

## ЭЛЕКТРОДУГОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

### **Введение**

В электродуговых генераторах (плазмотронах) низкотемпературной плазмы электрическая дуга переменного или постоянного тока используется для получения плазменных токонесящих или нетоконесящих струй. Струя низкотемпературной плазмы представляет собой среду с большой концентрацией энергии, благодаря чему она является эффективным средством для термообработки материалов, в том числе и тугоплавких. Плазмотроны позволяют производить пайку, сварку и резку материалов, наносить различные покрытия на металлическую и керамическую основу, получать мелкие частицы из тугоплавких металлов, которые представляют собой идеальные шарики, а это в свою очередь является благоприятным фактором для прессования. Меняя режим работы плазмотрона, получают металлические шарики различных диаметров, осуществляют термообработку в заданной среде, придавая нужные свойства обрабатываемым материалам и сварным швам. Так как в плазменной струе различные материалы испаряются, то благодаря этому фактору представляется возможность получать металлические и металлокерамические сплавы через паровую фазу, посредством разделенной конденсации испаренной руды можно извлекать редкие элементы. Плазмотроны применяются в качестве плазмобуров. Скорость бурения самых твердых пород в несколько раз больше скорости бурения газопламенными термобурами [1].

### **Конструкции плазмотронов и область их применения**

В последние годы интенсивно развивается перспективная отрасль химической технологии — плазмохимия, источником плазмы для которой является плазмотрон. Электрические дуги применяются для окисления азота, синтеза ацетилено-водорода из природного газа, а также для получения ряда эндотермических соединений: нитрида титана, нитрида магния, двуокиси циана, двуокиси азота, окиси алюминия, стабилизированной двуокиси циркония, окиси иттрия, синтеза металлоорганических соединений, которые получают в результате прямого контакта паров металла, образованных в струе плазмы, с органическими жидкостями. Такой состав газовой фазы стремятся «заморозить» в этих процессах [2]. Плазмотроны высокого давления могут быть использованы для получения жидкого графита, обладающего новыми механическими, электрическими и тепловыми свойствами, так как расплавить графит можно при давлении свыше 100 бар и температуре выше 4273 К [3]. Плазмотроны также используются для исследования физических свойств газа при высоких температурах и в качестве стабильного источника света при спектральном анализе. Благодаря широкому применению плазмотронов большое внимание уделяется их дальнейшей разработке, совершенствованию, повышению ресурса непрерывной работы и КПД, так как ранее созданные устройства (ударные и адиабатические трубы, баллонные и газопламенные трубы) не удовлетворяют возникшим потребностям из-за малого ресурса времени, низких параметров и несоответствующего состава плазмы, что ограничивает их применение для выполнения ряда новых технологических процессов в химии, машиностроении, металлургии и других отраслях народного хозяйства. Характерной особенностью плазмотронов являются сравнительная легкость достижения высоких температур, максимальной концентрации мощности в рабочем пространстве, а небольшие размеры установки при значительных мощностях, расширяют диапазон регулирования параметров технологического процесса, расширяя тем самым область их применения как для научных исследований, так и в промышленности. Существующие плазмотроны различаются по роду тока, способу обжатия дуги с целью повышения ее температуры, характеру применяемых электродов, способу защиты электродов от эрозии, а так же по своему назначению и конструктивным особенностям.

По способу обжатия дуги существующие конструкции можно подразделить на плазмотроны со стабилизацией дуги стенкой, стабилизацией дуги жидкостью, с газовой и комбинированной стабилизацией дуги.

В плазмотронах со стабилизацией дуги стенкой дуга проходит через узкое отверстие (диафрагму) полого охлаждаемого или тугоплавкого цилиндра. В зависимости от силы тока дуги отверстие может иметь диаметр от полутора миллиметров до несколько сантиметров. Для предотвращения шунтирования дуги через стенку диафрагма обычно изолируется от электродов и состоит из тонких, охлаждаемых, изолированных друг от друга секций.

В плазмотронах с жидкостной стабилизацией дуга горит в канале, образованном внутри вихревого потока жидкости, а в плазмотронах с газовой стабилизацией обжатие дуги происходит вихревым потоком газа, для чего применяют поперечный или продольный обдув дугового столба газовым потоком.

Существует разновидность плазмотронов с комбинированной стабилизацией дуги. Это плазмотроны, у которых дуга стабилизируется одновременно газовым потоком и диафрагмой. В зависимости от характера использования плазменной струи газ может вводиться в камеру аксиально, радиально или тангенциально.

По конструктивным особенностям плазмотроны можно подразделить на линейные, коаксиальные и тандем-плазмотроны.

