

Оглавление

Введение.....	3
1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЛАЗМОТРОНОВ.....	5
1.1. Основные признаки классификации плазмотронов.....	5
1.2. Основные схемы организации рабочего процесса в электродуговых плазмотронах.....	7
1.3. Основные характеристики генератора плазмы.....	12
1.3.1. Энергетические характеристики.....	12
1.3.2. Электрические характеристики.....	13
1.3.3. Эксплуатационные характеристики.....	13
1.4. Рабочие вещества плазмотронов.....	14
2. ПЛАЗМОТРОН КАК СИСТЕМА.....	14
3. СХЕМА ОРГАНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ПЛАЗМОТРОНЕ И ЕЁ ЭЛЕМЕНТЫ.....	15
3.1. Принципиальная схема плазмотрона.....	15
3.2. Выходной электродный узел.....	16
3.3. Узел внутреннего электрода.....	18
3.4. Стабилизирующий канал.....	23
3.5. Выходной канал.....	23
3.6. Канал внутреннего электрода.....	27
4. ГАЗОВАЯ СИСТЕМА.....	29
4.1. Основной ввод газа.....	29
4.2. Вспомогательные вводы газа.....	30
4.3. Ввод защитного газа.....	31
5. МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ.....	32
6. СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ.....	32
6.1. Конструкции систем охлаждения.....	33
6.2. Уплотнения.....	34

7. ПРИСОЕДИНЕНИЯ К ВНЕШНИМ СИСТЕМАМ	35
8. УСТРОЙСТВА ВОЗБУЖДЕНИЯ (ЗАЖИГАНИЯ) РАЗРЯДА	36
9. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ПЛАЗМОТРОНОВ РАЗНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ	38
9.1. Плазмотроны универсального применения	38
9.2. Плазмотроны плазменного напыления	39
9.3. Плазмотроны для нагрева и обработки неметаллических материалов	43
9.4. Плазмотроны для бурения и резки неметаллических материалов	45
9.5. Плазмотроны для резки тканей в медицине	46
9.6. Плазмотроны с внешней дугой	47
9.7. Плазмотроны для сварки и наплавки металлов	48
9.8. Плазмотроны для плазменно-дуговой резки металлов	49
9.9. Плазмотроны для плавки металлов	52
9.10. Плазмотроны переменного тока	53
9.11. Исследовательские плазмотроны	55
ЛИТЕРАТУРА	56

Оглавление

Введение

Плазмотроны – генераторы низкотемпературной плотной плазмы – нашли самое широкое применение в разных областях человеческой деятельности, особенно в промышленности, благодаря своим уникальным свойствам и возможностям. В плазмотронах получают потоки плазмообразующего вещества с высокой температурой и энтальпией, которые не достигаются другими средствами, получают плазму практически любого вещества.

Плазма обладает рядом новых свойств как, например, электропроводность, высокая энергоемкость и реакционноспособность, обеспечивающих ей применение в различных отраслях техники. Процессы с использованием плазмы находят все более широкое применение в технологии обработки материалов – сварке, резке, напылении тугоплавких материалов, в металлургии редких металлов и качественных сплавов, в химической технологии. Плазма находит применение в энергетических установках – МГД-генераторах, котлоагрегатах паросиловых установок. Достижения в разработке космической техники, высокотемпературных энергетических и двигательных установок, аэродинамике высоких скоростей неразрывно связаны с успехами плазменной техники. Плазменные установки используют в медицинской технике, установках переработки экологически вредных отходов.

Генерация плазмы в плазмотронах по сравнению с другими видами нагрева газа, например с помощью химических или ядерных реакций, имеет ряд неоспоримых преимуществ. Используемая для нагрева электрическая энергия – наиболее универсальный, доступный, а в большинстве случаев и наиболее дешевый вид энергии. В плазмотронах для получения плазмы могут быть использованы практически любые вещества. Плазмотроны обладают широкими возможностями нагрева плазмы в диапазоне температур до $(1 \dots 20) \cdot 10^3 \text{ K}$. Установки с плазмотронами относительно просты в обслуживании, их производство базируется на хорошо развитых отраслях электромашиностроения, что облегчает внедрение плазменных устройств в современную технику. Особенно интенсивно плазменная техника развивалась в последние 40...50 лет в связи с научно-технической революцией.

Разнообразие областей применения и требований к плазменной струе и генератору плазмы привело к большому разнообразию, как в организации рабочего процесса, так и в конструктивном оформлении плазмотронов. В результате этого

Оглавление

классификация плазмотронов обычно проводится по ряду разных существенных признаков.

Ионизация газа и образование плазмы требуют значительных затрат энергии. Источником этой энергии может служить тепловая энергия, например высокотемпературных химических реакций (горение), электрическая энергия, реализуемая в различных формах электрических разрядов, энергия электромагнитных излучений, кинетическая энергия ускоренных потоков частиц (электронов, ионов и т.п.).

Наибольшее распространение в качестве источников плазмы получили электрические разряды, в которых нагрев плазмы осуществляется взаимодействием заряженных частиц плазмы с электромагнитным полем.

В зависимости от форм электрического разряда, реализуемого в генераторе для получения плазмы, различают электродуговые, высокочастотные и сверхвысокочастотные плазмотроны, а также генераторы на электромагнитных колебаниях оптического диапазона частот – оптических разрядах и потоках частиц высоких энергий – пучковый разряд.

В настоящее время наибольшее распространение и применение получили электродуговые генераторы плазмы – электродуговые плазмотроны.

В зависимости от назначения и области применения различают следующие характерные виды плазмотронов:

Плазменный инструмент – устройства (горелки) для сварки, резки, напыления тугоплавких материалов, бурения и поверхностной обработки твердых пород и т.п. Это устройства относительно небольшой и средней мощности, находящие все более широкое применение в различных видах производства. Уровень мощности от единиц до сотен киловатт [1].

Плазмохимические реакторы – для осуществления химических реакций в плазменной среде (например, пиролиз метана, получение окиси титана, восстановление чистых веществ из их окислов или хлоридов – урана, титана, германия, тантала и т.д.). Эти устройства обычно большой мощности и промышленного применения уровня от десятков до тысяч киловатт [2].

Металлургические плазмотроны – для переплава тугоплавких и особо чистых материалов, восстановления чистых материалов, рафинирования, получения монокристаллов и дисперсных материалов. Обычно это также промышленные установки средней и большой мощности [2].

[Оглавление](#)

Плазменные нагреватели в различных процессах – сжигания и переплава разных отходов, розжиг топок котлов и т.п., уровня мощности от десятков до сотен киловатт.

В особую группу можно выделить **генераторы плазмы научно-исследовательского назначения** – для самого широкого круга исследований при высоких температурах и скоростях потоков, в частности, для изучения аэродинамических, теплофизических и других процессов. Плазмотроны этой группы имеют мощности от единиц киловатт до десятков мегаватт [3, 4], и область применения плазмотронов и технологий на их основе расширяется.

Столь широкая область применения плазмотронов определяет и большое, разнообразие требований к плазме и к генераторам плазмы – плазмотронам. Это, в свою очередь, определяет разнообразие схем и типов плазмотронов, различающихся по видам источников плазмы (электрического разряда), способам стабилизации разряда, конструктивными и другими признаками. При всём разнообразии назначений и форм электродуговых плазмотронов они содержат ряд общих функциональных элементов, определяющих их свойства, и соответствующие им технические решения, способы проектирования и применяемые материалы. В известной литературе, как правило, рассматривают принципиальные вопросы проектирования, для специалистов в данной области техники, а вопросы конструкции плазмотрона, определяющие его работоспособность, надёжность и эффективность обычно не рассматриваются.

Целью настоящей работы является анализ и обобщение сведений, накопленных при проектировании электродуговых плазмотронов, для их целенаправленного и эффективного использования при проектировании плазмотронов разного назначения.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЛАЗМОТРОНОВ

1.1. Основные признаки классификации плазмотронов

Многообразие существующих электродуговых плазмотронов образует и многообразие признаков классификации, каждый из которых характеризует особенности и соответствующие им свойства плазмотрона.

В качестве основных признаков классификации рассматриваются следующие:

Уровень достигаемых температур, высокотемпературный и низкотемпературный – признак относительный, не имеет определённой температурной градации, но

оценивает уровни достигаемых температур для одного и того же газа в разных схемах организации процесса.

По видам разряда, используемого для нагрева плазмы, различают электродуговые плазмотроны (ЭДП), высокочастотные (ВЧ), сверхвысокочастотные (СВЧ) плазмотроны и лазерные плазмотроны. Вид используемой в генераторе плазмы энергии также является одним из первых признаков классификации.

Способ воздействия на разряд – способ стабилизации разряда. Для электродуговых плазмотронов разновидности – газовая стабилизация, стабилизация стенкой, магнитная стабилизация.

Уровень давления на выходе из канала плазмотрона. Различают плазмотроны атмосферного давления – с выпуском в атмосферу, плазмотроны повышенного – до 10^6 и высокого давления – более 10^6 Па, а также плазмотроны вакуумные, пониженного давления – менее атмосферного. Это давление может отличаться от атмосферного, если на выходе устанавливают сопло или другое устройство, в котором поддерживают необходимое давление.

По роду электропитания различают плазмотроны постоянного тока и плазмотроны переменного тока – однофазные и 3-х фазные, а также плазмотроны кратковременного действия – импульсные и квазистационарные, питаемые от специальных источников электропитания – накопителей энергии [4].

По расположению разряда в плазмотроне различают плазмотроны с внутренним разрядом и с внешним разрядом (внешней дугой). Плазмотроны с внутренним разрядом разделяют на плазмотроны с самоустанавливающейся длиной разряда и с фиксированной длиной. Также различают по способу фиксации длины дугового разряда.

По взаимному расположению электродов различают линейное и коаксиальное расположение.

Различают плазмотроны для нагрева нейтральных или окислительных сред.

По используемой для охлаждения среде различают плазмотроны водяного и воздушного охлаждения.

По режиму работы различают плазмотроны непрерывного действия и кратковременного действия – импульсные и квазистационарные.

Отразить все признаки классификации в одной схеме трудно ввиду большого количества возможных вариантов, поэтому обычно представляют классификацию по признакам, определяющим основные характеристики организации процесса в

[Оглавление](#)

плазмотроне, и характеристики самого плазмотрона. В дальнейшем мы будем рассматривать наиболее распространённый вид плазмотронов – электродуговые плазмотроны.

Классификацию электродуговых плазмотронов по способу организации рабочего процесса, определяющему основные характеристики плазмотрона, можно представить в виде графа, приведенного на рис. 1 .

Представить все возможные варианты сочетаний признаков в виде дерева практически сложно. Возможные варианты компактно можно представить в виде матрицы связей, которую мы здесь не приводим.

1.2. Основные схемы организации рабочего процесса в электродуговых плазмотронах

В плазмотронах с газовой стабилизацией разряда наиболее распространены схемы представленные на рис. 2...6.

В схемах с фиксированной длиной дуги (рис. 3) межэлектродной вставкой (МЭВ) длина столба дуги больше, чем длина самоустанавливающейся дуги при таком же токе и расходе газа. Это позволяет повысить энтальпию и температуру плазмы.

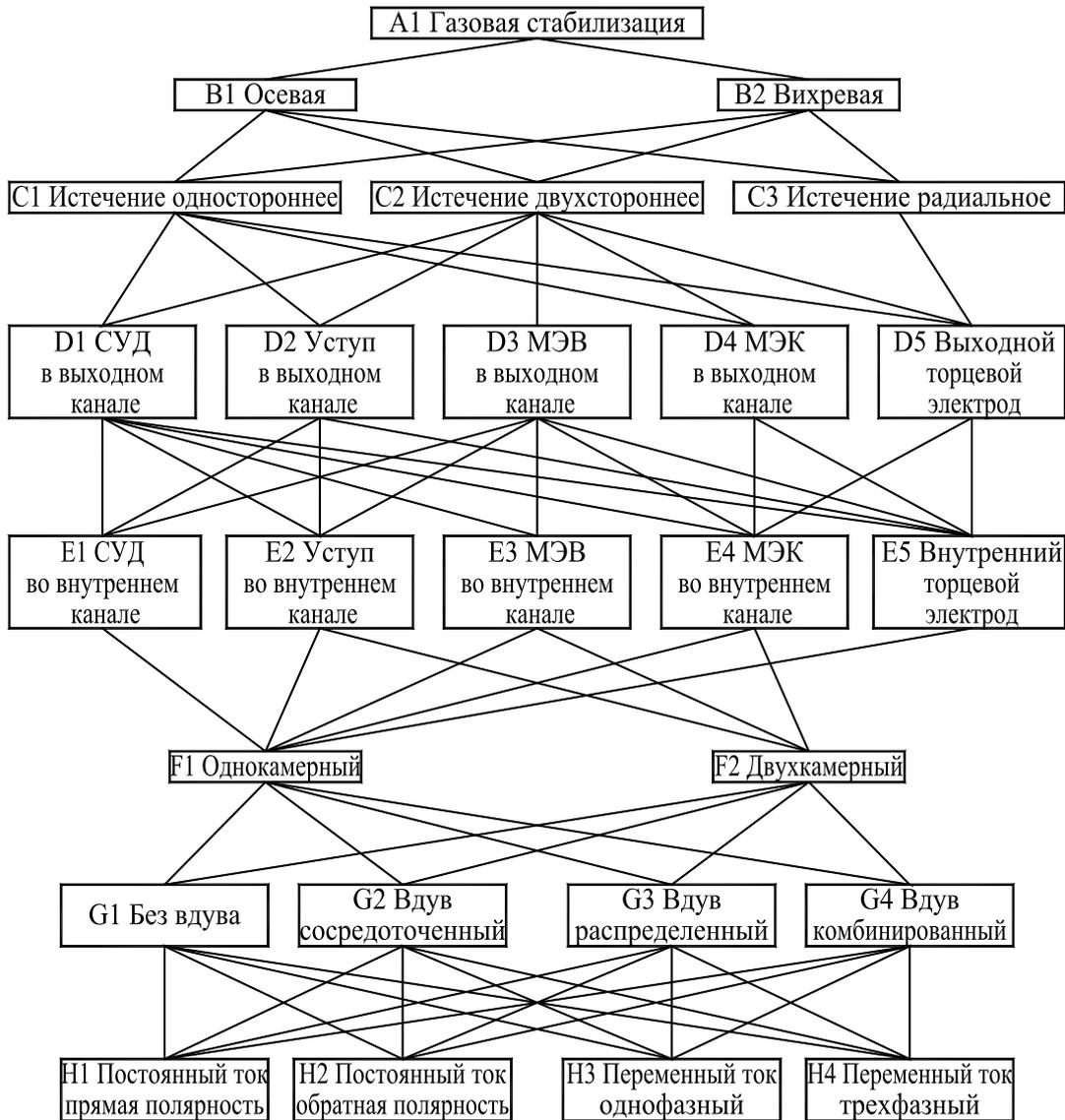


Рис. 1. Граф классификации плазматронов с газовой стабилизацией дуги

В схемах с фиксированной длиной дуги уступом (рис. 4) длина столба дуги меньше, чем длина самоустанавливающейся дуги при таком же токе и расходе газа. Это повышает стабильность разряда, при некотором снижении температуры плазмы.

При работе на переменном токе используют схемы, показанные на рис. 5 и рис. 6. Схема, показанная на рис. 6а обычно используется для работы на небольших токах разряда.

Схемы с магнитной стабилизацией представлены на рис. 7. Плазматроны с магнитной стабилизацией разряда используют для получения более высоких температур, чем при газовой стабилизации, и при реализации больших мощностей.

[Оглавление](#)

Такие плазмотроны используют большие токи разряда. Столб разряда в магнитном поле под действием электромагнитной силы перемещается относительно потока нагреваемого газа, отдавая ему тепло. Интенсивность теплоотвода от столба определяется преимущественно скоростью движения столба в потоке, а не скоростью самого потока в плазмотроне и существенно меньше зависит от расхода газа через плазмотрон. В схемах рис. 7а и рис. 7б ток разряда взаимодействует с осевой составляющей магнитного поля, а в схеме рис. 7в – с радиальной.

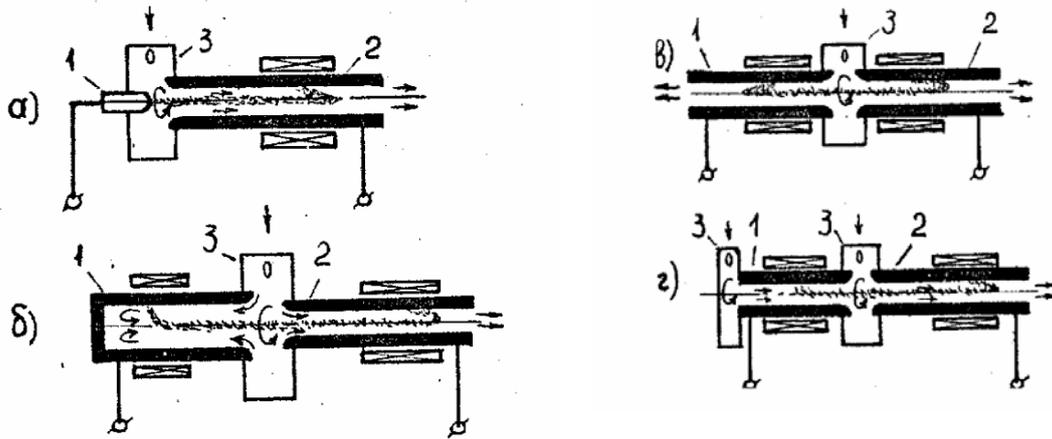


Рис. 2. Схемы плазмотронов с самоустанавливающейся длиной дуги, (СУД).

