

УДК 537.527

Исследование генератора термической плазмы технологического назначения*

А.С. Аньшаков^{1,2}, Э.К. Урбах¹, В.С. Чердниченко^{2,3}, М.Г. Кузьмин³,
А.Э. Урбах¹

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный технический университет

³ОАО «Сибэлектротерм», Новосибирск

E-mail: anshakov@itp.nsc.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований энергетических характеристик электродугового плазмотрона мощностью до 500 кВт для нагрева технического азота. В режиме плавления металлургического сырья в опытной плазменной электропечи установлены особенности горения дугового разряда, теплового КПД и ресурса работы электродов.

Ключевые слова: плазмотрон, дуговой разряд, вольт-амперная характеристика дуги, тепловые потери, ресурс электродов.

При всем многообразии конструктивных схем электродуговые плазмотроны можно разделить на два типа [1]:

- плазмотроны косвенного действия (струйные), дуга в них горит внутри разрядной камеры между электродами, которые являются элементами конструкции плазмотрона;
- плазмотроны прямого действия (плавильные), в которых одно из опорных пятен дуги вынесено на нагреваемый объект (расплавляемый металл или металлические изделия при резке и сварке).

В работе изложены результаты исследований и разработки технологического электродугового плазмотрона смешанного типа. Приведенные ниже характеристики плазмотрона получены на опытно-промышленной плазменной электропечи для выплавки ферросплавов с высоким содержанием марганца на Новокузнецком металлургическом комбинате. Емкость печи шахтного типа составляла 18 т в сутки. Для расплава шихты использовались три перемещающихся вверх и вниз плазмотрона мощностью 500 кВт каждый. Относительно горизонтальной плоскости они устанавливались под углом 45° и через 120° друг к другу. Давление в печи регулируется дымососом и близко к атмосферному, но несколько ниже его.

Анализ конструктивных схем электродуговых плазмотронов применительно к плазмохимическим и металлургическим процессам, а также накопленный опыт в этой области

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по Соглашению о субсидии № 14.613.21.0005 (уникальный идентификатор проекта RFMEF161314X0005).

показали, что для плавки шихты в опытных малогабаритных печах целесообразно использовать генераторы дуговой плазмы с медными трубчатыми электродами. Такие плазмотроны эффективно нагревают различные газовые среды: воздух, азот, водород, гелий [1–3].

В опытных плавках использовались три одинаковых плазмотрона длиной около 2,5 м и наружным диаметром 0,215 м. Принципиальная схема плазмотрона приведена на рис. 1 [4]. Он имеет три основных изнашиваемых элемента: 1 — полый цилиндрический анод переменного сечения, 2 — кольцо закрутки плазмообразующего газа (азота), 3 — трубчатый катод с расширяющимся соплом. Электропитание плазмотронов осуществлялось от трех одинаковых регулируемых по току тиристорных преобразователей с $U_{xx} = 1200$ В, $I_{ном} = 400–700$ А. Поджиг дугового разряда производился высокочастотным осциллятором.

Пространственная стабилизация дугового разряда в осевой области электродов и перемещение опорных пятен дуги по их внутренней поверхности осуществляется вихревым потоком газа. Поступающий в разрядную камеру вращающийся поток газа разделяется на две части: примерно половина расхода газа поступает в анодную область, другая половина — в катод. Такое разделение потоков обусловлено закруткой газа и разницей в диаметрах входных сечений электродов $d_1/d_2 = 1,13–1,17$ (см. рис. 1).

Измерения основных параметров плазмотронов, выполненные в технологическом режиме, позволили получить их электрические, тепловые и ресурсные характеристики. На рис. 2 приведены вольт-амперные характеристики (ВАХ) дуги при различных расходах газа G и длинах цилиндрической части катода l_k , наиболее полная ВАХ дуги получена в диапазоне мощности 300–400 кВт (кривая 1). Кривые 2 и 3 эквидистантны ВАХ дуги для кривой 1. Как видно из линий равных мощностей (штриховые кривые), основные режимы плавки шихты проводились при $P = 520–560$ кВт, и в этом случае не было возможностей по варьированию силы тока дуги.

В проведенных испытаниях были измерены тепловые потоки в водоохлаждаемые электроды и рассчитаны коэффициенты полезного действия η каждого плазмотрона. При работе плазмотронов вне печи их КПД отличаются незначительно: 0,74–0,76. В процессе плавки значения η различны для всех плазмотронов: 0,7 — для первого, 0,66 — для второго и 0,64 — для третьего. Это связано с тем, что несущие корпуса плазмотронов частично засыпаны шихтой и водоохлаждаемый корпус каждого из них отбирает от печи разное количество тепла.