В плазмотронах применяются два вида электродов: охлаждаемые и неохлаждаемые. Неохлаждаемые электроды изготавливают обычно из тугоплавких материалов, например из графита или вольфрама, а охлаждаемые — из меди. Бывают также камеры с охлаждаемыми электродами, изготовленными из тугоплавких материалов. Для предохранения охлаждаемых электродов от эрозии необходимо, чтобы дуговые пятна непрерывно перемещались по поверхности электродов. По характеру передвижения дуговых пятен по поверхности электродов плазмотроны можно подразделить на следующие типы:

- плазмотроны с самопроизвольным движением дуговых пятен, к которым относятся плазмотроны малой мощности с рабочими токами порядка 100 а;
- плазмотроны с газодинамическим вихревым вращением дуги: это плазмотроны средней мощности с токами 1—2 ка;
- плазмотроны с магнитным вращением дуги, в которых вращение дуги осуществляется внешним магнитным полем, что обеспечивает защиту электродов при токах в несколько десятков килоампер;
- плазмотроны с магнитной и газодинамической стабилизацией дуги, в которых вращение электрической дуги осуществляется внешним магнитным полем и тангенциальной подачей рабочего газа в камеру. Защита электродов достигается при достаточно больших токах.

#### *Плазмотроны постоянного тока*

Стабилизация дуги стенкой и жидкостью. Первая плазменная установка с плазмотроном для стабилизации дуги стенкой предназначалась для исследования свойств плазмы различного состава. Диафрагма (рис. 1, а) представляет собой набор медных охлаждаемых изолированных секций толщиной 10 мм. Секции изолированы друг от друга миллиметровой слюдой во избежание пробоя между секциями. Диаметр стабилизирующего канала равен 5 мм. Исследуемый газ подается на некотором расстоянии от электродов. Для получения плазмы без примесей материала электродов, приэлектродные области обдуваются аргоном. Стабилизация стенкой устраняет колебание дуги, позволяя производить более точные спектральные измерения. С помощью такого плазмотрона, была достигнута температура плазмы 13000°К [3-5].

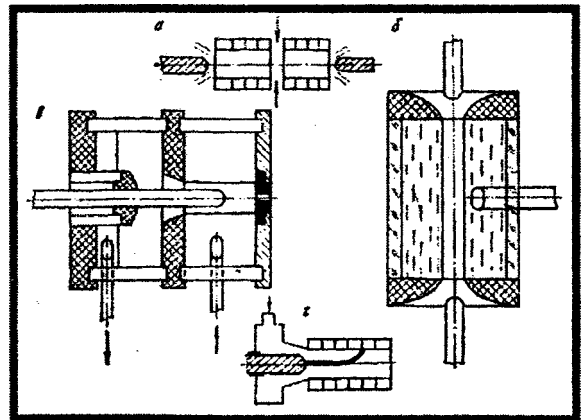


Рисунок 1 – Плазмотроны со стабилизацией электрической дуги стенкой и жидкостью

Известны установки для обжатия дуги вихрем жидкости. В последствии, с целью повышения температуры дуги, были изготовлены устройства для создания «канальной дуги» (рис. 1, б).

К внутренней поверхности трубки вода подается по касательной; в результате вращения образуется полный цилиндрический канал, который обжимает дугу. Вода сливается через боковые стенки форсунки. С обжатием дуги возрастает удельная мощность дугового столба, а следовательно, его температура.

При стабилизации дуги стенкой и жидкостью каналы имели диаметры от 1,4 до 11,9 мм. Максимальная напряженность электрического поля достигала 300 в/см, удельная мощность 11000 квт/см<sup>3</sup> и максимальная мощность дуги достигала 750 квт при токе дуги 1500 а и напряжении 500 в. Температура на оси дуги достигала 50000°K.