а) с внутренним торцевым катодом; б) с внутренним трубчатым электродом, (линейная схема); в) с двусторонним истечением плазмы; г) двухкамерная схема с основным и вспомогательным вихревым вводом газа. 1 – внутренний электрод, 2 – выходной электрод, 3 – узел ввода газа

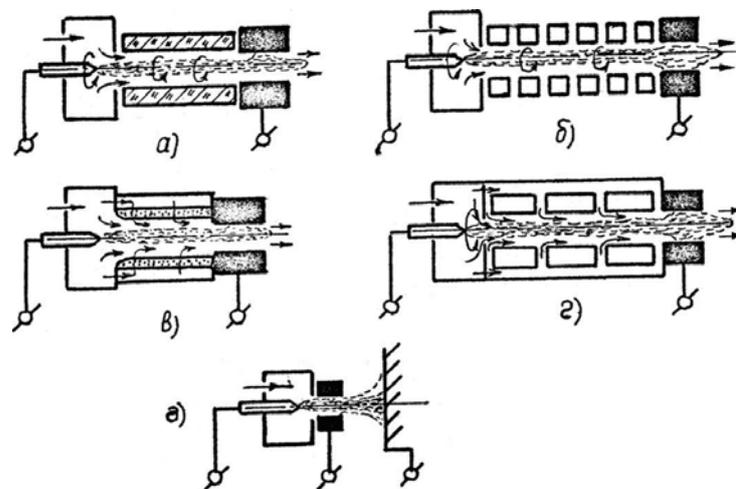


Рис. 3. Схемы плазмотронов с фиксацией длины дуги на выходе

[Оглавление](#)

межэлектродной вставкой. Внутренний электрод может быть как торцевым, так и трубчатым. Варианты выполнения МЭВ: а) диэлектрическая; б) секционированная из металлических охлаждаемых водой секций; в) диэлектрическая пористая с газовым внутренним охлаждением (респирационным); г) с металлическими охлаждаемыми водой секциями и межсекционным вдувом газа (распределённый вдув), или металлические пористые секции с газовым внутренним охлаждением и распределённым вдувом газа; д) плазмотрона с внешней дугой

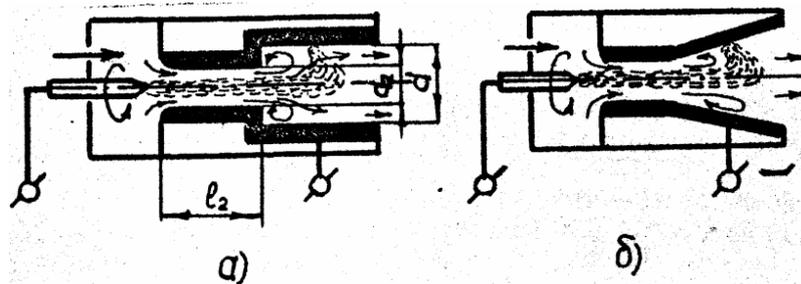


Рис. 4. Схемы плазмотронов с фиксацией длины столба дуги уступом. а) с цилиндрическим анодом, б) с коническим анодом – соплом

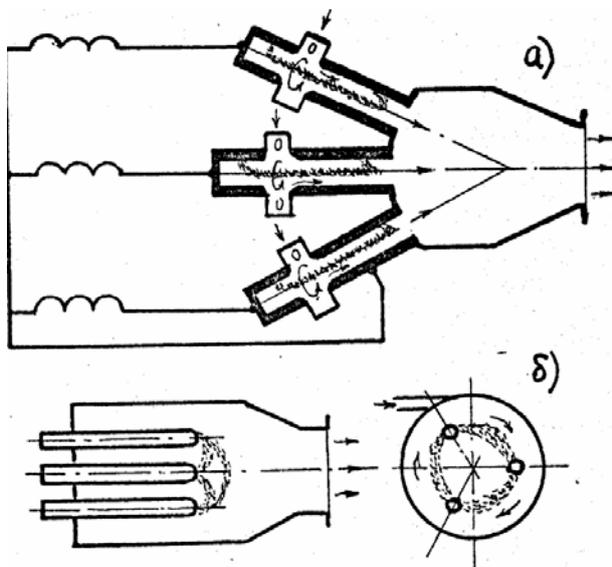
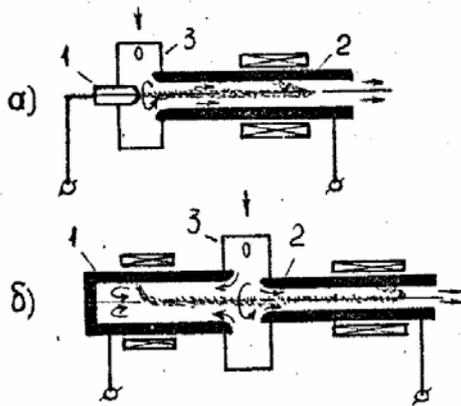


Рис. 5. Схемы плазмотронов переменного тока. а) схема «звезда» – три линейных однофазных плазмотрона и общая камера смешения; б) схема с тремя стержневыми электродами в общей камере

[Оглавление](#)



Схемы плазмотронов со стабилизацией разряда стенкой практически не отличаются от схем плазмотронов с межэлектродной вставкой. Основное отличие – в параметрах рабочего процесса. При стабилизации стенкой столб дуги полностью заполняет канал, т.е. диаметр столба дуги равен диаметру канала. Таким образом, процесс в плазмотроне с МЭВ может быть переведен в процесс со стабилизацией разряда стенкой при соответствующем увеличении тока разряда. При этом повышается мощность плазмотрона, температура плазмы на выходе, тепловыделение на единице длины столба, а также повышается теплонапряжённость конструкции и снижается КПД процесса. Поэтому при стабилизации стенкой в конструкции необходимо учитывать эти особенности процесса.

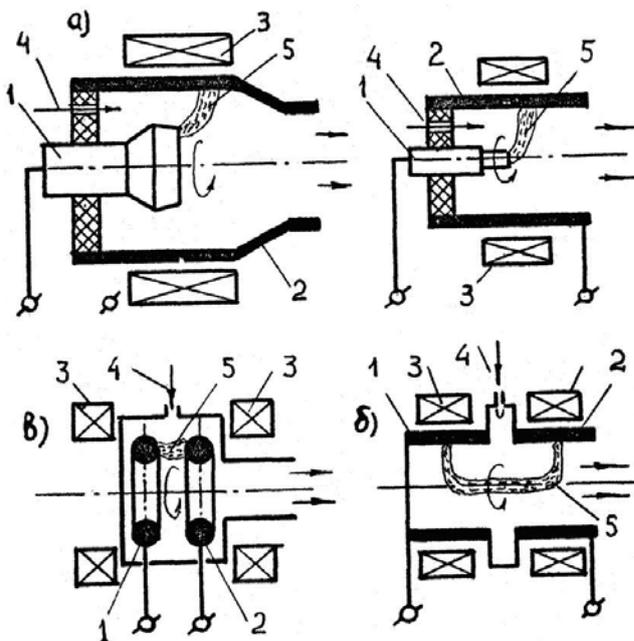


Рис. 7. Схемы плазмотронов с магнитной стабилизацией разряда.

а) Коаксиальная схема с внутренним холодным электродом и коаксиальная схема с внутренним горячим электродом; б) линейная схема с осевым магнитным полем; в) схема с кольцевыми электродами и радиальным магнитным полем

[Оглавление](#)

1.3. Основные характеристики генератора плазмы

Плазмотрон является устройством для реализации определённого технологического процесса, и требования к плазмотрону, его технологическим и эксплуатационным характеристикам должны соответствовать требованиям потребителя.

1.3.1. Энергетические характеристики

Плазмотрон с внутренним разрядом как источник плазмы характеризуется следующими параметрами. Температурой T и давлением p плазмы на выходе из плазмотрона. При этом обычно имеют в виду среднюю по сечению (среднемассовую $T_{см}$) температуру плазмы. В ряде случаев представляет интерес распределение температуры по сечению и ее локальные значения, например максимальная температура T_{max} или температура на оси струи. Обычно в выходном сечении плазмотрона имеет место термодинамическое равновесие, так что температура плазмы и давление с достаточной точностью характеризуют состав плазмы. В этом случае состав плазмы или степень ее ионизации могут быть найдены с помощью таблиц теплофизических свойств веществ [5 – 7]. Характеристикой плазмы может быть и энтальпия h нагреваемого газа, также связанная с температурой и давлением. В некоторых случаях в качестве характеристики плазмы может указываться концентрация заряженных частиц в плазме n_e, n_i или степень ионизации $\alpha < 1$.

Производительность генератора плазмы характеризуется расходом газа G и тепловой мощностью струи плазмы $P_{тепл}$. Обозначения и зависимости следует взять из пособия по расчёту плазмотронов [8].

$$P_{тепл} = hG,$$

где $P_{тепл}$ – тепловая мощность струи, Вт;

h – энтальпия плазмы (среднемассовая), Дж/кг;

G – расход газа, кг/с.

Поскольку полезная тепловая мощность является частью мощности, подведенной к плазмотрону, зависящей от КПД преобразования η , связь между основными характеристиками плазмотрона можно представить в следующем виде:

$$P\eta = hG,$$

где P – электрическая мощность, подведенная к плазмотрону;

КПД плазмотрона характеризует совершенство преобразования подведенной энергии в энергию струи плазмы

[Оглавление](#)

$$\eta = \frac{P_{\text{тепл}}}{P} = \frac{P - P_{\text{потерь}}}{P},$$

где $P_{\text{потерь}}$ – потери мощности в элементах конструкции.

Представляет интерес и общий энергетический КПД получения плазмы – КПД установки η_y , включающий электрический КПД $\eta_{\text{э}}$ источника электропитания плазмотрона, $\eta_y = \eta_{\text{э}} \cdot \eta$.

Характеристики плазмы и производительности позволяют определить мощность, необходимую для генерации плазмы на выходе из плазмотрона.

Для некоторых плазмотронов важной характеристикой может быть скорость плазмы на выходе из канала, определяемую как

$$w = 4G / \rho \pi d^2 .$$

1.3.2. Электрические характеристики

К этим характеристикам относятся ток I и напряжение U разряда, а также вольтамперная характеристика разряда (ВАХ), определяющая требования к источнику электропитания.

1.3.3. Эксплуатационные характеристики

К этим характеристикам относятся:

Охлаждающая среда – вода, воздух, расход через элементы конструкции плазмотрона и суммарный расход, $G_{\text{охл}}$, кг/с, давление охлаждающей среды на входе в плазмотрон, $p_{\text{охл}}$, атм.

Ресурс основных элементов конструкции: катода, анода и др. τ час.

Расход защитного газа (при необходимости) в кг/с.

Также могут быть представлены и другие характеристики, связанные с технологическим процессом, например, расход напыляемого материала (порошка, проволоки) или технологической среды (жидкого топлива), подаваемых непосредственно в плазмотрон.

Все характеристики плазмотрона определяются принятыми техническими решениями при проектировании плазмотрона.

[Оглавление](#)

1.4. Рабочие вещества плазмотронов

Рабочее или плазмообразующее вещество, нагреваемое в плазмотроне, определяется технологическим процессом, реализуемым с помощью плазмотрона. Однако конструкция плазмотрона и выбор конструкционных материалов существенно зависят от свойств рабочего вещества. В качестве рабочих веществ в плазмотронах чаще всего используют: инертные газы – аргон, гелий, малоактивные, восстановительные газы – азот, водород, углеводороды, аммиак и окислительные среды – воздух, кислород, водяной пар.

2. ПЛАЗМОТРОН КАК СИСТЕМА

Плазмотрон следует рассматривать как систему для выполнения основной функции – нагрева рабочего вещества. Для этого должны быть реализованы внутренние функции: организация рабочего процесса в плазмотроне и обеспечение работоспособности конструкции, включающие:

1. Формирование электрического разряда с необходимыми характеристиками;
2. Организация потока нагреваемого вещества и его взаимодействие с разрядом, обеспечивающее необходимые свойства разряда;
3. Отвод тепла, попадающего на стенки элементов конструкции;
4. Перемещение разряда на электродах, тепловой режим электродов и защиту электродов от окисления.

Перечисленные функции осуществляются соответствующими подсистемами плазмотрона:

1. **Электрическая подсистема**, включающая электроды основные и вспомогательные (поджига разряда), изоляторы, соединительные элементы к источникам электропитания.
2. **Газовая система**, включающая устройства для ввода газа в разрядную камеру, придания потоку газа в плазмотроне необходимой скорости и направления движения, ввода, при необходимости защитного или технологического газа, каналы для транспортировки газа в плазмотроне, уплотнения, соединительные устройства к внешним системам.
3. **Система охлаждения**, включающая рубашки охлаждения теплонапряжённых элементов конструкции, каналы для организации потока

[Оглавление](#)

охлаждающей среды, уплотнения, присоединительные элементы к внешней системе отвода тепла.

4. Может быть предусмотрена **технологическая система**, включающая сопло на выходе, устройства ввода в поток плазмы порошка или проволоки, технологического защитного газа, топлива и др. – для плазмотронов определённого назначения.

Перечисленные подсистемы размещаются в элементах конструкции плазмотрона. Для удобства сборки конструкции и эксплуатации плазмотрона конструкция делится на несколько узлов, преимущественно по функциональным признакам. В этих узла и размещают все функциональные элементы систем.

3. СХЕМА ОРГАНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ПЛАЗМОТРОНЕ И ЕЁ ЭЛЕМЕНТЫ

3.1. Принципиальная схема плазмотрона

Принципиальная схема плазмотрона может быть представлена в виде набора функциональных элементов рис. 8, обеспечивающих выполнение необходимых функций рабочего процесса. К таким элементам относят: электроды – выходной и внутренний (А, К), стабилизирующие каналы (Кан), узлы ввода газа и организации потока (В, ВД), магнитные системы (МА, МК) и их элементы. Каждый из функциональных элементов может быть реализован с помощью разных технических решений, с соответствующими им свойствами. Таким образом, с помощью относительно небольшого набора технических решений функциональных элементов может быть представлено большое разнообразие схемных вариантов плазмотронов. Набор элементов и их технических решений, взаимного расположения элементов, а также соотношение между определяющими размерами элементов и характеристиками процессов в них определяют рабочий процесс и характеристики плазмотрона в целом. Каждое принятое техническое решение придаёт плазмотрону соответствующие свойства, является его отличительным признаком.

В конструкции плазмотрона каждый функциональный элемент входит в виде элемента узла конструкции плазмотрона, объединяющего элементы конструкции разных функциональных систем. В частности, электродные узлы, как правило, включают элементы системы охлаждения – рубашки, направляющие потока охлаждения, уплотнения, присоединительные элементы и т.д.

[Оглавление](#)

3.2. Выходной электродный узел

Выходной электрод размещается в электродном узле на выходе потока плазмы из плазмотрона. Он может быть выполнен в виде отдельного электродного узла, например, в схемах с межэлектродной вставкой (рис. 3). Выходной электрод может быть конструктивно объединён со стабилизирующим каналом в схемах с газовой стабилизацией с самоустанавливающейся длиной дуги (рис. 2), или с дугой, фиксированной уступом (рис. 4). Выходной электрод обычно выполняют анодом (прямая полярность), реже – катодом (обратная полярность).

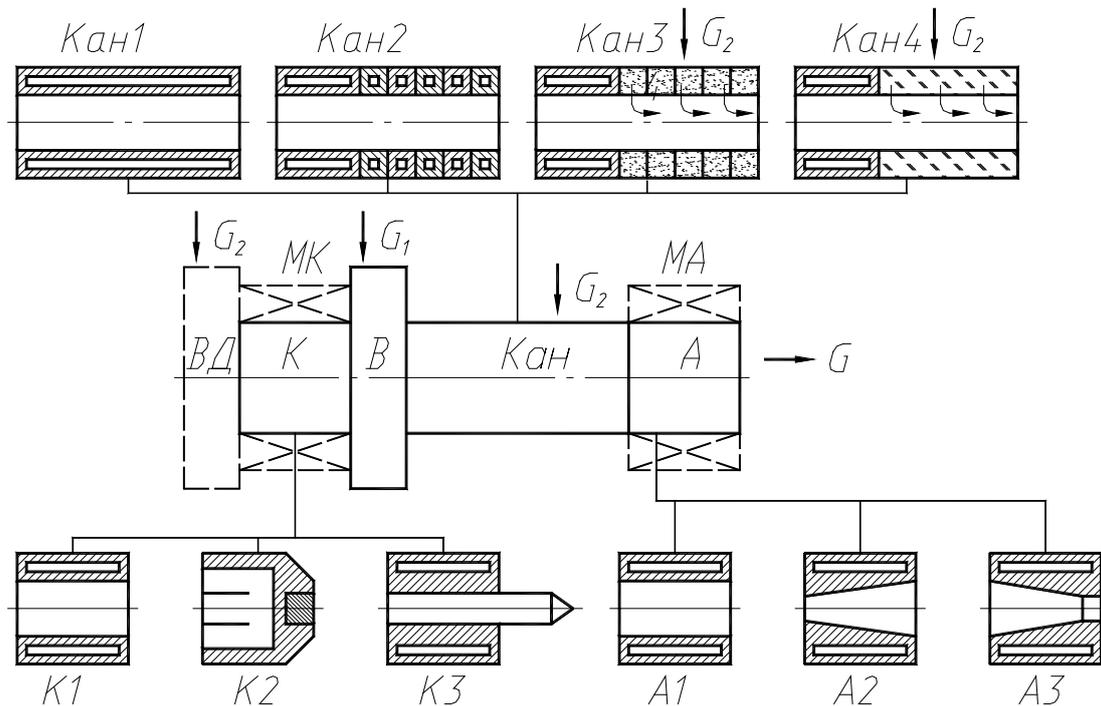


Рис. 8. Функциональная схема плазмотрона

А – аноды (А1–цилиндрический, А2–диффузор, А3–конфузор); К – катоды (К1–цилиндрический, К2–торцевой, К3–стержневой); Кан – каналы (Кан1–цилиндрический сплошной, Кан2–секционированный проводящий, Кан3–секционированный проводящий пористый, Кан4–диэлектрический пористый); В и ВД – узлы ввода газа; МА и МК – магнитные системы

В корпусе узла помещён электрод, внутренний канал которого образует рабочую поверхность, а внешняя поверхность охлаждается теплоносителем. Электрод, как правило, «холодный». На рабочую поверхность электрода – наиболее теплонапряжённую – попадает тепловой поток, связанный с переносом тока на электрод (токовая составляющая) и конвективный тепловой поток от нагретого газа

[Оглавление](#)

(конвективная составляющая). Теплосъём осуществляется с помощью направляющей потока охладителя и должен быть интенсивным. Температура охлаждаемой поверхности электрода не должна превышать температуру кипения охлаждающей жидкости более чем на критический температурный напор (около 30 градусов). При охлаждении водой температура рабочей поверхности такого электрода обычно не превышает 400...450 К при высокой теплопроводности стенки электрода. Подвод и отвод охладителя производится с помощью штуцеров на корпусе или каналов, сообщающих рубашки соседних узлов. Канал электрода обычно цилиндрический, но в некоторых случаях может быть конфузорным или диффузорным для придания потоку газа на выходе необходимой скорости.

Диаметр канала электрода согласовывают с диаметром стабилизирующего канала d и обычно выполняют равным ему. Электрод выполняют из электротехнической меди, реже – из нержавеющей стали или из псевдосплавов на основе молибдена и вольфрама. Низкая теплопроводность стали облегчает условия теплосъёма на охлаждаемой поверхности.

Толщина стенки электрода задаётся по соображениям ресурса работы электрода, теплосъёма с охлаждаемой поверхности и других конструктивных соображений. В частности, толщина стенки электрода должна быть больше некоторой критической толщины, при которой индивидуальные тепловые потоки от локальных электродных пятен привязки не сказываются на температуре охлаждаемой поверхности. Для токов более 50 А минимальную толщину медной стенки принимают на уровне 3 мм.

При больших токах разряда для снижения эрозии и повышения стабильности работы электродный узел снабжают магнитной системой, создающей в области привязки разряда осевое магнитное поле, перемещающее разряд по поверхности электрода. В некоторых случаях для тех же целей выходной электрод в зоне привязки разряда снабжают «горячими» термоизолированными вставками [9] (см. рис. 9).

[Оглавление](#)

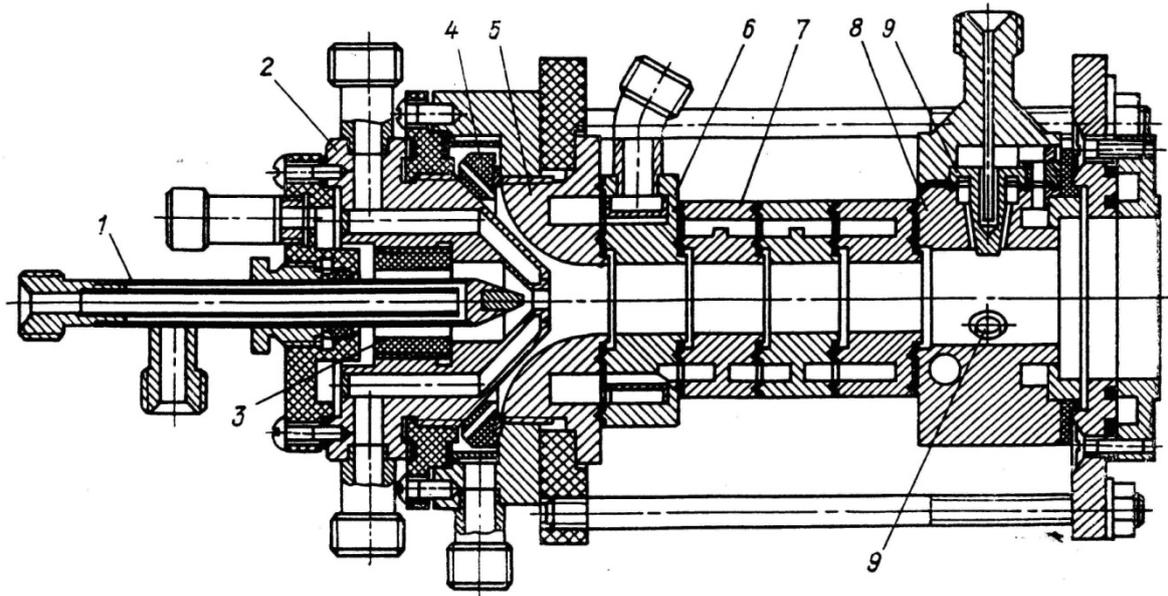


Рис. 9. Плазматрон с распределенной дугой ПРД-9

1 – катод, 2 – сопло входное, 3 – газоформирователь, 4 – газораспределительное кольцо, 5 – секция входная, 6 – секция переходная, 7 – секция МЭВ основная, 8 – сопло анодное, 9 – анод

Корпус электродного узла выполняют из коррозионно-стойкого материала – нержавеющей стали, латуни. Между рубашкой охлаждения и электродом предусматривают уплотнения, допускающие быструю замену электрода. Корпус электродного узла имеет клемму для подключения источника электропитания.

