр имени М.В. Келдыша».

13) M. E. Goshkoderya, M. A. Kovalev, I. A. Zarubin, N. A. Zhugarev and Wan Panfay, Optimization of the design of the plasma torch for using gas fluxes. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia. – 2019.