На рис. 1, в представлен плазматрон, с помощью которого можно получить более мощную струю. Для этого плазмотрона характерно одностороннее истечение плазмы. Стабилизация дуги осуществляется водяным вихрем в закрытой камере. Один электрод выполнен в виде стержня, а в другом сделано отверстие для истечения плазмы. С помощью такого плазмотрона была получена плазменная струя с температурой на срезе кольцевого электрода 13000° K и максимальной скоростью 1000 м/сек. Однако выгорание графитных электродов приводило к нестабильности горения дуги, засорению плазмы и ограничению времени его работы. Для повышения стабильности работы водостабилизированного плазмотрона применялись термостойкие графитные аноды, а так как графитные аноды выгорают быстрее, чем катоды, то стержневой электрод выполнял функцию катода. Известны конструкции водостабилизированных плазмотронов высокого давления с геометрической разрядной камерой, в которой происходило испарение воды за счет энергии дуги, в связи с чем резко поднималось давление в камере и возрастала температура разряда. В таких конструкциях использовались сверхзвуковые сопла, благодаря которым была получена плазменная струя, скорость которой доходила до 6500 м/сек, а температура до 8000 K. Наряду с преимуществами, водостабилизированные плазмотроны имеют и недостатки. Основным недостатком этих плазмотронов является генерирование ими водяной плазмы, тогда как для многих исследований необходимо применять плазму различного состава. В этом отношении преимущество принадлежит плазмотронам с дугой, обжимаемой стенкой. Газовая стабилизация дуги. При непосредственном нагреве газа электрической дугой можно получить плазменные струи различного состава. Простейшие конструкции плазмотронов с газовой стабилизацией дуги такие же, как и у плазмотронов с жидкостной стабилизацией. Электроды изготовлены из графита, дуга стабилизируется обдувом газа продольно, поперечно, или тангенциально. Интенсивное испарение графита электродов приводит к засорению плазмы и сокращению времени работы этих электродов. Для уменьшения засоренности плазмы и увеличения срока службы электродов применяют охлаждаемый медный анод. Дуга в них горит между стержневым тугоплавким катодом и охлаждаемым медным цилиндрическим анодом. Газ подается по касательной к внутренним стенкам камеры. Газовый вихрь обжимает дугу и вращает анодное пятно (рис. 2, а). Под действием электромагнитных сил и газового потока анодное пятно перемещается вдоль электрода к выходу из сопла. Движение анодного пятна вдоль электрода происходит скачкообразно с периодическим шунтированием дуги в местах, расположенных ближе к катоду. Этот процесс периодически повторяется, благодаря чему происходит разряд. Для увеличения времени работы плазмотрона и уменьшить засоренность плазмы, вместо тугоплавкого неохлаждаемого электрода ставят медный охлажденный электрод. Газ при этом подается тангенциально в зазор между электродами, охлаждая их как водой, так и газом (рис. 2, б). Мало-мощные плазмотроны, выполненные по схеме рис. 2, а, работающие на инертных газах и азоте, получили широкое распространение для обработки тугоплавких и теплопроводных материалов. В некоторых случаях (например, при резке металлов или их переплаве с целью удаления примесей) эффективность установки можно повысить путем использования обрабатываемого изделия в качестве одного из электродов (рис. 2, г). Благодаря этому приэлектродные потери используются рационально, а к. п. д. плазмотрона возрастает.

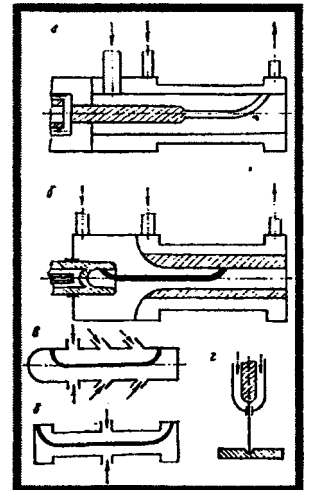


Рисунок 2 – Плазмотроны с газодинамической стабилизацией электрической дуги

Для более стабильной работы плазмотрона и увеличения напряжения за счет возрастания длины дуги применяют межэлектродные вставки, благодаря чему один из электродов получается секционированным (рис. 2, в). При малых расходах газа в плазмотронах такого типа применяют обжатие дуги стенкой. На рис. 2, д представлен плазматрон постоянного тока с двусторонним истечением нагретого газа. Полной симметрии в плазмотронах с двусторонним истечением добиться нельзя, так как полярность в них различна, и, следовательно, процессы пробоя приэлектродного слоя газа протекают по-разному, а это влияет на длину дуги и степень нагрева отдельных струй.