В плазматроне может быть два выходных электрода – в схеме двухстороннего истечения. В этом случае один электрод выполняет функцию анода, а другой – катода.

В плазматронах с внешней дугой выходной электрод обычно выполняет функцию вспомогательного электрода, необходимого для зажигания основного разряда и поддержания вспомогательного дежурного разряда, а затем выполняет функцию сопла, формирующего столб основного дугового разряда. В плазматронах с внешней дугой основным электродом на выходе из плазматрона служит металл обрабатываемого объекта процессах сварки, резки, плавки металла и др. Но этот электрод непосредственно не входит в конструкцию плазматрона.

3.3. Узел внутреннего электрода

Внутренний электрод обычно выполняет функцию катода. Катод может быть «холодным» или «горячим» – термоэмиссионным. Холодный электрод выполняют полым (трубчатым) с внутренней цилиндрической поверхностью. Такой электрод

[Оглавление](#)

может выполнять функции катода или анода, и работать на переменном токе (рис. 8, К1). Трубчатые катоды применяют при больших токах разряда, при нагреве окислительных сред (см. рис. 10).

Для стабилизации положения привязки разряда и интенсификации её перемещения по рабочей поверхности трубчатого электрода на электродном узле размещают магнитную катушку – соленоид (см. рис. 2 и 11).

Холодный внутренний электрод может иметь и внешнюю рабочую поверхность – в коаксиальных схемах плазмотронов с магнитной стабилизацией разряда (рис. 7а).

Горячий катод чаще выполняют торцевым с фиксацией разряда на торце катода (см. рис. 8, К2 и К3). В этом случае катод имеет державку с установленной в ней катодной термоэмиссионной вставкой, выполненной в виде цилиндрического стержня из тугоплавкого электродного материала (см. рис. 12).

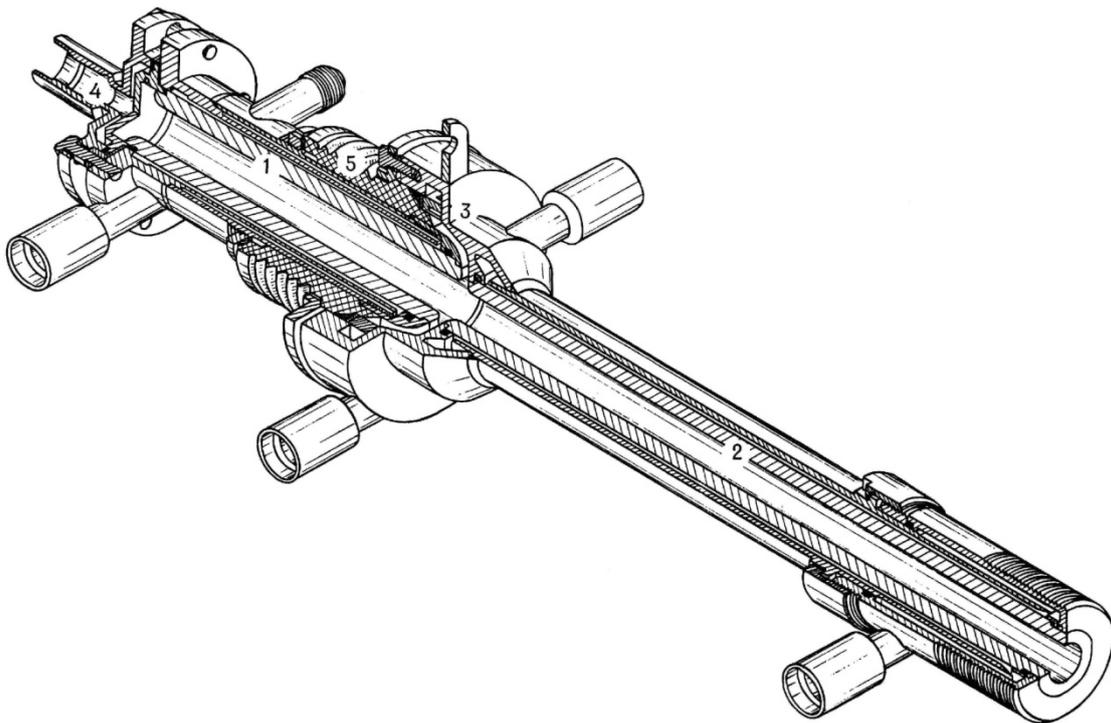


Рис. 10. Плазмотрон ПТ-74А [10] с газовой стабилизацией, с внутренним трубчатым электродом (линейная схема): 1 – внутренний электрод (фазный), 2 – выходной электрод (нулевой), 3 – узел подачи рабочего газа (основной), 4 – узел подачи рабочего газа (дополнительный), 5 – изолятор

[Оглавление](#)

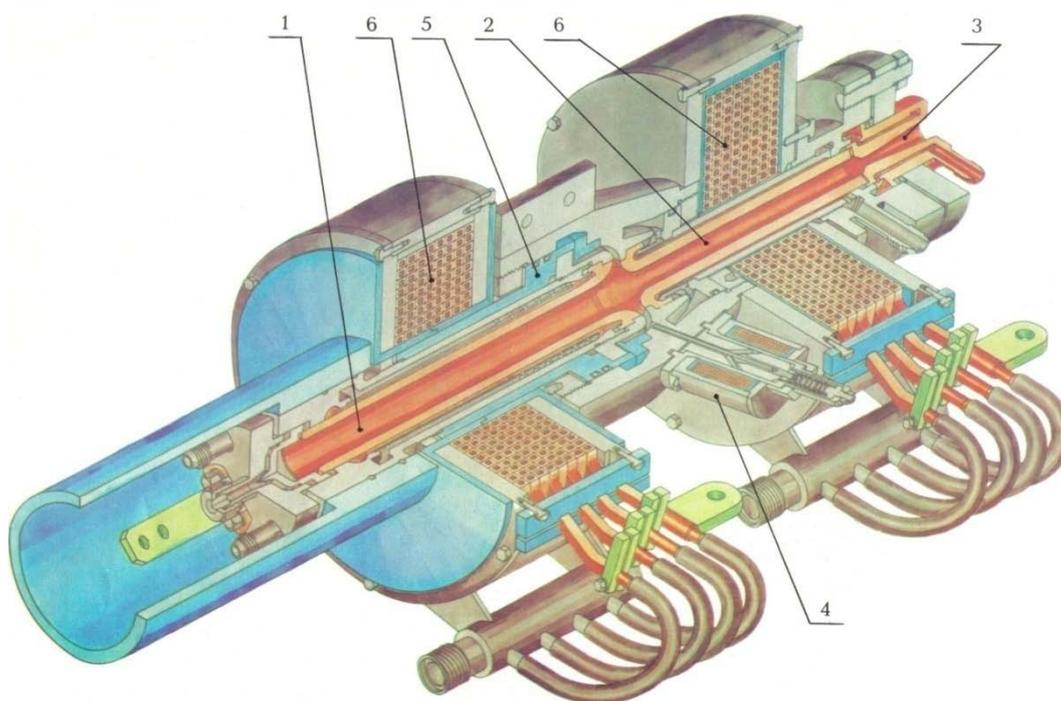


Рис. 11. Плазмотрон ПТ-84 [11] высокого давления, с газовой стабилизацией, с внутренним трубчатым электродом, с магнитным управлением разряда на электродах.
1 – катод, 2 – анод, 3 – сопло, 4 – поджигающее устройство, 5 – изолятор, 6 – соленоиды

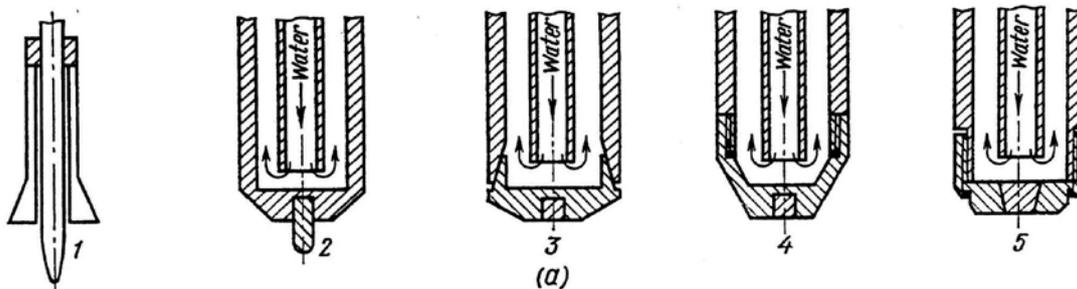


Рис. 12. Варианты выполнения торцевого катода. 1 – стержневой в цанге, 2 – стержневой, выступающий из охлаждаемой державки, 3, 4 – катодная вставка заделана заподлицо в охлаждаемую водой державку, 5 – катодная вставка непосредственно охлаждаемая водой

Вставку заделывают заподлицо в державку или она может выступать из державки (см. рис. 12). В последнем случае выступающий конец вставки затачивают на конус или сферу. Катоды с длинной выступающей вставкой, в цанге, обычно применяют при небольших токах разряда. Катоды с короткой выступающей вставкой (до $4d_k$), и с не выступающей вставкой используют при токах до 1500 А, а при больших

[Оглавление](#)

токах применяют трубчатые катоды. Термоэмиссионную вставку выполняют из вольфрама с присадкой тория, бария, лантана, иттрия, или из графита. Эти катодные материалы могут использоваться только в инертных газах (аргон, гелий), или в нейтральной и восстановительной среде (азот, водород и др.). Для работы в окислительной среде (воздух, кислород) используют холодные катоды, или горячие с эмиссионной вставкой из циркония или гафния, установленной в державку заподлицо. Эти катоды называют термохимическими, так как на горячем торце катода образуются оксиды и нитриды с высокой температурой плавления, защищающие поверхность катодной вставки от испарения и дальнейшего окисления, и обладающие хорошими эмиссионными свойствами. Недостатком термохимических катодов является существенное снижение ресурса работы при больших токах разряда, более 250 А и частых отключениях.

В плазмотронах для нагрева окислительных сред, особенно при больших токах разряда, используют горячие вольфрамовые катоды, но перед катодом образуют камеру, в которую подают защитный газ, например, аргон. Для этого перед катодом помещают диафрагму, которая также выполняет функцию вспомогательного электрода для зажигания разряда. Диафрагма имеет свою рубашку охлаждения и электрическую изоляцию от катода и от основного анода (см. рис. 9). Это усложняет конструкцию плазмотрона и обслуживающих систем, но позволяет повысить ресурс работы плазмотрона при больших токах разряда.

Организация рабочего процесса в плазмотроне фиксирует разряд на торце катодной вставки, и основная часть теплового потока в катод концентрируется на торце. Фиксация разряда на катодной вставке осуществляется вихревым потоком, или равномерной подачей рабочего вещества вокруг катода [1] (см. рис. 13 и 14).

[Оглавление](#)

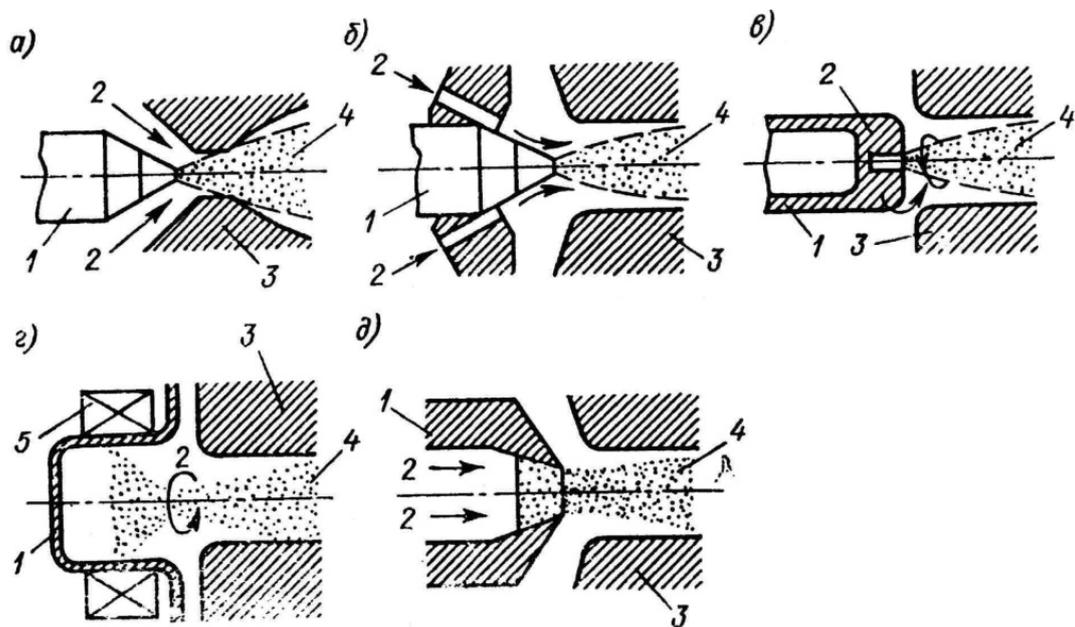


Рис. 13. Схемы стабилизации приэлектродных участков дуги: а – соплом, б – струями газа, в – газовым вихрем, г – магнитным полем, д – пористым вдувом. 1 – электрод, 2 – поток газа, 3 – канал (сопло), 4 – дуга, 5 – магнит

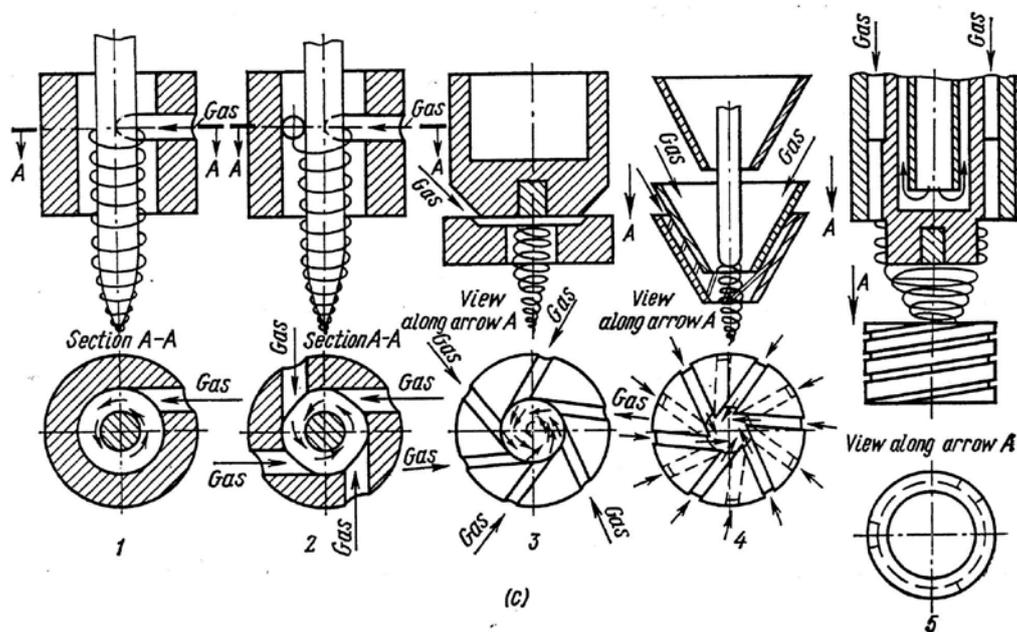


Рис. 14. Стабилизация привязки разряда на внутреннем катоде потоком газа

Державка катода интенсивно охлаждается, но из-за высокой интенсивности теплового потока и низкой теплопроводности тугоплавких материалов торцевая рабочая поверхность катодной вставки имеет высокую температуру, обеспечивающую,

[Оглавление](#)

преимущественно, термоэмиссионный катодный процесс. Развитая поверхность теплосъёма державки катода, выполненной, обычно, из меди, позволяет отвести тепловой поток в охлаждающую среду. Для фиксации привязки разряда в трубчатом электроде используют дополнительный ввод газа (двухкамерный плазмотрон), или магнитную систему (см. рис. 11).

3.4. Стабилизирующий канал

Используется в схемах с газовой стабилизацией или со стабилизацией разряда стенкой. Основная функция канала – фиксация длины столба разряда. В схемах с торцевым внутренним электродом стабилизирующий канал размещают в узле выходного электрода или в отдельном узле между электродами. В схемах с внутренним трубчатым электродом часть длины стабилизирующего канала размещается в выходном электроде, а часть длины – в узле внутреннего электрода. Фактически в этом случае в конструкции плазмотрона присутствуют два стабилизирующих канала, размещённых в разных узлах конструкции, суммарная длина которых определяет длину столба разряда. Кроме того, канал или его часть обычно выполняет функцию вспомогательного пускового поджигающего электрода. Схемные варианты выполнения канала представлены на рис. 8.

3.5. Выходной канал

Выходной канал в схемах с газовой стабилизацией и самоустанавливающейся длиной дуги, как правило, выполняют заодно с электродом в виде одной детали, с диаметром канала d , определяемым расчётом (см. рис. 15).

При стабилизации уступом обычно канал и электрод выполняют заодно в виде одной детали (рис. 16) и только в плазмотронах большой мощности электрод и канал выполняют отдельно (рис. 17). Последнее усложняет конструкцию плазмотрона, но облегчает смену изношенного электрода. Во всех перечисленных случаях канал выполняется металлическим и сплошным (см. рис. 8 Кан1).

В плазмотронах с межэлектродной вставкой (МЭВ) канал может быть выполнен в разных вариантах, в зависимости от теплонапряжённости конструкции. При низкой теплонапряжённости канал может быть выполнен из диэлектрического теплостойкого материала, кварца, сапфира с наружным охлаждением стенки газом. При умеренной теплонапряжённости канал выполняют из пористого теплостойкого диэлектрического материала, например, пенокордиерита с подачей нагреваемого газа через стенку (рис. 8 Кан4).