В металлургическом плазмотроне (рис. 1) в качестве плазмообразующей среды использовался технический азот из заводской системы газоснабжения. При поступлении азота в полость анода за уступом происходит срыв потока и примыкание горячего газа к стенке электрода диаметром D_1 , что создает благоприятные условия для шунтирования дуги и обеспечивает обширную зону A привязки опорного пятна дугового разряда

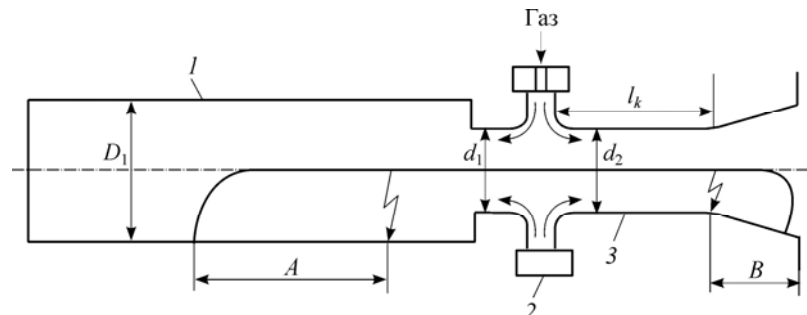


Рис. 1. Принципиальная схема плазмотрона.

1 — анод, 2 — закруточный аппарат, 3 — катод; A, B — зоны основной выработки электродов.

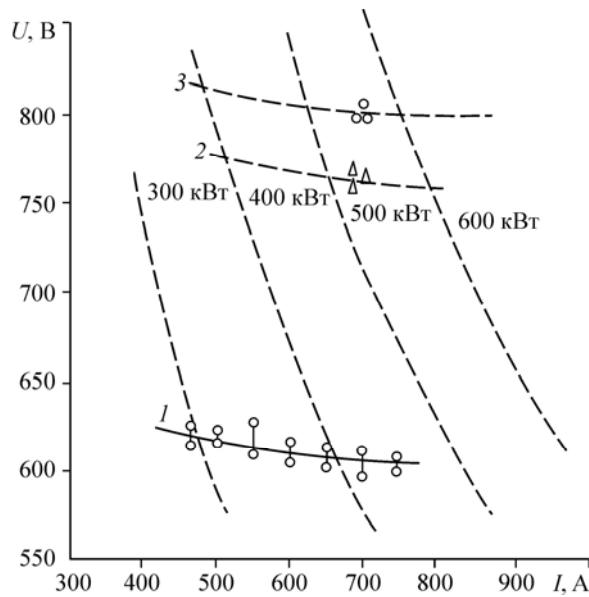


Рис. 2. Зависимость падения напряжения на дуге от тока в азоте.
 $G = 66\text{--}71$ (1), 130 (2), 140–148 (3) $\text{нм}^3/\text{ч}$, $I_k = 0,18$ (1), 0,25 (2), 0,25 (3) м.

к электроду. При этом предотвращается возможность горения дуги на торце внутреннего электрода.

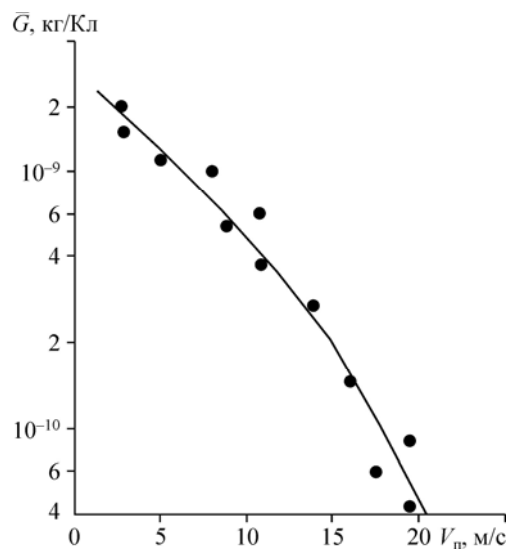
В работе [5] показано, что для обеспечения длительной работы на воздухе внутреннего электрода-анода трехкамерного плазмотрона необходимо выполнение следующих условий:

$$G/pd \geq 4 \cdot 10^{-6} \text{ и } I < I_{\text{кр}} = 1,6 \cdot 10^6 \sqrt{G/p}. \quad (1)$$

Здесь G — суммарный расход воздуха, поступающего в полость анода, $\text{кг}/\text{с}$; p — давление газа, Па ; d — диаметр электрода, м. От величины первого неравенства зависит окружная компонента скорости перемещения дугового пятна V_n по рабочей поверхности электрода. На рис. 3 показан пример экспериментальной зависимости удельной эрозии \bar{G} анода от V_n [6]. Значения $\bar{G} = 10^{-10}$ $\text{кг}/\text{Кл}$ достигаются только при выполнении первого критерия. Рассчитанный по формуле (1) критический ток $I_{\text{кр}}$ является предельным, при его превышении разрушение электрода быстро возрастает.