Преимущество плазмотронов с двухсторонним истечением нагретого газа заключается в том, что в них можно обеспечить сильное обжатие дуги, которое осуществляется как диафрагмами электродов, так и газом, который подается в камеру тангенциально через газовое кольцо. Такие плазмотроны имеют возрастающие характеристики, что дает возможность подключить их к источнику электроснабжения с жесткой внешней характеристикой. Их термический к.п.д. при температуре плазмы 2000—5000 К составляет 70—80%, а мощность — несколько мегаватт при напряжении на дуге порядка 2000 в. Плазмотроны линейных схем применяются в основном при давлении 1—10 бар, так как при высоких давлениях дуга начинает гореть в зазоре, что ведет к сгоранию электродов. Для работы при повышенных давлениях применяются плазмотроны, выполненные по схеме рис. 3, а. Такой плазмотрон состоит из двух коаксиальных электродов разного диаметра. В зазор между ними газ вводится аксиально, радиально или тангенциально. Дуга горит в зазоре между электродами. Продольное магнитное поле, образованное соленоидом, вращает дугу, а в результате взаимодействия тока дуги с магнитным полем возникает тангенциальная сила. Осевой газовый поток, воздействуя на дугу, стремится сдуть дуговое пятно на торец внутреннего электрода. Если же дуговое пятно попадает на торец внутреннего электрода, то прекращается вращательное движение дугового пятна, в результате чего образуется прогар электрода. Так как зазор между электродами достаточно велик, то скорость газового потока меньше, чем в линейном плазмотроне. Кроме того, на дуговой столб оказывают действие электромагнитные силы, стремящиеся втянуть дугу к центру соленоида, поэтому дуговое пятно не смещается на торец внутреннего электрода, а движется по внешней поверхности, предохраняя его от прогорания. Для более стабильной работы плазмотронов такой схемы его внешний электрод секционируется [6-8].

Таким образом, изменяя скорость газового потока и напряженность магнитного поля, можно влиять на стабильность работы плазмотронов и тем самым увеличивать ресурс их работы. К сожалению, в коаксиальных плазмотронах напряжение меньше, чем в линейных, так как длина дуги в них меньше. Длину дуги можно увеличить за счет увеличения зазора между электродами, но при этом нарушается стабильная работа плазмотрона и увеличиваются тепловые потери. Большая мощность таких плазмотронов достигается за счет увеличения тока, но при этом возрастает скорость износа (сгорания) электродов. При сравнительно небольшом объеме разрядной камеры более высокое напряжение можно получить в плазмотронах с кольцевыми электродами (рис. 3, б). Дуга в них горит в зазоре между двумя электродами, имеющими кольцеобразную форму. За счет магнитного поля двух встречно включенных соленоидов дуга вращается и обегает поверхность электродов. Так как напряжение на дуге в плазмотроне с кольцевыми электродами несколько больше, чем в коаксиальном, то при той же мощности ток меньше и, следовательно, уменьшается износ электродов.

Длину дуги можно увеличить за счет увеличения зазора между электродами, но при этом нарушается стабильная работа плазмотрона и увеличиваются тепловые потери. Большая мощность таких плазмотронов достигается за счет увеличения тока, но при этом возрастает скорость износа (сгорания) электродов. При сравнительно небольшом объеме разрядной камеры более высокое напряжение можно получить в плазмотронах с кольцевыми электродами (рис. 3, б). Дуга в них горит в зазоре между двумя электродами, имеющими кольцеобразную форму. За счет магнитного поля двух встречно включенных соленоидов дуга вращается и обегает поверхность электродов. Так как напряжение на дуге в плазмотроне с кольцевыми электродами несколько больше, чем в коаксиальном, то при той же мощности ток меньше и, следовательно, уменьшается износ электродов.

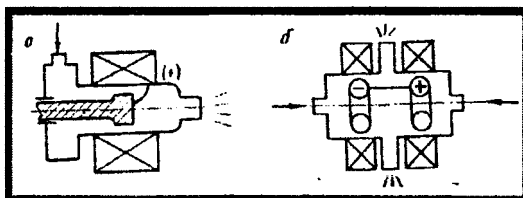


Рисунок 3 — Коаксиальный (а) и кольцевой (б) плазмотроны с магнитогазодинамической стабилизацией электрической дуги

#### Плазмотроны переменного тока

На рис. 4. приведена схема плазмотрона переменного тока с графитовыми электродами. В этом плазмотроне дуги не обжаты, поэтому напряжение на них не высокое (сотни вольт). Близкое расположение электродов облегчает поджиг дуги между двумя электродами в момент изменения направления тока. Поэтому такой плазмотрон не требует большой индуктивности, включенной последовательно с ним, для обеспечения сдвига фаз между током и напряжением. Однако отрицательное дифференциальное сопротивление дуг требует применения какого-либо из методов ограничения нарастания тока. Простейшим из таких методов является введение в цепь плазмотрона индуктивных сопротивлений, но это снижает коэффициент мощности установки [9]. Возможно обжатие дуги переменного тока с целью получения возрастающей вольт-амперной характеристики, при которой не требуется применение индуктивностей для ограничения тока. Такой плазмотрон обладал бы высоким коэффициентом мощности, однако ряд конструктивных трудностей и проблема поджига дуг в каждом полупериоде ограничивают возможности создания таких плазмотронов. Следует отметить, что плазмотроны переменного тока по конструкции сложнее, чем плазмотроны постоянного тока, но для их эксплуатации не нужны специальные выпрямительные устройства, что значительно удешевляет и упрощает систему электроснабжения, расширяя возможность их применения.