Оглавление

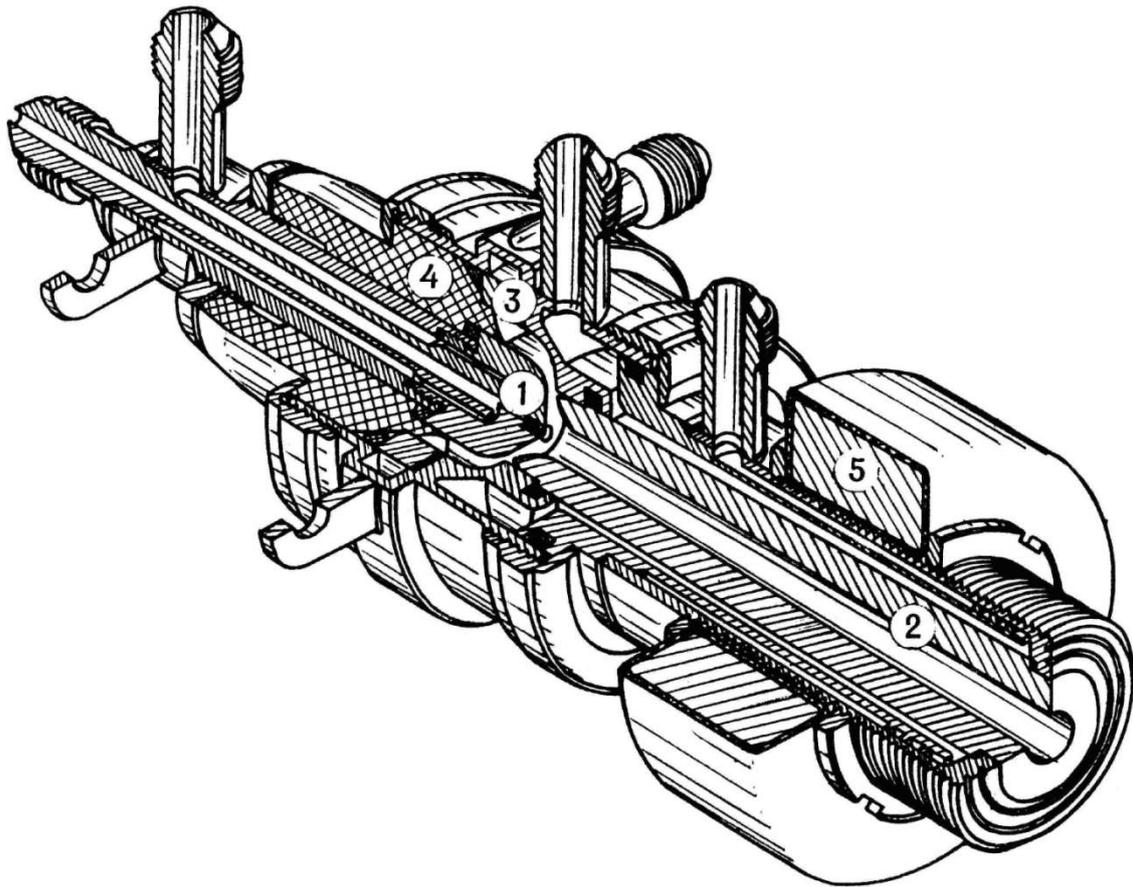


Рис. 15. Плазмотрон ЭДП-104А [10]. 1 – торцевой электрод (катод), 2 – выходной электрод (анод), 3 – узел подачи рабочего газа, 4 – изолятор, 5 – постоянный магнит (соленоид)

При высокой теплонапряжённости стенки канала выполняют металлическими, разделёнными на изолированные друг от друга секции (рис. 8 Кан3 или Кан2). Секции могут иметь рубашку водяного охлаждения (рис. 8 Кан2), или выполняются из пористого металла с внутренним (транспирационным) охлаждением плазмообразующим газом (рис. 8 Кан3). Для снижения конвективного теплового потока к стенке, а также для турбулизации потока газа в канале применяют подачу газа между секциями. Схемы организации подачи газа в канал представлены на рис. 18.

[Оглавление](#)

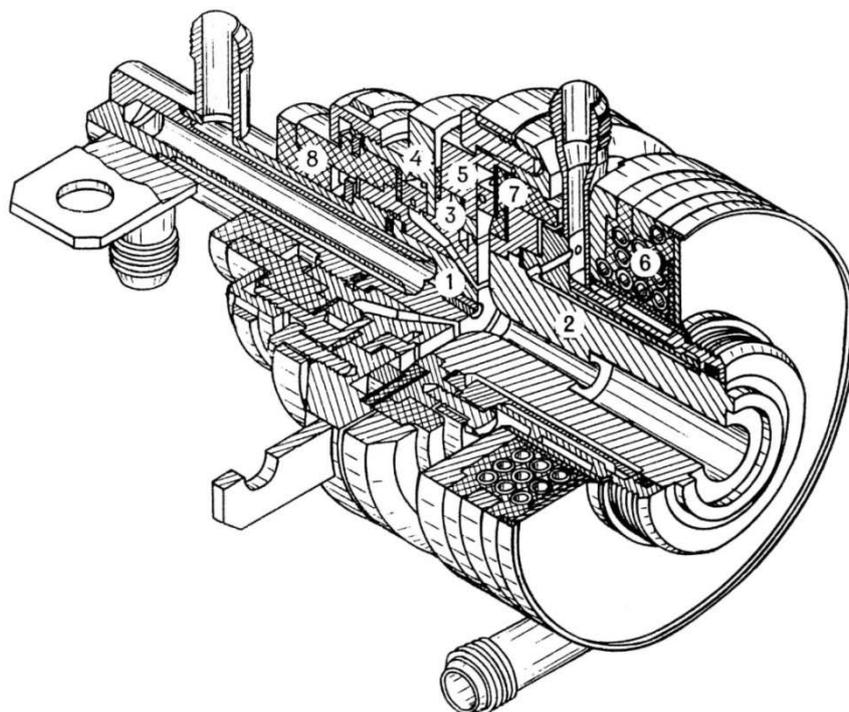


Рис. 16. Плазматрон ЭДП-109/200 [10]. 1 – катод, 2 – анод, 3 – сопло, 4 – узел подачи водорода, 5 – узел подачи водорода и метана, 6 – соленоид, 7, 8 – изоляторы

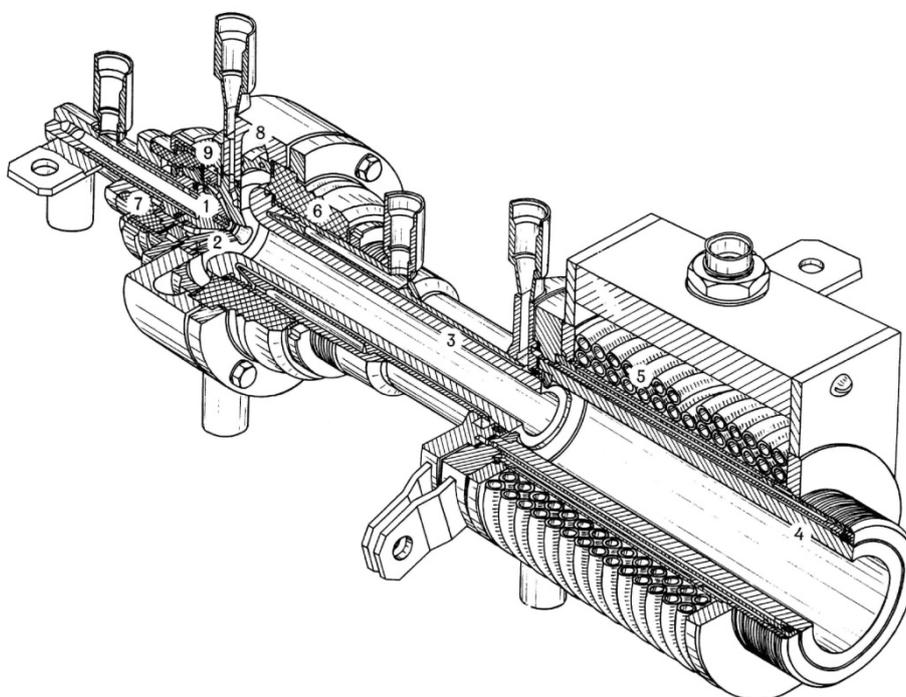


Рис. 17. Плазматрон ЭДП-107А [10]. 1 – катод, 2 – сопло, 3 – проставка, 4 – анод, 5 – соленоид, 6, 7 – изоляторы, 8 – узел подачи рабочего газа, 9 – узел подачи защитного газа

[Оглавление](#)

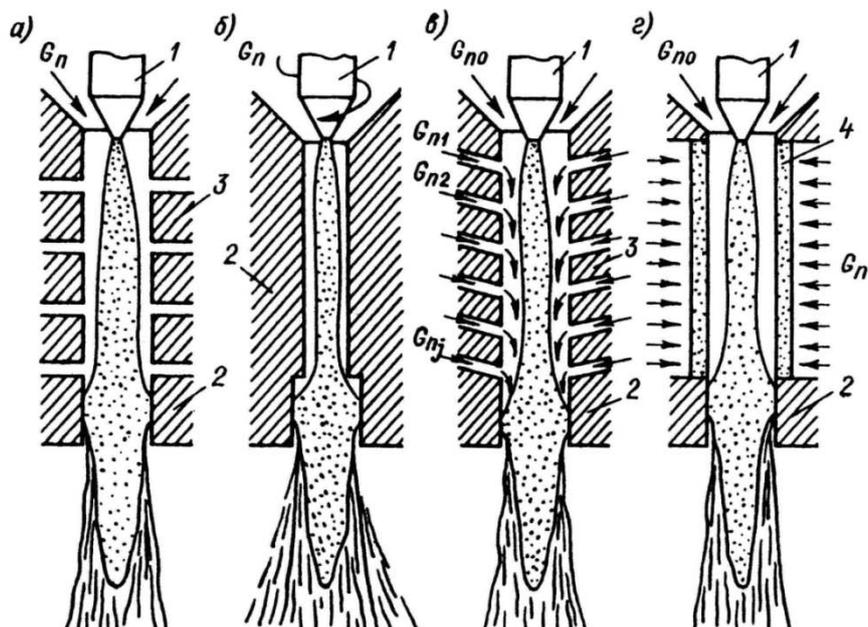


Рис. 18. Схемы организации подачи газа в канал: а – аксиальный, б – тангенциальный, в – распределенный, г – транспирационный. 1, 2 – электроды, 3 – секция межэлектродной вставки, 4 – пористая стенка; G_{no} – стабилизирующий газ, G_{no} , G_{n1}, \dots, G_{nj} – плазмообразующие газы

Для такой организации потока газа в конструкции элементов канала необходимо предусмотреть систему газовых каналов.

Во всех случаях в длину канала входит вспомогательный пусковой электрод, который может быть выполнен частью канала, или в виде отдельного от конструкции канала узла. Этот электрод снабжают рубашкой охлаждения и устройством подвода тока.

Отдельным случаем выполнения выходного канала в плазмотронах с газовой стабилизацией можно рассматривать межэлектродную камеру (газовихревую МЭВ) (см. рис. 1, E4).

Сплошную металлическую камеру большого диаметра D ($D \gg d_{ст}$, $D/d = 3 \dots 4$) размещают между пусковым электродом и основным выходным электродом. В камере организуют вихревой поток рабочего вещества, в центре которого устанавливается столб дугового разряда, диаметром $d_{ст}$. Вихревой поток осуществляется вихревыми устройствами ввода, размещёнными по краям камеры (см. рис. 8 ВД и ВД2). Стенки

[Оглавление](#)

камеры снабжают рубашкой охлаждения. Камеру выполняют цилиндрической (рис. 19) или, для работы на водяном паре – конической, сужающейся к выходу (рис. 20).

Входной и выходной диаметры камеры больше диаметра выходного электрода. При работе на водяном паре принимают меры для предотвращения конденсации пара на стенках камеры – регулированием теплоотвода от стенки или использованием радиационного охлаждения камеры (рис. 20).

Плазмотроны с межэлектродной камерой существенно проще плазмотронов с секционированным каналом, особенно при большой мощности в агрегате, имеют более высокий КПД, но отладка процесса стабилизации разряда в них сложнее.

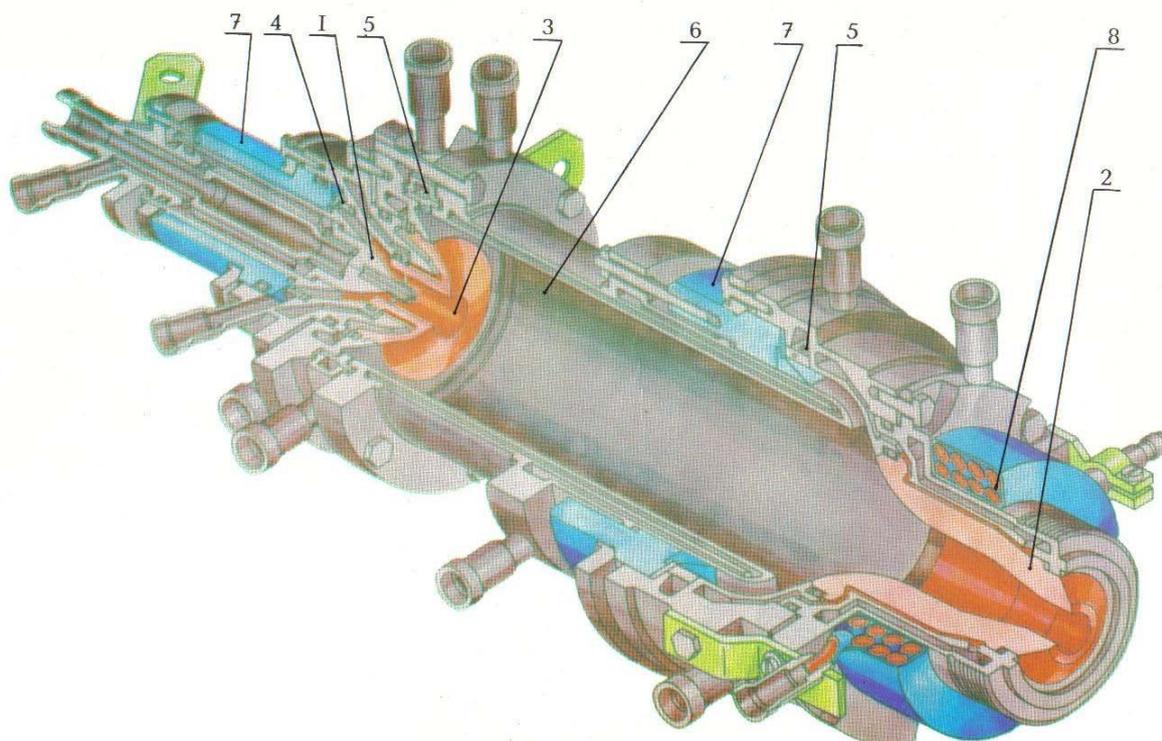


Рис. 19. Плазмотрон ЭДП-118Е [11] с межэлектродной камерой (газовихревой МЭВ): 1 – катод, 2 – анод, 3 – электрод поджига, 4 – узел подачи защитного газа, 5 – узлы подачи рабочего газа, 6 – газовихревая межэлектродная вставка, 7 – изоляторы, 8 – соленоид

3.6. Канал внутреннего электрода

Канал внутреннего электрода может быть образован как в схемах с внутренним трубчатым, так и внутренним торцевым электродами. В обоих случаях канал размещают между основным вихревым вводом газа (рис. 8 В) и электродом (рис. 8 К). При этом канал выполняют сплошным металлическим (рис. 8 Кан1) и в узле внутреннего электрода. Трубчатый электрод выполняют заодно с каналом, а торцевой

электрод выполняют отдельным узлом, но электрически не изолируют от канала, который выполняет функцию пускового электрода. Таким образом, столб дугового разряда размещается частично в канале выходного электрода, частично в канале внутреннего электрода. Соотношение между длинами этих каналов при определённой общей длине, определяется конструктором.

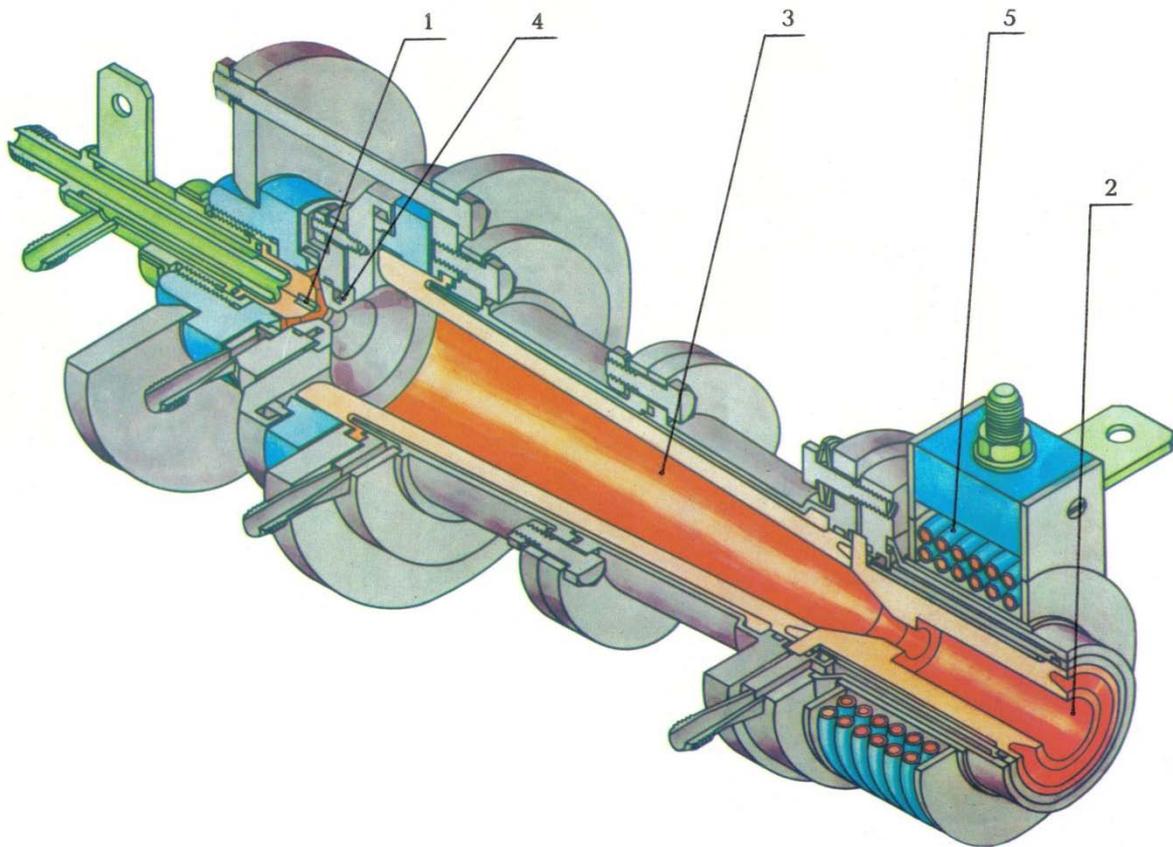


Рис. 20. Плазматрон ЭДП-145 [11] с конической межэлектродной камерой (газовихревой МЭВ), предназначенный для работы на водяном паре: 1 – катод, 2 – анод, 3 – промежуточный электрод, 4 – сопло, 5 – соленоид

Рабочий процесс в канале внутреннего электрода более сложен, чем в выходном электроде, и возможен только в вихревом потоке газа. В канале внутреннего электрода образуются два разнонаправленных потока нагреваемого газа: пристеночный вихревой поток от места ввода газа внутрь канала к внутреннему электроду, и приосевой поток в направлении выходного электрода (см. рис. 2б). Для улучшения этого процесса диаметр канала внутреннего электрода d_k , обычно, выполняют большего диаметра, чем диаметр выходного d , как правило $d_k/d = 1...2$. Привязку разряда во внутреннем электроде можно перемещать по длине подачи газа в торце внутреннего электрода

[Оглавление](#)

(двухкамерный плазмотрон). Таким образом поверхность, выполняющая функции внутреннего электрода, может перемещаться по длине канала.

Организация охлаждения канала внутреннего электрода не отличается от охлаждения выходного электрода – также используют средства для охлаждения канала по всей длине.

4. ГАЗОВАЯ СИСТЕМА

Газовая система, предназначена для организации внутри плазмотрона потока газа, обеспечивающего стабилизацию столба разряда, эффективный теплоотвод от столба, расположение и фиксацию столба разряда на электродах, защиту электродов от химически активного рабочего вещества, ввод в поток плазмообразующего вещества, технологической среды и т.д. Газовая система также может выполнять функцию охлаждения элементов конструкции плазмотрона. Основное рабочее (плазмообразующее) вещество, как правило, вводится в газообразном виде. Дополнительные технологические потоки вводятся в смеси с транспортирующим газом в виде частиц порошка, проволоки или жидких веществ.

Система включает в себя устройства для ввода газа в разрядную камеру, придания потоку газа в плазмотроне необходимой скорости и направления движения, ввода, при необходимости, защитного или технологического газа, каналы для транспортировки газа, присоединительные устройства (штуцеры) к внешним системам.

4.1. Основной ввод газа

Основной ввод газа осуществляется, как правило, между электродами (см. рис. 8 В). Поток плазмообразующего газа в плазмотронах бывает закрученным (вихревым) или осевым, в направлении выходного электрода.

В вихревом потоке образуется радиальный градиент давления с минимумом статического давления на оси потока, имеющий осевую симметрию вдоль движения потока. Это способствует размещению и стабилизации столба дуги на оси вихревого потока. Для схем плазмотронов с внутренним трубчатым глухим электродом стабилизация столба в канале внутреннего электрода возможна только при наличии вихревого потока.

Тангенциальная составляющая скорости вихревого потока перемещает привязку разряда по цилиндрической поверхности канала электрода, распределяя ток разряда по

[Оглавление](#)

этой поверхности, обеспечивает равномерный износ поверхности по азимуту. Вихревой поток обеспечивает более равномерное распределение температуры по радиусу струи на выходе из плазмотрона. Поэтому в плазмотронах чаще используют вихревую организацию движения потока плазмообразующего газа.