Поскольку перемещение анодного пятна в трехкамерном и металлургическом плазмотронах происходит за счет вращения газового потока, то условия (1) в основе своей должны быть подобны для

Рис. 3. Зависимость удельной эрозии электрода от скорости перемещения анодного пятна.
 $I = 270$ А, $d = 3,4 \cdot 10^{-2}$ м, $G = 6 \cdot 10^{-3}$ $\text{кг}/\text{с}$, $p = 1,2 \cdot 10^5$ Па, рабочая среда — воздух.



обоих плазмотронов. Так как расход газа, подаваемый в металлургический плазмотрон, делится практически пополам — одна часть поступает в анод, а другая в выходной электрод, то критерии (1) можно переписать в виде:

$$G / pd_1 \geq K \quad \text{и} \quad I < I_{\text{кр}} = L\sqrt{G/2p}, \quad (2)$$

где $G/2$ — расход газа, поступающий в анод, кг/с; p — давление газа в полости электрода, Па; d_1 — диаметр входной части анода. При соотношении диаметров $D_1/d_1 = 1,57$ (рис. 1) условия длительной работоспособности анода имеют вид:

$$G/2pd_1 \geq 3 \cdot 10^{-6} \quad \text{и} \quad I < I_{\text{кр}} = 1,2 \cdot 10^6 \sqrt{G/2p}. \quad (3)$$

При выполнении условий (3) величина удельной эрозии анода в условиях горения дуги на техническом азоте при силе тока 550–600 А составляет около $4 \cdot 10^{-11}$ кг/Кл. Такой уровень \bar{G} обеспечивает его высокий ресурс работы — 500 ч и выше, что подтверждено экспериментально.

Выходной электрод-катод имеет существенно меньший ресурс непрерывной работы (до 200 ч). Объяснить такую заметную разницу можно не только более высокой величиной \bar{G} для катода [1], но и более ограниченной зоной B привязки катодного пятна к электроду (рис. 1).

При наличии подового электрода в плазменной электропечи плазмотрон (см. схему на рис. 1) перейдет в плавильный плазмотрон, катодное пятно переместится на расплав шихты, и ресурс его работы будет определяться работоспособностью анода, а КПД поднимется до значений 0,9.

Таким образом, разработана и в опытно-промышленных условиях плазменной металлургической электропечи отработана конструкция струйно-плавильного технологического электродугового плазмотрона мощностью 300–500 кВт с длительным ресурсом работы.

Список литературы

1. Чередниченко В.С., Аньшаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электротехнологические установки. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. 602 с.
2. Аньшаков А.С., Урбах Э.К., Ващенко С.П., Поздняков Б.А., Урбах А.Э., Фалеев В.А., Чередниченко В.С. Исследование сильноточной дуги в гелии // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16, № 4. С. 687–689.
3. Plasma technology for a better environment // Int. Union for Electroheat / Ed. By R. Wolf. Paris: UIE, 1992. 144 p.
4. Пат. МПК⁵⁴ 2464748 РФ H05H1/34. Плазмотрон струйно-плавильный / Аньшаков А.С., Урбах Э.К., Урбах А.Э., Кузьмин М.Г., Чередниченко В.С.; заявитель и патентообладатель: Учрежд. Росс. акад. Наук Ин-т теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. № 2010152144/07, заявлено 20.12.2010; опубл. 20.10.2012. Бюл. № 29.
5. Аньшаков А.С., Быков А.Н., Тимошевский А.Н., Урбах Э.К. Взаимосвязь эрозионных процессов с аэродинамикой закрученного потока в цилиндрическом электроде плазмотрона // Теплофизика и аэромеханика. 2002. Т. 9, № 4. С. 623–632.
6. Урбах Э.К. Разработка и исследование технологических электродуговых плазмотронов: дисс. ... докт. техн. наук: 05.09.10. Новосибирск: НГТУ, 1999. 41 с.

Статья поступила в редакцию 28 мая 2015 г.