Ресурс работы и к.п.д. плазмотронов переменного тока примерно такие же, как и у плазмотронов постоянного тока. Преимуществом трехфазных плазмотронов переменного тока является то, что у них значительно сглажены колебания параметров нагретого газа. Можно предполагать, что промышленным плазмотронным установкам переменного тока со временем будет отдано предпочтение как более дешёвым. Кроме электродугового метода нагрева, применяется также разогрев газов в электромагнитном поле. В зависимости от частоты поля различают высокочастотные (ВЧ) и сверхвысокочастотные (СВЧ) плазмотроны.

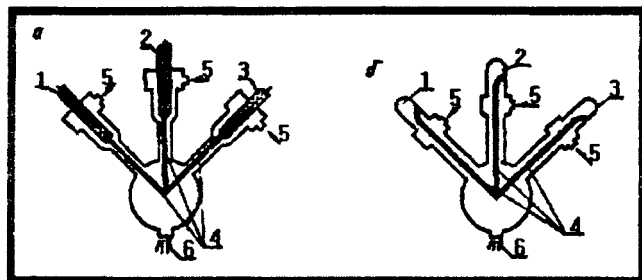


Рисунок 4 – Схема трехфазного плазмотрона переменного тока:

а — трехфазный плазмотрон с тугоплавкими электродами и обжатыми газами; б — трехфазный линейный плазмотрон с охлаждаемыми электродами и обжатыми дугами; 1, 2, 3 — электроды; 4 — дуга; 5 — подвод газа; 6 — струя плазмы

Для питания ВЧ плазмотронов обычно используется аппаратура, изготавливаемая для высокочастотной закалки, а СВЧ плазмотроны работают от генераторов телевизионных и радиолокационных частот. ВЧ и СВЧ плазмотроны относятся к установкам безэлектродного типа и поэтому обладают весьма большим ресурсом рабочего времени и генерируют плазму высокой частоты. Однако к. п. д. их пока невысок и достижение мощности ограничено десятками-сотнями киловатт.

В настоящее время отечественной промышленностью выпускается несколько типов плазменных установок постоянного тока, из которых, наиболее широкое применение

получили установки УПУ-2, УПУ-3Л, УПУ-3М и УМП-2-62, УМП-4-64, УМП-5-68 и др. Однако надежность работы и производительность этих плазмотронов не удовлетворяет требованиям производства, нуждается в реконструкции, которая обеспечила бы повышение срока службы плазмотрона, увеличила его производительность и легкодоступную ремонтоспособность.

#### Заключение

Представлены результаты исследований в области конструирования и промышленного применения электродуговых генераторов низкотемпературной плазмы постоянного и переменного тока, показаны их преимущества и недостатки, что позволило проводить исследования по их совершенствованию и использованию для нанесения защитных покрытий из различных порошковых материалов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. Кабанн. Ву Тьен Лок Низкотемпературная плазма. М. 1997. -217с. 2. Ионные плазменные и дуговые ракетные двигатели /Пер. с англ. Сб. ст. М. 1991. -407с. 3. В. Б. Гоголь Электротермическое использование электрической дуги высокого давления, электротермия Науч.-техн. информ., 1993, № 3. 4. Н. П. Андриюшкевич Электродуговой подогреватель для исследования процессов тепло- и массообмена в дуговых пятнах. Сб. «Высокотемпературная теплофизика». М., 1996. -163с. 5. Низкотемпературное охлаждение электрических генераторов. Сб. науч. тр. /Под ред. С.С. Кутателадзе. – Новосибирск: Ин-т теплофизики, 1988. -160с. 6. Низкотемпературная плазма при горении. Сб. науч. тр. /Под ред. С.А. Абрунев. Чебоксары: ЧГУ, 1989. -132с. 7. Низкотемпературные процессы тепло- и массопереноса в энергосберегающих технологиях //Сб. науч. тр. Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова. –Мн.: ИТМО, 1990. -915с. 8. Низкотемпературный электронагрев. /Под ред. А.Д. Свенчанского. – М.: Энергия, 1990. -207с. 9. У.А. Арифов. Ионная бомбардировка - метод исследования свойств поверхности. Ташкент, “Фан”, 1991. -145с.