Однако, структура вихревого потока не всегда благоприятна для технологии, например, для обработки порошковых материалов. Также при относительно малых расходах газа (высокотемпературные плазмотроны) вихревая стабилизация становится малоэффективной.

Основной вихревой ввод газа производится в зазор между электродами в камеру, диаметр которой D_v больше диаметра электродов; обычно, $D_v/d = 3 \dots 5$. Ввод газа в камеру закрутки должен быть достаточно равномерным, число отверстий или каналов ввода газа не менее 4, сечение каналов должно обеспечить скорость истечения $0,3 \dots 0,5$ скорости звука. Длина тангенциальных отверстий не менее $3 \dots 4$ калибров. Вихревую камеру обычно организуют в виде полости между электродами, на периферии которой выполняют тангенциальные отверстия, винтовые или тангенциальные канавки. Минимальная ширина камеры, обычно, образует межэлектродный зазор для поджига разряда. В схемах с торцевым внутренним электродом вихревую подачу используют для стабилизации разряда на торце электрода (рис. 13 и 14).

Осевой ввод газа используют только в схемах с торцевым внутренним электродом (рис. 13).

4.2. Вспомогательные вводы газа

Вспомогательные или дополнительные вводы газа (см. рис. 8 ВД и ВД2) преследуют разные цели: это или организация местного или локального воздействия на разряд, или ввод защитного газа, обычно для защиты горячего катода от окисления рабочим газом.

В плазмотронах с вихревой газовой стабилизацией в случае трубчатого внутреннего электрода и канала место привязки разряда неопределённо и неустойчиво. Поэтому для управления привязкой разряда и его электрическими характеристиками в глухом торце трубчатого электрода помещают дополнительную вихревую камеру, через которую подают часть общего расхода плазмообразующего газа (двухкамерный плазмотрон на рис. 10). Изменяя соотношение расходов через основную и дополнительную камеры, управляют местом привязки разряда, и зоной износа электрода. Для повышения напряжённости электрического поля в столбе разряда

[Оглавление](#)

устраивают местный ввод газа после основного ввода («острый вдув»), или распределённый ввод газа между секциями МЭВ, а также через пористую МЭВ («распределённый вдув»). Распределённый ввод газа не только воздействует на напряжённость поля, но и создаёт пристеночный слой холодного газа, снижающий конвективный тепловой поток на стенку, и повышающий КПД плазмотрона. Однако устройство распределённого вдува существенно усложняет конструкцию плазмотрона и используется в плазмотронах большой мощности, рис. 21. При этом расход газа через плазмотрон делится между всеми вводами.

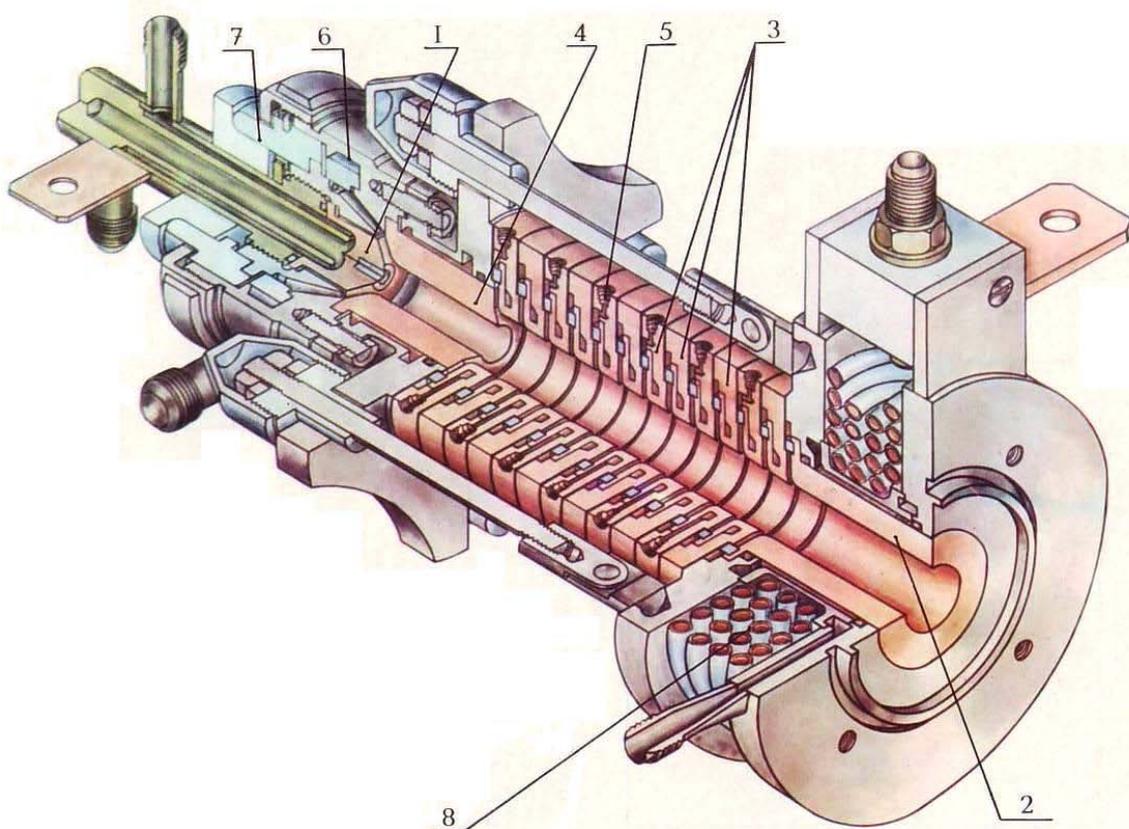


Рис. 21. Плазмотрон ЭДП-119 [11] с секционированной межэлектродной вставкой и распределённой подачей газа между секциями: 1 – катод, 2 – анод, 3 – секции, 4 – поджигающая секция, 5 – узел подачи рабочего газа, 6 – узел подачи защитного газа, 7 – изолятор, 8 – соленоид

4.3. Ввод защитного газа

Ввод защитного газа производится между внутренним электродом и диафрагмой (соплом), отделяющей полость перед электродом от основного потока рабочего газа, рис. 9. В этом случае расход защитного газа ещё выполняет функцию стабилизации привязки к торцу внутреннего электрода. В качестве защитных газов используют

[Оглавление](#)

инертные газы – аргон, реже – гелий, и малоактивные газы – азот, углеводороды. Расход защитного газа, обычно, менее 10% от расхода плазмообразующего, и он не входит в общий расход газа через плазмотрон.

5. МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ

Назначение магнитных систем – принудительное, с помощью электромагнитной силы, перемещение разряда – в плазмотронах с магнитной стабилизацией разряда, или приэлектродных участков – для магнитной фиксации положения привязки в плазмотронах с газовой стабилизацией. Магнитные системы также используют для повышения надёжности работы электродов и снижения их эрозии. Для магнитной стабилизации необходимы магнитные поля уровня до 0,1 Тл. Для магнитной фиксации и снижения эрозии при умеренном давлении $(1...10)10^5$ Па магнитная индукция на оси электрода необходима на уровне 0,04...0,08 Тл, а при высоких давлениях $(10...100) \cdot 10^5$ Па – до 0,3 Тл.

Магнитная система выполняется в виде магнитной линзы – с заметной радиальной составляющей магнитного поля в области действия. При этом, направление тока и радиальной составляющей поля должны создавать силу, направленную к плоскости симметрии магнитной системы. В основе системы применяют короткую соленоидную катушку (рис. 16), или постоянный магнит с необходимой конфигурацией поля (рис. 15). При больших значениях индукции применяют сердечник. Плоскость симметрии магнитного поля катушки определяет область привязки разряда, и чем короче катушка, тем уже область привязки разряда.

Катушки магнитной системы обычно выполняют из медной трубки, охлаждаемой водой, и включают последовательно с разрядом.

6. СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ

Система охлаждения предназначена для отвода тепловых потоков на стенки элементов конструкции и обеспечения их работоспособности. Охлаждение применяют жидкостное или газовое, в зависимости от степени теплонапряжённости конструкции и условий эксплуатации плазмотрона. Охлаждающей средой могут быть вода или плазмообразующий газ, обычно, воздух. Внутри плазмотрона охлаждение может быть параллельным – каждый элемент (электрод) охлаждается своим потоком

теплоносителя, или последовательным, когда один поток теплоносителя последовательно проходит через все элементы конструкции.

6.1. Конструкции систем охлаждения

При параллельном охлаждении каждый узел конструкции снабжают подводом и отводом теплоносителя, который затем направляют к охлаждаемой поверхности. Для охлаждения поверхности по всей длине в корпусе устраивают канал над охлаждаемой поверхностью, с подводом и отводом теплоносителя по концам канала, а затем каналами в корпусе теплоноситель сообщают с подводами к узлу конструкции, как это видно, например, на рис. 15 и 11. Такое устройство охлаждения позволяет разместить подводящие устройства (штуцеры) на корпусе узла там, где это нужно и удобно. Зазор между корпусом и охлаждаемой поверхностью выбирают из соображений скорости теплоносителя над этой поверхностью. Однако при большом количестве охлаждаемых элементов конструкции плазмотрон оказывается сложным и громоздким из-за большого количества подводов к нему, например, плазмотроны с секционированной МЭВ.

При последовательном охлаждении охлаждающую среду подводят к одному элементу конструкции, затем по внутренним каналам теплоноситель направляют в корпуса других узлов, и в конце выводят через присоединительное устройство последнего узла, или наружу, если теплоноситель воздух. Такая система упрощает эксплуатацию плазмотрона, используется при относительно небольших мощностях и умеренной теплонапряжённости, а также, если позволяет напор теплоносителя в системе охлаждения. При воздушном охлаждении плазмотрон может иметь один общий подвод воздуха, а уже внутри поток воздуха делится на плазмообразующий и поток охлаждения (см. рис. 22).

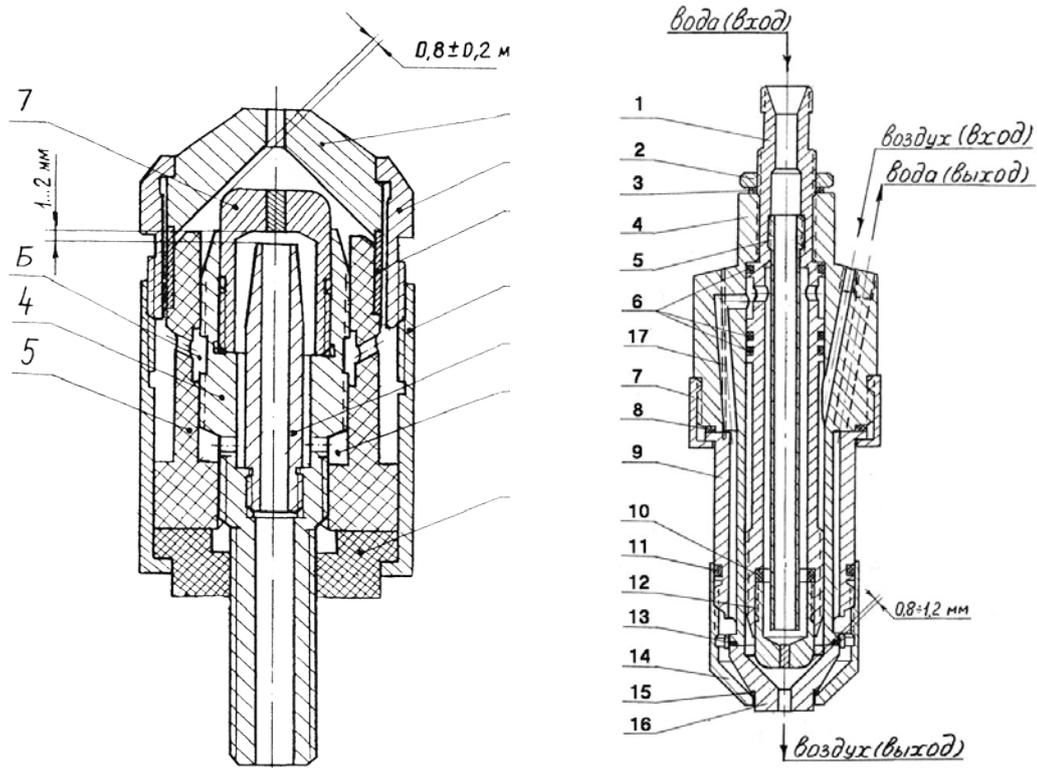


Рис. 22. Плазмотрон воздушно-плазменной резки металла (ПУРМ)

а) воздушного охлаждения (рабочий ток 180 А) с последовательным охлаждением катода и сопла - вспомогательного анода, часть расхода подают для резки, в зазор между катодом и соплом; б) водяного охлаждения (рабочий ток 400 А)

6.2. Уплотнения

При охлаждении водой в связи с тем, что электроды, как правило, выполняют сменными, между сменными элементами и корпусом необходимы уплотнения, обычно резиновые. При этом одно из уплотнений выполняют торцевым, а другое радиальным в виде резинового кольца. Радиальные уплотнения, стандартные резиновые кольца круглого сечения и размеры канавок для них, следует проектировать согласно [16]. Канавку под уплотнение чаще выполняют в корпусе, более холодном. В случаях, когда корпус нагревается и нельзя использовать резину, уплотнение выполняют металл по металлу, что требует больших усилий затяжки, жёсткости сопрягаемых деталей, учёта температурных деформаций деталей. При воздушном охлаждении специальных уплотнительных деталей не применяют, что заметно упрощает конструкцию.

[Оглавление](#)

7. ПРИСОЕДИНЕНИЯ К ВНЕШНИМ СИСТЕМАМ

Плазмотрон, как часть плазменной установки, связан с внешними обслуживающими его системами: системой электропитания, системой подачи газа, системой охлаждения, технологической системой. Для этого в конструкции плазмотрона предусматривают присоединительные устройства – электрические (клеммы), гидравлические, пневматические (штуцеры), а также устройства для закрепления плазмотрона на установке. Основное требование к этим устройствам – простота монтажа и надёжность при многократном использовании. Каждая система имеет свои присоединительные устройства, чем-то отличающиеся от устройств других систем – для предотвращения ошибок при монтаже. Размеры присоединительных устройств должны соответствовать величинам проходящих через них потоков при допустимых удельных характеристиках (плотностях тока, скоростях потоков).

Для подводов охлаждающей среды и плазмообразующих газов используют штуцеры с нормализованными элементами уплотнения, которые позволяют легко подсоединить плазмотрон к внешним системам. Обычно используют уплотнения «металл по металлу» – «конус по конусу» или «шар по конусу», реже – штуцеры с мягкими прокладками [16].

Клеммы подвода тока можно видеть в плазмотронах, представленных на рис. 15...17 и рис. 19...21.

В плазмотронах умеренной мощности часто штуцеры и шланги к ним используют также и для подвода тока (кабель-шланги), что существенно упрощает монтаж плазмотрона на установке и облегчает кабельные линии подвода тока за счёт их интенсивного охлаждения. Такие кабель-шланги чаще используют для плазмотронов, перемещающихся в процессе работы, например, при плазменной резке металлов. В таких случаях часто все внешние подводы к плазмотрону объединяют в один общий узел подвода, который прикрепляется к плазмотрону одной накидной гайкой (рис. 22).

Крепление плазмотрона к установке зависит от применения плазмотрона на установке и назначения установки. Если плазмотрон используют как плазменный ручной инструмент, его снабжают ручками и кабель-шлангом необходимой длины. Если плазмотрон используют стационарно, его прикрепляют к стенду или к манипулятору. Для этого на корпусе плазмотрона предусматривают специальные места крепления в виде отверстий под болты или шпильки, фланцев, кронштейнов и др.

8. УСТРОЙСТВА ВОЗБУЖДЕНИЯ (ЗАЖИГАНИЯ) РАЗРЯДА

Как правило, напряжения основного источника питания разряда недостаточно для пробоя промежутка между электродами и инициирования – зажигания разряда. Поэтому для возбуждения разряда применяют специальные устройства и дополнительные источники электропитания.

Применяется в основном три способа возбуждения разряда: закорачиванием или замыканием электродов, высоковольтным и высокочастотным пробоем и заполнением межэлектродного промежутка плазмой от вспомогательного источника плазмы.

Зажигание разряда закорачиванием электродов осуществляется перемещением одного из основных электродов до касания с другим с последующим разведением электродов. Этот способ применяют для небольших плазмотронов, например, для плазмотронов микроплазменной сварки. Второй способ – перемещением дополнительного подвижного электрода до касания с основным с последующим их разведением. Этот вариант применяют для мощных плазмотронов, используя дополнительный электрод, который вводят в зазор с помощью привода, а при зажигании разряда быстро выводят, в результате чего образуется вспомогательный разряд на один из основных электродов, который затем переходит на другой основной электрод. В качестве привода электрода используют электромагниты или пневматику (рис. 23).

Третий способ – закорачивание электродов проволочкой, которая, сгорая, образует плазменный мостик. Способ наиболее простой, но его целесообразно применять при редких включениях плазмотрона, из-за эксплуатационных неудобств. При этом также появляется возможность загрязнения плазмы материалом проволочки.

Высоковольтный и высокочастотный пробой используют широко, как наиболее удобный в эксплуатации. К электродам, размещённым на расстоянии не более 1...3 мм, подключают высокочастотный источник электропитания с напряжением 3...10 кВ (осциллятор), и основной источник электропитания через высокочастотный фильтр. Высокочастотный источник необходим для разделения цепей постоянного тока и осциллятора. После пробоя межэлектродного промежутка напряжением осциллятора, между электродами зажигается основной дуговой разряд. В конструкции плазмотрона минимальное расстояние между электродами должно быть там, где необходим пробой. В противном случае возможны пробои в непредусмотренных местах, что приводит к аварии. Использование этого способа запуска требует тщательной отработки конструкции для предотвращения нежелательных пробоев. Применение

[Оглавление](#)

осцилляторного пуска усложняет систему электропитания, требует использования дросселей на ток разряда, но удобнее и безопаснее в эксплуатации.

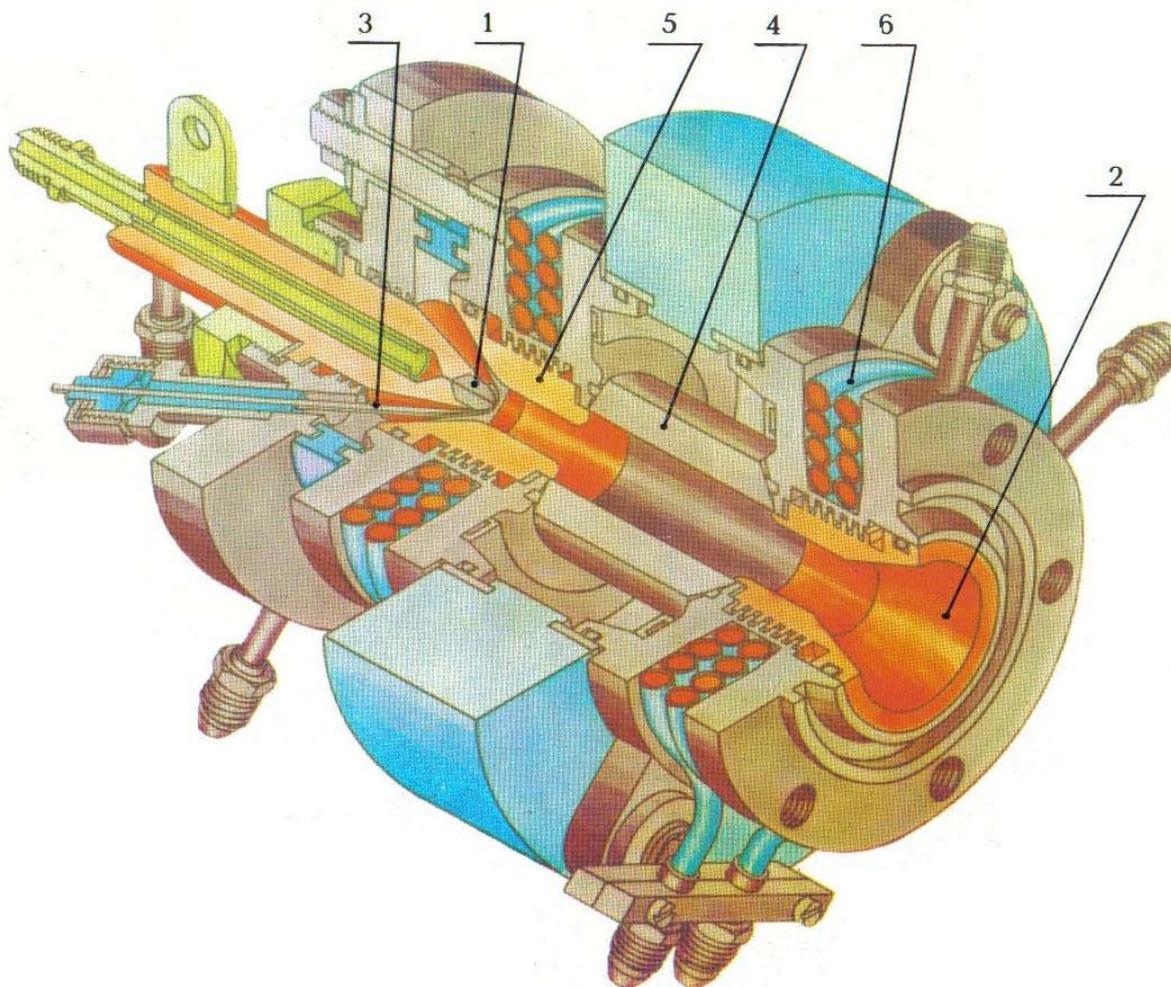


Рис. 23. Плазматрон ППЭД-0,3 [11] с пористой межэлектродной вставкой.

Поджиг с помощью подвижного электрода 3 с электромагнитным приводом:

1 – катод, 2 – анод, 3 – электрод поджига, 4 – пористая межэлектродная вставка,
5 – промежуточный электрод, 6 – соленоид

Возбуждение разряда подачей плазмы в межэлектродный промежуток осуществляется с помощью вспомогательного генератора плазмы, в качестве которого в конструкцию плазматрона встраивают небольшой импульсный генератор плазмы, или рядом с основным электродом предусматривают дополнительный электрод, на который зажигают вспомогательный дуговой разряд. Такие способы возбуждения называют двухступенчатыми (многоступенчатыми).

При достаточно большом расстоянии между основными электродами разряд между основным и вспомогательным электродами генерирует струю плазмы, которая,

[Оглавление](#)

заполняя канал между электродами, позволяет возбудить основной разряд. Такой способ используют в плазмотронах с МЭВ или с межэлектродной (газовихревой) камерой. В случае металлической секционированной МЭВ рабочее напряжение перед иницированием основного разряда подают на секции канала, что облегчает зажигание основного разряда.

9. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ПЛАЗМОТРОНОВ РАЗНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Как уже отмечалось, существует множество технологических процессов с применением плазмотронов. Основное предназначение плазмотронов – получение и нагрев плазменных потоков, которые затем используют для нагрева технологических материалов, подаваемых в струю плазмы (порошков или проволоки), для проведения химических реакций в струе плазмы, или для интенсивного нагрева поверхностей в потоке плазмы. При нагреве металлических поверхностей целесообразно использовать не только тепловую энергию потока плазмы, но и энергию приэлектродной области электродугового разряда, если нагреваемую поверхность использовать в качестве электрода. Это повышает концентрацию энергии на поверхности, а также повышает КПД процесса за счёт выноса части разряда из плазмотрона, и превращения приэлектродных потерь энергии в полезную энергию процесса нагрева поверхности. По этим признакам все плазмотроны можно разделить на плазмотроны с внутренней дугой для нагрева потока газа, и плазмотроны с внешней дугой – для нагрева металлических поверхностей. К последней группе относят плазмотроны для плазменной сварки, плазменной резки металлов, металлургические плазмотроны для плавления металлов в электродуговых плазменных печах, плазмотроны для плазменно-механической обработки металлов (резки резцом, выдавливания). Плазмотроны с внешней дугой имеют свои характерные особенности.

Плазмотроны с внутренней дугой – наиболее распространённая, разнообразная и универсальная по применению разновидность плазмотронов.

9.1. Плазмотроны универсального применения

Плазмотроны могут использоваться в разных технологических процессах, как генераторы плазмы в технологической установке. Могут использовать ряд определённых газов: нейтральных, восстановительных, окислительных, но при этом

[Оглавление](#)

характеристики плазмотрона будут свои для каждого газа. К конструктивному оформлению не предъявляются специфические требования кроме присоединительных размеров к технологическим аппаратам. Уровень мощности и характеристик плазмы на выходе – наиболее широкий для плазмотронов этого типа и определяется требованиями технологического процесса. Требования к характеристикам электропитания обычно специально не лимитируются. Расположение присоединительных устройств существенного значения не имеет. Для таких плазмотронов важнейшими характеристиками являются время непрерывной работы, ресурс, надёжность, стабильность характеристик, КПД нагревателя, чистота плазмы. К этой группе относятся плазмотроны типа ЭДП, ППЭД, ПРС, ПРМ, ПТ, ПМ – представленные в [10 и 11]. Некоторые из этих плазмотронов показаны на рис. 15...17 и рис. 19...23.

9.2. Плазмотроны плазменного напыления

При плазменном напылении плазмообразующий газ нагревается в плазмотроне и ускоряется с помощью сопла. В поток нагретого газа вводится порошок напыляемого материала, который нагревается и ускоряется потоком плазмы, после чего попадает на обрабатываемую поверхность, образуя на ней слой покрытия. Покрытие образуется расплавленными частицами, которые привариваются к поверхности подложки и друг к другу. Качество покрытия существенно зависит от степени нагрева частиц и их скорости при ударе о подложку, что определяется скоростью, температурой и теплопроводностью плазмы на выходе из плазмотрона, а также тепловыми свойствами напыляемого материала. Для напыления используют разные материалы – тугоплавкие металлы – вольфрам, молибден и другие, оксиды алюминия, циркония, кремния, титана, карбиды, бориды, нитриды тантала, кремния, ниобия, гафния и др. В некоторых случаях в качестве материала для напыления используют проволоку, которая подаётся в струю плазмы, расплавляется, распыляется в струе плазмы, а капли ускоряются и наносятся на напыляемую поверхность.

Плазмотроны для напыления, обычно, имеют мощность в пределах 100 кВт, чаще 20...30, в качестве плазмообразующих газов используют аргон, азот, смеси аргона с гелием [9, 12]. В некоторых случаях используют воздух. Выбор плазмообразующего газа и температуры плазмы определяется свойствами напыляемого материала, требованиями к качеству покрытия и допустимой его стоимостью. Смеси используют для повышения мощности плазмотрона и повышения теплопроводности плазмы.

[Оглавление](#)

Напыляемый материал вносят в струю плазмы в виде порошка или проволоки, которая плавится и распыляется в струе плазмы. Порошок обычно вводят в выходную часть канала анода или в сопло вместе с потоком транспортирующего газа. Место ввода выбирают таким образом, чтобы в пределах тракта плазмотрона частицы порошка не успели нагреться до температуры плавления. В противном случае расплавленные частицы налипают на стенки канала, образуя капли и нарушая процесс. В случае использования проволоки на неё подают анодный потенциал, что облегчает её плавление и повышает общий КПД процесса.

При напылении достаточно температуры потока, достигаемой в плазмотронах с газовой стабилизацией разряда, поэтому обычно используют схемы с газовой стабилизацией, и чаще с фиксированной длиной дуги – уступом или МЭВ. Плазмотроны для напыления обычно сильноточные и низковольтные, с использованием сварочных источников электропитания 75...150 В. Для стабильности разряда используют торцевые катоды. Обычно в плазмотроне используют осевой ввод газа – для удержания напыляемых частиц у оси потока плазмы. Характерные конструкции плазмотронов для напыления представлены на рис. 24...29.

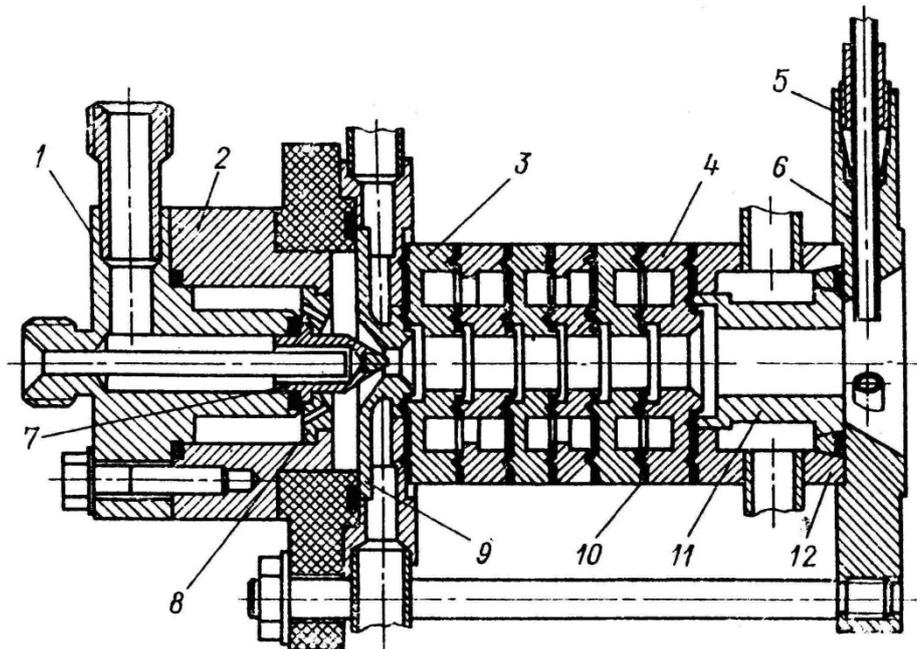


Рис. 24. Плазмотрон ПН-6 [9] с МЭВ для плазменного напыления

1 – катодный узел, 2 – корпус катода, 3 – секция МЭВ, 4 – переходная секция МЭВ, 5 – цанга, 6 – шихтопровод, 7 – катод, 8 – газоформователь, 9 – сопло входное, 10 – изолятор, 11 – анодное сопло, 12 – корпус анода

[Оглавление](#)

Плазмотроны для напыления также используют для плазменной обработки порошковых материалов – сфероидизации (оплавления) частиц, очистки поверхности частиц порошка и т.д. В частности, такой плазмотрон использован для нанесения декоративных покрытий на поверхность бетона.

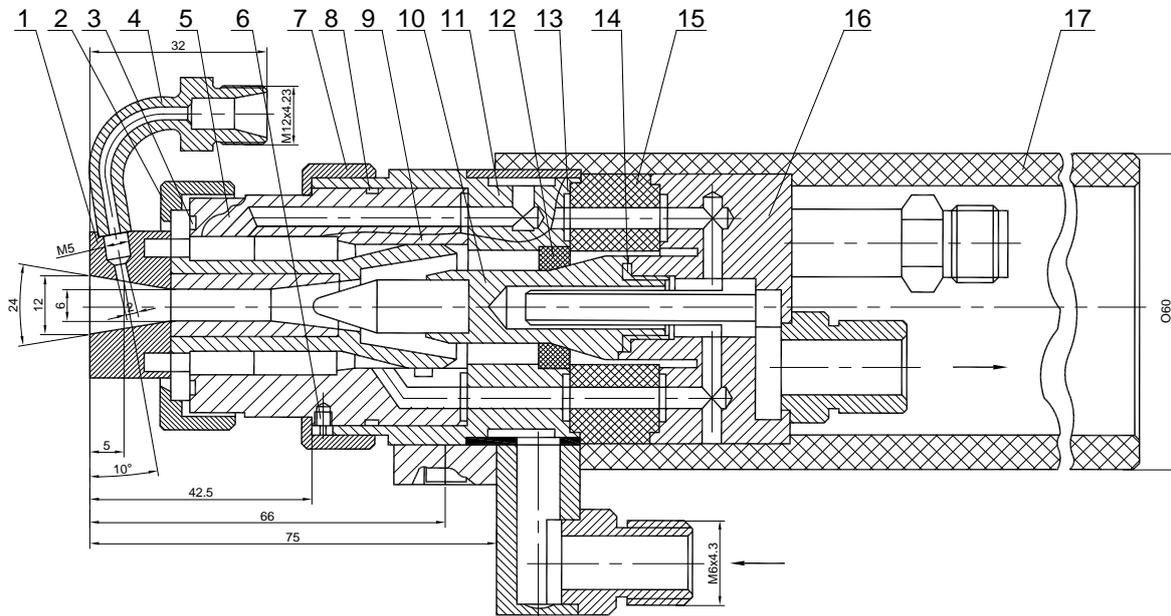


Рис. 25. Плазмотрон для напыления фирмы «Зульцер» с самоустанавливающейся длиной дуги

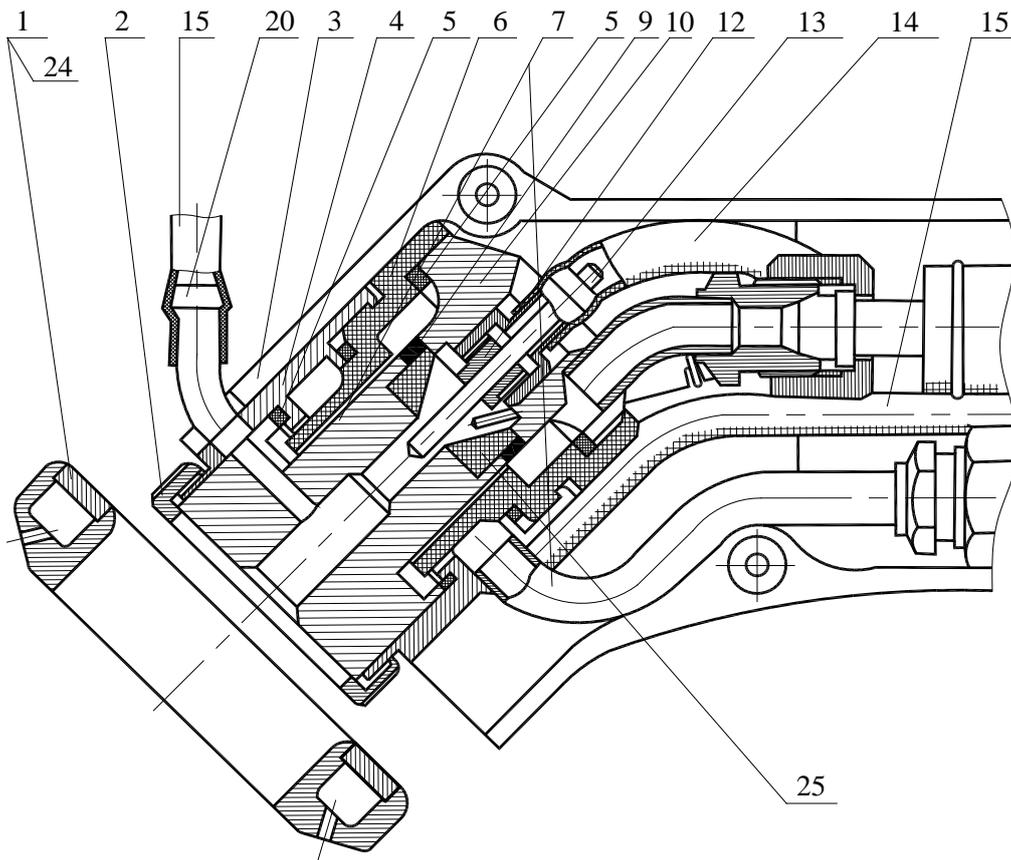


Рис. 26. Плазматрон ГН-5 со стабилизацией разряда уступом. Ввод порошка в область разряда. На выходе из плазмотрона размещена насадка подачи нейтрального газа вокруг струи

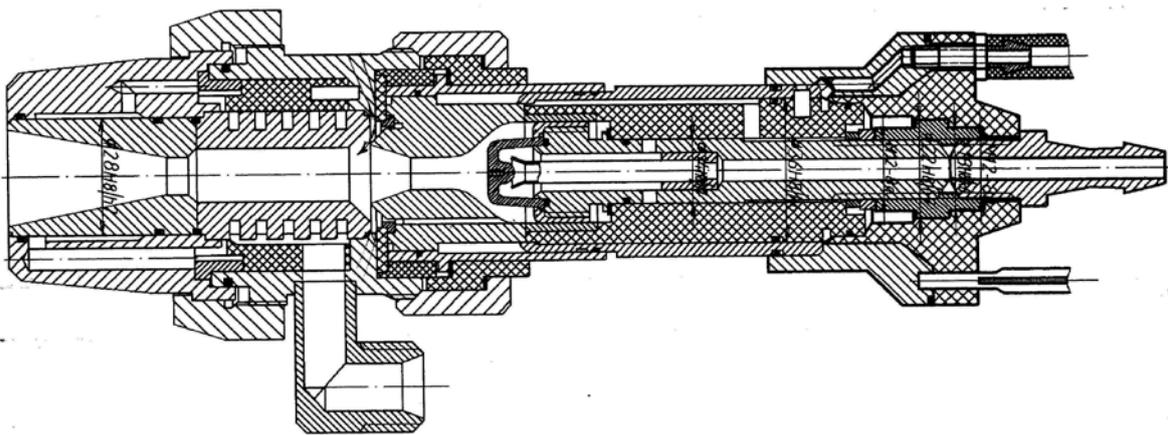


Рис. 27. Плазматрон ПУН-1. Ввод порошка в струю за соплом

[Оглавление](#)

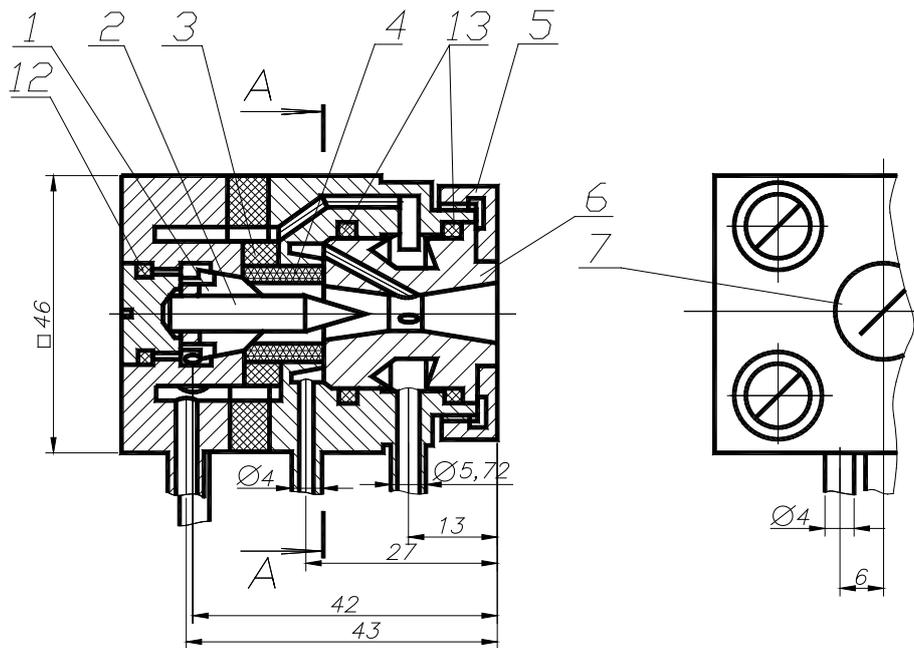


Рис. 28. Плазмотрон со сверхзвуковым соплом. Ввод порошка в критическую часть сопла

9.3. Плазмотроны для нагрева и обработки неметаллических материалов

К этой группе относятся плазмотроны для переработки (сжигания) особо вредных отходов (радиоактивных, биологических), плазмотроны декоративной обработки поверхностей – оплавления бетона, кирпича, бурения и расширения скважин, разрушения и резки бетона.

К плазмотронам для нагрева материалов – сжигания или оплавления требования определяют условия реализации процесса. Температура умеренная уровня $(3...6)10^3$ К, мощность уровня 50...150 кВт, ресурс не менее 100 час, нагреваемый газ – определяется процессом – воздух, аргон, водород и др. Обычно плазмотрон вводят в печь (рабочий объём) через термоизоляцию печи (футеровку), поэтому все подводы к плазмотрону должны находиться за пределами термоизоляции печи на конце плазмотрона, противоположном выходному каналу. Это накладывает характерный отпечаток на конструкцию плазмотрона, рис. 30.

[Оглавление](#)

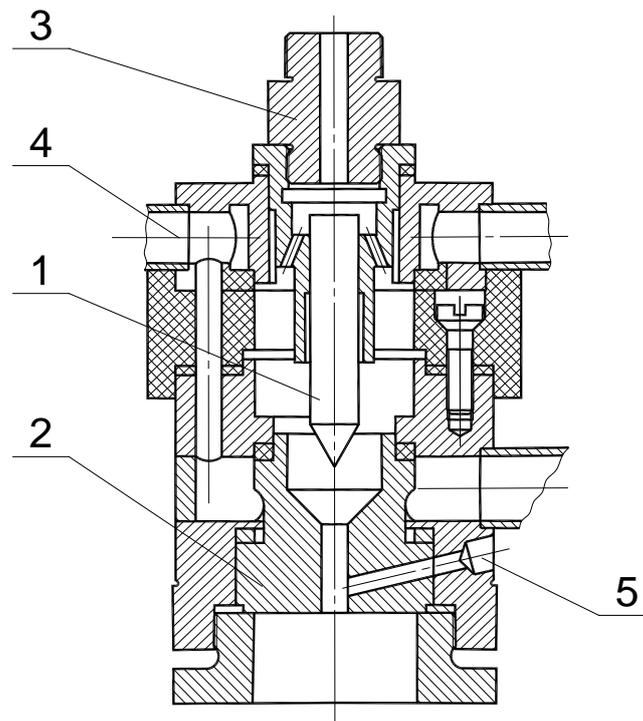


Рис. 29. Экспериментальный плазмотрон МВТУ. Ввод порошка на выходе канала анода

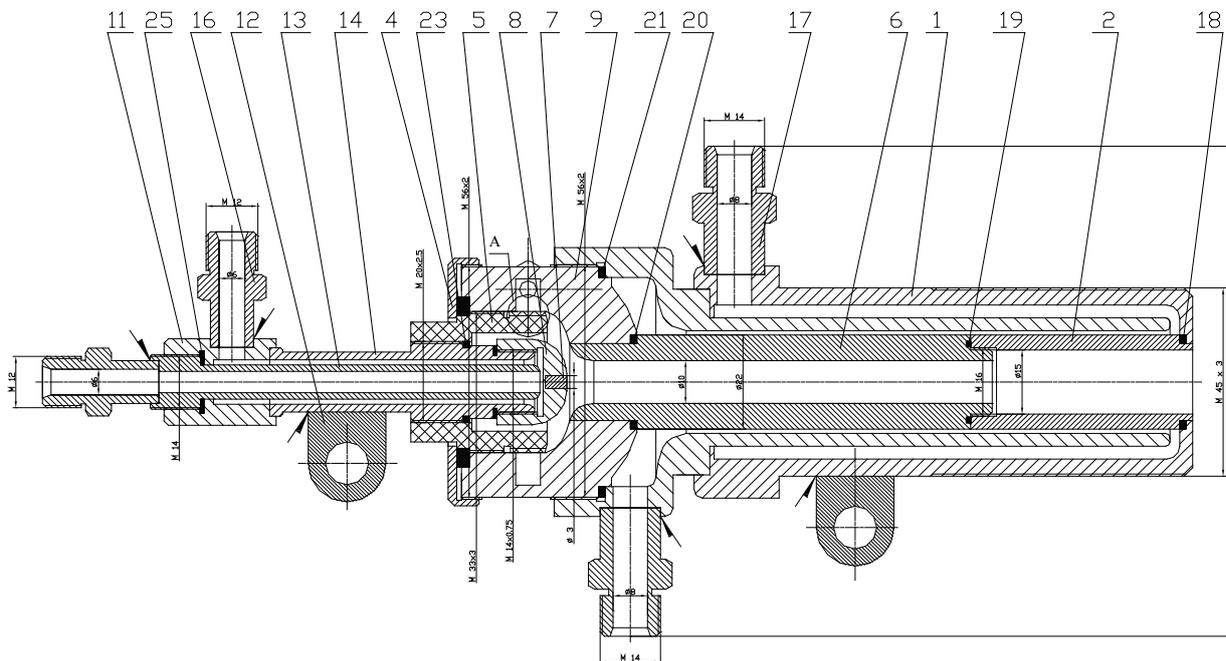


Рис. 30. Плазмотрон для сжигания и оплавления радиоактивных отходов

Оглавление

9.4. Плазмотроны для бурения и резки неметаллических материалов

В плазмотронах этой группы, в отличие от предыдущих, кроме нагрева материала ещё реализуется функция удаления разрушенного материала из зоны действия струи плазмотрона. Поэтому поток газа на выходе из плазмотрона должен иметь повышенную кинетическую энергию – высокую скорость и повышенный расход газа. Рабочий газ – воздух, в некоторых случаях – с добавлением жидкого топлива для повышения тепловой мощности. Для плазменных буров, которые углубляются в материал на глубину, большую длины плазмотрона, плазмотрон крепится к штанге, диаметр которой не более диаметра корпуса плазмотрона, и все подводы к плазмотрону размещают внутри штанги.

Конструкции плазмобуров представлены на рис. 31...33.

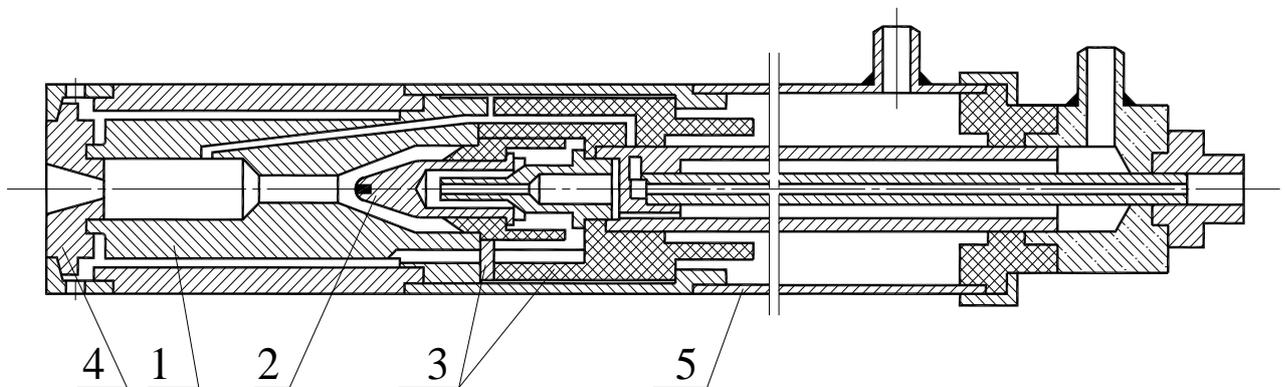


Рис. 31. Плазмобур ПБ-40. Плазмообразующее вещество воздух с добавкой углеводородного топлива. Охлаждение водяное, открытое. Мощность до 40 кВт

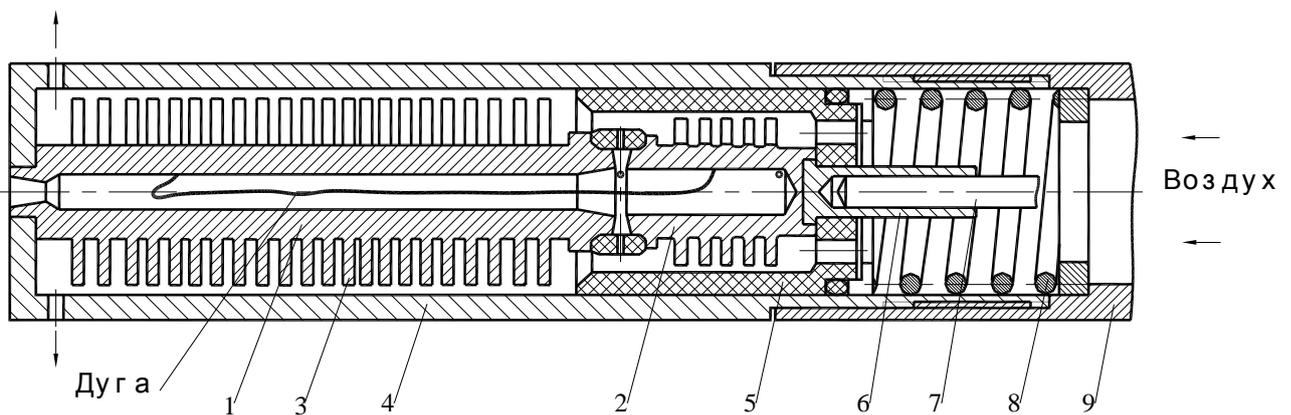


Рис. 32. Плазмобур воздушного охлаждения, двухкамерный, мощность 50...150 кВт, расход воздуха до 0,1 кг/с, наружный диаметр корпуса 40...70 мм. 1, 2 – электроды; 3 – рёбра электродов; 4 – корпус; 5 – керамическая втулка; 6 – токопровод; 7 – токопроводящий штырь; 8 – пружина; 9 – полая штанга

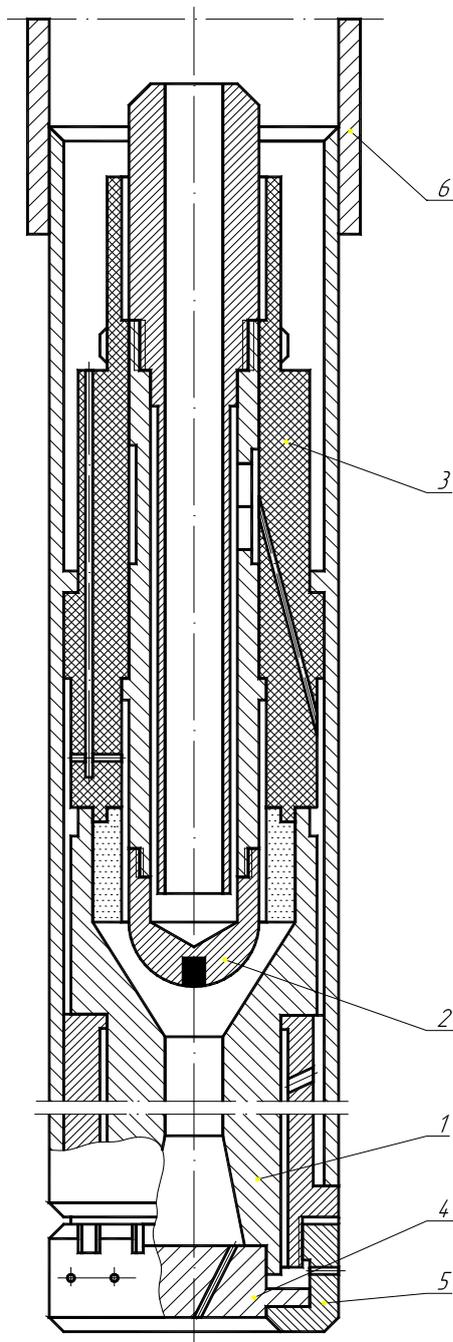


Рис. 33. Электродуговой расширитель обработки, поэтому необходимы высокая скорость истечения и обычно большой расход воздуха. Для повышения тепловой мощности в камеру или в канал подают топливо – керосин, дизельное топливо.

К характерной особенности конструкции плазмобуров следует отнести открытую систему охлаждения: вода подводится к катоду, затем поступает в анод, откуда через систему отверстий выходит в забой, охлаждая породу вокруг торца плазмобура (см. рис. 31, 33). Также устроена и система воздушного охлаждения плазмобура. Для повышения теплосъема с электродов воздух на электродах предусмотрено оребрение (рис. 32).

Кроме бурения плазменный инструмент также используется для поверхностной обработки камня. Ручная плазменная горелка с дополнительной подачей керосина представлена на рис. 34.

При проектировании инструмента для бурения и обработки неметаллических материалов основными требованиями являются простота конструкции, неприхотливость, низкие затраты в эксплуатации. Поэтому используют схемы с газовой – воздушной стабилизацией, чаще уступом, т.к. не требуется слишком высокая температура. Истекающая из плазмотрона плазма должна оказывать газодинамическое воздействие на объект

9.5. Плазмотроны для резки тканей в медицине

Особые требования предъявляются к плазменной горелке для разрушения живых тканей – плазменному скальпелю. Мощность не более 0,5 кВт, струя плазмы тонкая, скорость газа на выходе не предусматривает динамическое воздействие на

[Оглавление](#)

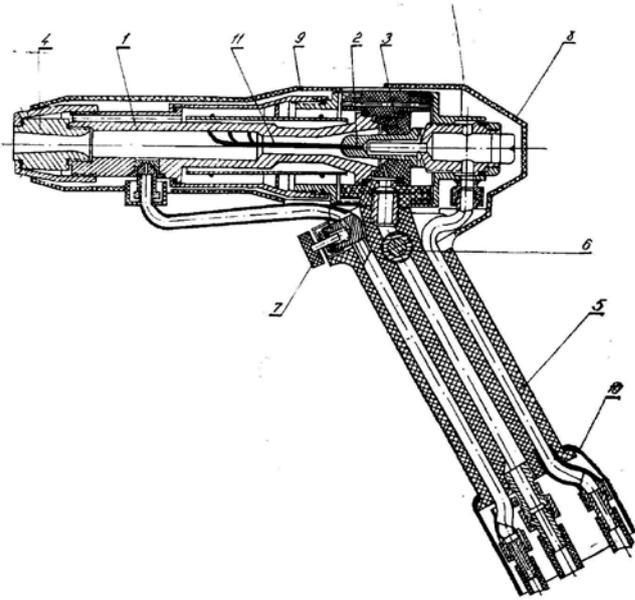


Рис. 34. Плазменная горелка ПГ-30 для обработки строительного камня. Мощность до 40 кВт, ток до 120 А, расход воздуха 0,01 кг/с, предусмотрена подача керосина в канал. Охлаждение водяное, циркуляционное

объект обработки, ток на уровне 10 А, охлаждение водяное, циркуляционное. Диаметр корпуса 25...30 мм, рабочий торец плазмотрона – конический для удобства наблюдения места обработки, быстросъемное крепление плазменной головки к кабель-шлангу (рис. 35).

Рабочим веществом для плазменного скальпеля служит аргон или воздух; воздух оказался очень

перспективным рабочим телом для хирургии. В плазменном скальпеле предусмотрена МЭВ для повышения напряжения разряда и снижения тока разряда. При использовании воздуха катод выполняют из гафния, при использовании аргона – из вольфрама. Конструкция охлаждается водой.

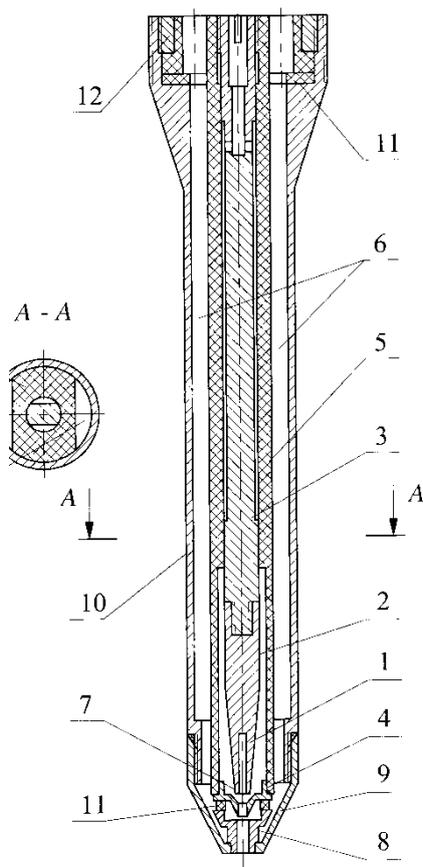


Рис. 35. Плазменный скальпель (МГТУ)

9.6. Плазмотроны с внешней дугой

Плазмотроны с внешней дугой формируют дуговой разряд, один конец которого находится внутри плазмотрона, а другой – на обрабатываемой металлической поверхности. Это позволяет существенно повысить плотность тепловой энергии в области обработки и повысить КПД процесса обработки, т.к. приэлектродные потери оказываются полезной энергией в технологическом процессе. Такой процесс возможен только для электропроводящих материалов, и если между плазмотроном и

[Оглавление](#)

обрабатываемой поверхностью течёт ток разряда. К процессам с внешней дугой относятся плазменная сварка, плазменнодуговая резка, плазменнодуговой нагрев металлов и основанные на нём технологические процессы, плазменнодуговая плавка металлов. От аналогичных существующих процессов электроплазменные процессы отличаются наличием потока плазмы плазмообразующего газа, который стабилизирует столб дуги, повышая её удельную мощность, повышает тепловой поток на обрабатываемую поверхность и выполняет ряд специфических функций технологических процессов.

9.7. Плазмотроны для сварки и наплавки металлов

Основной технологической характеристикой плазмотронов для сварки служит ток разряда. Газ выполняет функции формирования (обжатия) столба дуги, защиты

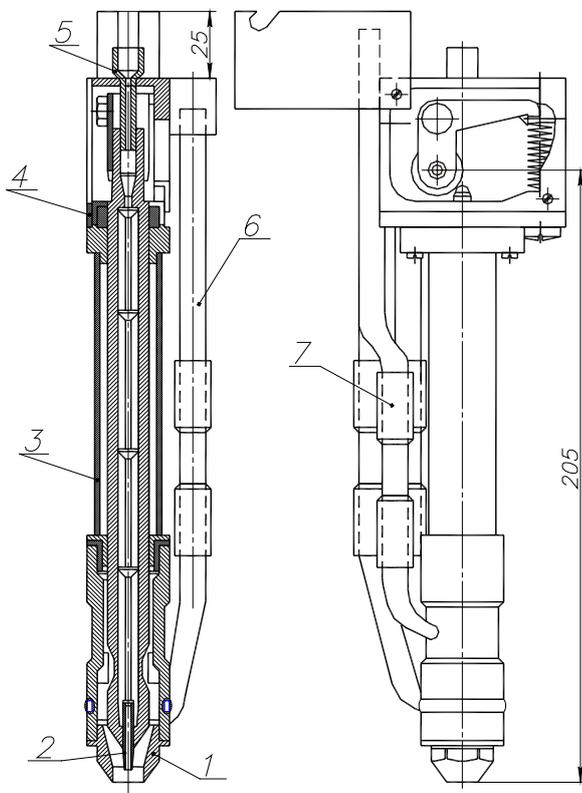


Рис. 36. Сварочная головка для автоматизированной сварки плавящимся электродом (проволокой). 1 – сопло, 2 – сменный наконечник; 3 – горелка; 4 – корпус плазмотрона; 5 – направляющая втулка; 6 – трубка подвода охлаждения; 7 – подвод защитного газа

сварочной ванны от окисления. Скорость плазмы в сопле плазмотрона небольшая, чтобы не выдувать металл из сварочной ванны.

Плазмотроны для сварки бывают с плавящимся электродом и с неплавящимся электродом. В обоих случаях это центральный (внутренний) электрод. Плавящийся электрод в виде проволоки наплавляемого (присадочного) материала подают через катодную втулку на оси плазмотрона (рис. 36). Дуга горит между проволокой и свариваемым металлом, и капли расплавленного металла проволоки переносятся в ванну шва. Скорость подачи проволоки соответствует скорости её плавления. Газ только защищает место сварки от окисления. Плазмотрон является частью сварочного автоматизированного агрегата, который применяют для сварки металла с толщинами более 3 мм при токах 300...1000 А. В плазмотронах с

[Оглавление](#)

неплавящимся электродом в качестве внутреннего электрода используют вольфрамовый стержень, а присадочный материал в виде проволоки подают в струю плазмы вне плазмотрона.

Существует большое количество разновидностей плазмотронов для разных видов сварки, в зависимости от способа сварки – ручная или механизированная, вида и способа подачи присадочного материала, подачи флюса и пр.

В качестве плазмообразующих или защитных газов используют аргон, гелий (реже), смеси аргона с гелием или водородом. А также, для некоторых видов сварки, углекислый газ (CO_2), водяной пар.

Сварка производится при токах разряда: 5...40 А – микросварка, 50...800 А – плазменная сварка и наплавка. Рабочее напряжение на разряде, в зависимости от применяемого газа, от 25...35 до 80 В.

Процесс наплавки аналогичен процессу сварки, только присадочный материал наносят на обрабатываемую поверхность изделия. При этом часть сварочного тока подают на присадочный материал. Толщина наплавляемого слоя может быть в пределах 0,5...6 мм, а ширина от 6 до 45 мм (при продольно-поперечном движении плазмотрона) за один проход.

9.8. Плазмотроны для плазменно-дуговой резки металлов

При плазменно-дуговой резке металлов разряд зажигают между электродом плазмотрона и разрезаемым материалом через сопло на выходе плазмотрона. Сопло применяют для обжатия столба дуги (стабилизация стенкой), а также в качестве вспомогательного электрода для зажигания дуги. Диаметр сопла зависит от тока разряда. Ток разряда служит основной энергетической и технологической характеристикой процесса резки металла. Расход газа должен обеспечить удаление расплавленного металла из полости реза, создавая необходимый скоростной напор в области реза. Существует эмпирическая зависимость между током, диаметром сопла и расходом газа для качественного процесса резки.

Для резки разных металлов используют различные газы, в частности, воздух, аргон, азот, смеси этих газов с кислородом и водородом, в некоторых случаях, водой или смесью воздуха с водяным паром. Наиболее универсальным газом служит воздух для резки алюминия, меди, низкоуглеродистой и нержавеющей (коррозионностойкой) сталей [12].

[Оглавление](#)

Большая часть столба разряда находится вне конструкции плазмотрона, главным образом, в полости реза, глубина которой зависит от толщины разрезаемого металла. Поэтому для резки металла необходимо большее напряжение, чем при сварке. При ручной резке допускают напряжение источника электропитания 180 В, при автоматической машинной резке до 500 В – из соображений безопасности обслуживающего персонала и при соблюдении необходимых мер защиты.

Основой конструкции плазмотрона служит корпус, в котором размещают катодный узел с катодом, изолирующие вставки и сопло. В катодном узле предусматривают каналы для прохода газа и охлаждения. Каналы сообщаются с соответствующими подводами на корпусе или узле подвода кабель-шланга, который прикрепляют к корпусу накидной гайкой.

В качестве охлаждающей среды в плазмотроне используют воздух или воду. При водяном охлаждении применяют резиновые уплотнения между полостями с разными средами. Водяное охлаждение заметно усложняет конструкцию плазмотрона, но повышает ресурс работы катода. Конструкции плазмотронов для резки показаны на рис. 37 и 38, а также на рис. 22.

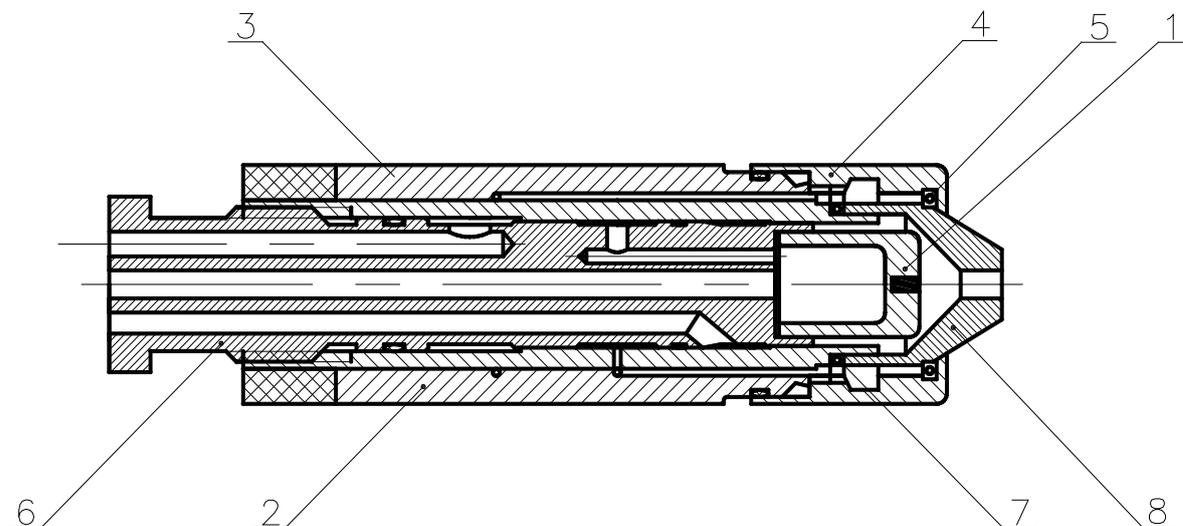


Рис. 37. Резак ВПП-9 для машинной воздушно-плазменной резки.

Охлаждение водяное. 1 – катодный узел, 2 – изолятор, 3 – корпус, 4 – гайка крепления сопла, 5 – прокладка, 6 – державка катода, 7 – прокладка, 8 – сопло

Катоды выполняют стержневыми (рис. 28 и 29) или составными с термоэмиссионной вставкой в медной державке (рис. 31 и 33). Для работы на воздухе вставку выполняют из циркония или гафния, а для работы в нейтральных газах – из

[Оглавление](#)

вольфрама с присадками. Катод крепят к катодному узлу по конической поверхности плотной посадкой или резьбовым соединением, а стержневые катоды крепят в цанге. Внутреннюю поверхность державки охлаждают потоком теплоносителя, который затем направляют в полости охлаждения корпуса и сопла. При воздушном охлаждении, которое используют при токе до 200 А, поток воздуха внутри плазмотрона делят на две части: одну часть направляют в завихритель на стабилизацию столба на катоде и в сопле, другую – на охлаждение корпуса и сопла, а затем через пазы в гайке крепления сопла выпускают наружу на обдув наружной поверхности сопла (рис. 22).

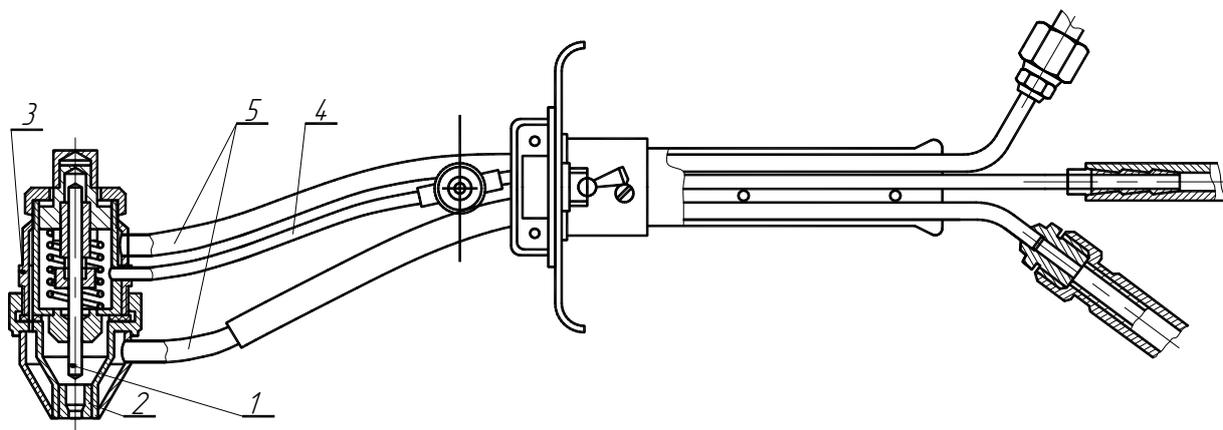


Рис. 38. Ручной плазменный резак с вольфрамовым стержневым электродом для работы с нейтральными газами [13]

Сопло выполняют с конической внешней поверхностью для удобства наблюдения за процессом резки. Длина канала сопла не должна превышать 1,5...2 диаметра из условия предотвращения двойного дугообразования в канале сопла. Сопло должно легко сниматься для замены.

Минимальное расстояние между катодом и соплом, находящимся под анодным потенциалом (землей), должно обеспечивать надёжный пробой от осциллятора, и обычно, составляет 0,7...1,0 мм. Анодный потенциал подводят к разрезаемому металлу и к корпусу плазмотрона с соплом, причём разрядный ток на сопло ограничивается источником питания, а анодный выход источника заземляют в целях безопасности работы персонала.

При включении плазмотрона происходит высоковольтный высокочастотный пробой промежутка катод – сопло, затем в месте пробоя зажигается дуговой разряд

[Оглавление](#)

между катодом и соплом, который стабилизируется вихрём на катодной вставке и внутренней поверхности сопла и образует струю плазмы длиной 10...25 мм на выходе сопла. При касании струи плазмы поверхности разрезаемого металла зажигается рабочая дуга между катодом плазмотрона и металлом, а разряд на сопло отключается.

9.9. Плазмотроны для плавки металлов

Плазмотроны для плавки металлов используют для плавки и переплава в чёрной и цветной металлургии с использованием в качестве плазмообразующих газов аргона, азота, водорода и их смесей. Такие плазмотроны работают в печах при давлениях от атмосферного и ниже.

Разряд в таких плазмотронах зажигают между термоэмиссионным катодом и вспомогательным электродом, а основной (рабочий) разряд происходит между катодом и металлом в печи. Плазмообразующий газ подают между катодом и соплом, которое выполняет также функцию защитной диафрагмы, или через полость в катоде.

Как и во всех плазмотронах с внешней дугой большая часть разряда находится вне плазмотрона. Канал сопла обычно короткий и стабилизирует только начальный участок столба дуги.

Мощность существующих плавильных плазмотронов в пределах от десятков киловатт до нескольких мегаватт, ток разряда (100...10000) А при относительно невысоком напряжении до 200 В.

Особенностью применения плавильных плазмотронов является необходимость ввода плазмотрона в печь через толстый слой футеровки свода печи. Поэтому в конструкции плазмотрона присутствует длинный корпус, на одном конце которого расположена разрядная часть – собственно электроды, а на противоположном конце корпуса размещают присоединительные устройства – подводы тока, газа, охлаждения частей плазмотрона, а также фланец крепления плазмотрона к корпусу печи. Электроды и корпус плазмотрона охлаждают водой. Схема такого плазмотрона представлена на рис. 39.

Катод плазмотрона ПТП – стержневой, из вольфрама с присадками. Сопло – медное. Катод и сопло сменные. Анодом является переплавляемый металл. Ток разряда 1500 А, мощность до 200 кВт, ток постоянный.

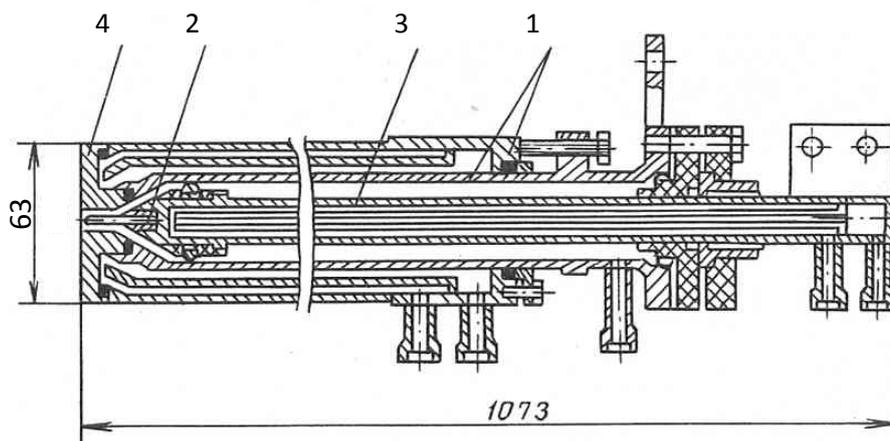


Рис. 39. Плазмотрон ПТП-25М для плавки и переплава чёрных и цветных металлов. 1 – корпус, 2 – катод, 3 – катододержатель, 4 – сопло (вспомогательный электрод)

На рис. 40 показана схема аналогичного плазмотрона для плазменно-восстановительных процессов в металлургии и для расплавления исходного сырья. Плазмотрон использует природный газ в смеси с воздухом, подаваемые между корпусом и соплом. Защитный газ – аргон, азот подают в зазор между соплом и катодом, а также в полость катода. Катод из вольфрама с легирующей присадкой, полый, сменный. Сопло медное, сменное, охлаждаемое водой.

9.10. Плазмотроны переменного тока

Плазмотроны переменного тока используют в уникальных установках различного назначения, обычно большой мощности.

При питании разряда переменным током возникает ряд проблем, отсутствующих при работе на постоянном токе. Эти проблемы связаны с поддержанием разряда при переходе питающего напряжения через ноль, со сменой полярности процесса на электродах, а также с необходимостью обеспечить равномерную нагрузку фаз питающей электрической сети. К достоинствам питания плазмотрона переменным током относят отсутствие выпрямителя, однако с помощью современных полупроводниковых вентилях выпрямление тока не является сложной проблемой, и преодолеваются перечисленные трудности использования переменного тока.

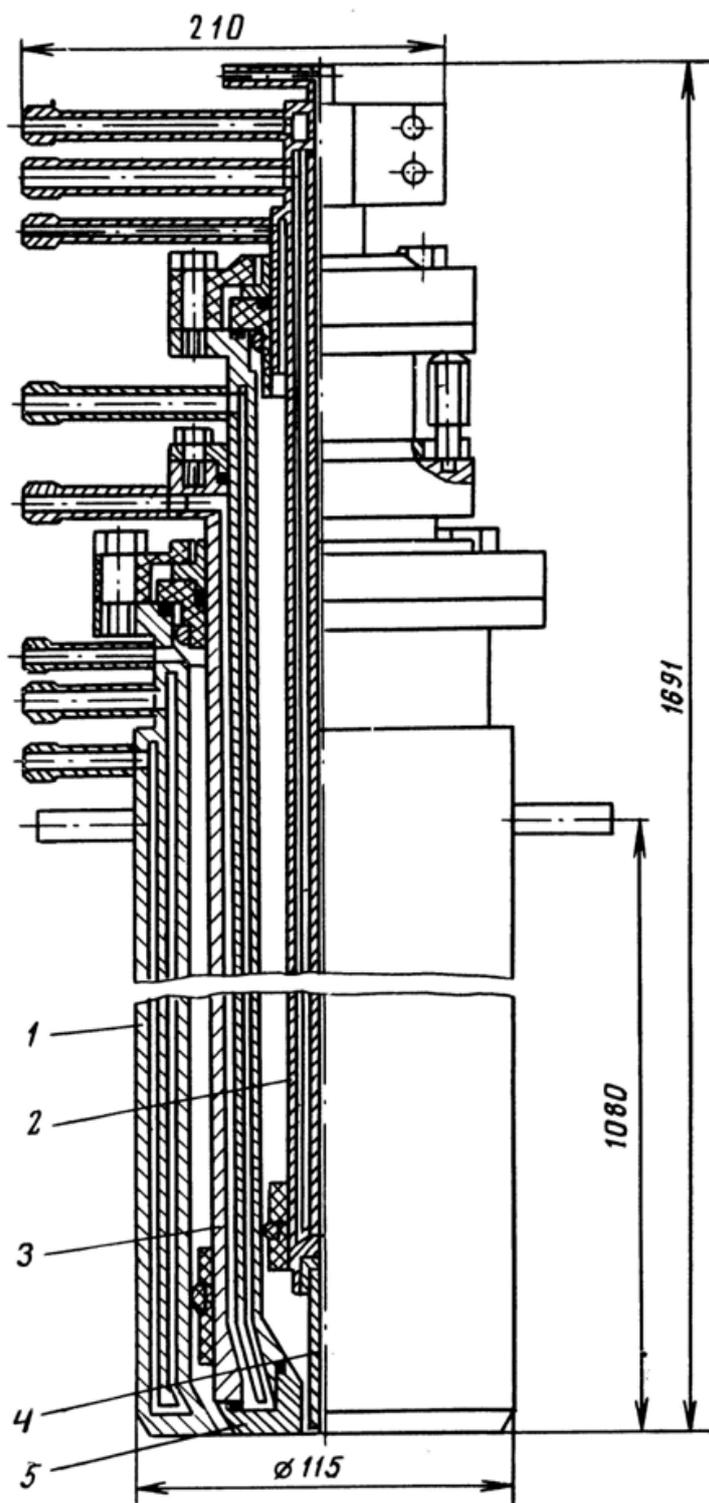


Рис. 40. Плазматрон ЭПВ-1К. 1 – корпус, 2 – катододержатель, 3 – держатель сопла, 4 – полый катод, 5 – сопло. Мощность плазматрона до 500 кВт, ток 1500 А, длина погружаемой части корпуса 1080 мм. Расход плазмообразующего газа 14 л/с, защитного – азота 2,7 л/с, или аргона 0,15 л/с

многодугового процесса [14].

К особенностям конструкции плазматронов переменного тока следует отнести следующие:

Применяют схемы плазматронов с холодными, обычно, трубчатыми электродами.

Для равномерной нагрузки фаз применяют агрегаты из трёх плазматронов, каждый из которых питают от своей фазы, работающих на общую камеру смешения. Конструкция фазного плазматрона по существу ничем не отличается от аналогичного плазматрона постоянного тока, например плазматрона на рис. 10. Агрегаты типа «Звезда» из трёх фазных плазматронов выполняются на мощности до 1 МВт, а многофазные агрегаты – до 20 МВт.

Схемы многоэлектродных плазматронов 3-х фазного тока приводятся в литературных источниках, однако, не нашли заметного применения из-за трудностей организации и реализации

[Оглавление](#)

9.11. Исследовательские плазмотроны

Плазмотроны как генераторы потоков плазмы применяют при аэродинамических и теплофизических исследованиях. Обычно это уникальные устройства, создаваемые для конкретного вида исследований с уникальными параметрами по мощности, температуре струи и рабочим параметрам плазмотрона. Часто уникальной является и организация процесса в плазмотроне. При этом часто используют магнитную стабилизацию разряда для реализации повышенных температур и повышенных мощностей. Конструктивные схемы таких плазмотронов приведены в [14].

ЛИТЕРАТУРА

1. Эсибян Э.М. Плазменно-дуговая аппаратура. Киев: Техника, 1971. 164 с.
2. Плазменные процессы в металлургии и технологии неорганических материалов / Под ред. Б.Е. Патона. М.: «Наука», 1973. 243 с.
3. Генераторы плазменных струй и сильноточные дуги / Под ред. Ф.Г Рутберга. Л.: «Наука», 1973. 152 с.
4. Глебов И.А., Рутберг Ф.Г. Мощные генераторы плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1985. 153 с.
5. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 721 с.
6. Термодинамические функции воздуха для температур от 1000 до 12000 К и давлений от 0,001 до 1000 атм. / Под ред. А.С. Предводителева. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 56 с.
7. Теория столба электрической дуги / Низкотемпературная плазма. Т.1. Новосибирск: Наука СО, 1990. 376 с.
8. Клименко Г.К., Ляпин А.А. Генераторы плазмы: методические указания к выполнению курсового проекта. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 62 с.
9. Донской А.В., Клубникин В.С.. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. Л.: «Машиностроение», ЛО, 1979. 221 с.
10. Электродуговые плазмотроны. Рекламный проспект / Под ред. М.Ф. Жукова. Акад. наук СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т теплофизики. Новосибирск: Наука, 1975. 44 с.
11. Электродуговые плазмотроны. Рекламный проспект / Под ред. М.Ф. Жукова. Новосибирск: Наука, 1980. 84 с.
12. Костиков В. И., Шестерин Ю. А. Плазменные покрытия. М.: Металлургия, 1978. 159 с.
13. Васильев К.В. Плазменно-дуговая резка. М.: Машиностроение, 1974. 111 с.
14. Николаев Г.А., Ольшанский Н.А. Специальные методы сварки. М.: «Машиностроение», 1975. 231с.
15. Коротеев А.С., Миронов В.М., Свирчук Ю.С. Плазмотроны. Конструкции, характеристики, расчёт. М.: «Машиностроение», 1993. 295 с.
16. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. Т. 3. М.: Машиностроение. 2001. 864с.

Оглавление