

По струйкам, составляющим струю в целом, была измерена скорость истечения плазменной струи. Ошибка измерения составляет 5—10%. Скорость истечения плазменной струи в случае отрицательной полярности кольцевого электрода v_- меньше скорости при положительной полярности v_+ как перед ударной волной ($v_- = 6.9$ и $v_+ = 9.2$), так и в ударной волне ($v_- = 2.5$ и $v_+ = 3.2$). Уменьшение скорости истечения струи вызывается наблюдаемой нестабильностью разряда при отрицательной полярности кольцевого электрода. Эта нестабильность, по всей вероятности, связана с особенностями распределения тока на электроде. Для струи с периодической структурой заметных различий в скорости истечения в зависимости от полярности не наблюдается. Ее скорость истечения в среднем равна 6 км/сек ($U = 2.25 \text{ кВ}$; $C = 600 \text{ мкФ}$; $r = 5 \text{ мм}$). Длина волны почти периодической структуры такой струи равна 16 мм . Число Маха и газокINETическая температура, полученные по формулам (2.2) и (2.3), исходя из экспериментальных данных, равны соответственно 1.6 и 3600° К . Давление в «разрядном» объеме на основании (2.1) составляет 14.6 атм .

Авторы благодарят М. А. Ельяшевича за внимание к работе, обсуждение результатов и ценные замечания.

Поступила 26 VIII 1964

ЛИТЕРАТУРА

1. Г р е ч и х и н Л. И., М и н ь к о Л. Я., П л ю т а В. Е. Исследование плазменной струи импульсного разряда. Оптика и спектроскопия, 1962, т. 12, № 1.
2. Г р е ч и х и н Л. И., М и н ь к о Л. Я. О структуре плазменной струи импульсного разряда. Ж. техн. физ., 1962, т. 32, № 9.
3. Г р е ч и х и н Л. И., М и н ь к о Л. Я. Применение высокоскоростной спектральной киносъемки для исследования быстропротекающих самосветящихся процессов. Ж. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 1964, т. 9, № 2.
4. С е м е н о в В. К., С п е к т о р о в Л. А. Изучение струи плазмы импульсного разряда. Ж. техн. физ., 1964, т. 34, № 5.
5. Б а й Ш и - и. Теория струй. Физматгиз, 1960.
6. E m d e n R. Ueber die Ausstromungserscheinungen permanenter Gase. Ann. Phys. und Chem., 1899, B. 6, S. 264.
7. В о р о н ц о в Е. И. Исследование некоторых физических процессов, протекающих в разряде мощной импульсной искры низкого напряжения. Материалы X Всесоюз. совещ. по спектроскопии, 1958, т. 2, стр. 154.
8. М а н д е л ь ш т а м С. Л. и др. О процессах на электродах искрового разряда. Материалы X Всесоюз. совещ. по спектроскопии, 1958, т. 2, стр. 148.

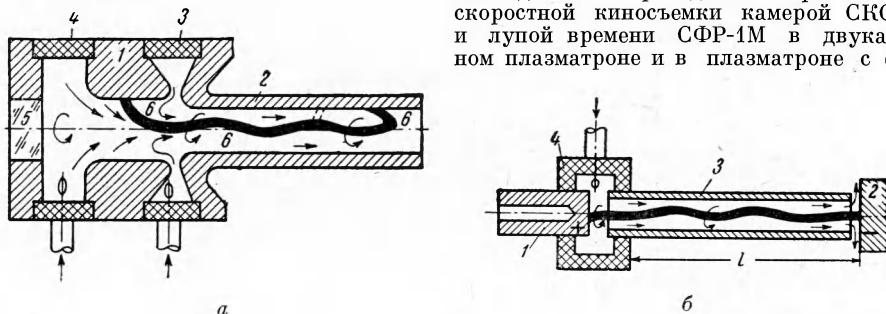
ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПРИЭЛЕКТРОДНЫХ УЧАСТКОВ И ОСОБЕННОСТИ РАСПОЛОЖЕНИЯ СТОЛБА ДУГИ В ПЛАЗМАТРОНЕ С ВИХРЕВОЙ ГАЗОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ

Л. И. Колонина, В. Я. Смоляков

(Новосибирск)

В работе приводятся результаты исследования движения приэлектродных участков дуги по внутренней поверхности электрода под действием окружной составляющей скорости завихренного газового потока в плазматроне постоянного тока с вихревой стабилизацией, а также особенностей пространственного расположения столба дуги.

Исследования проводились при помощи скоростной киносъемки камерой СКС-1М и лупой времени СФР-1М в двухкамерном плазматроне и в плазматроне с фик-



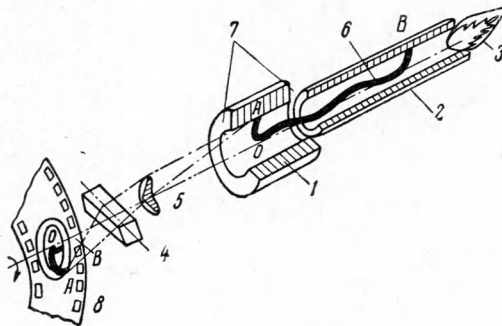
Фиг. 1

сированной длиной дуги (с промежуточной прозрачной вставкой) в диапазоне токов $I = 50—150 \text{ а}$. Найдена окружная скорость движения газа и радиальных участков ду-

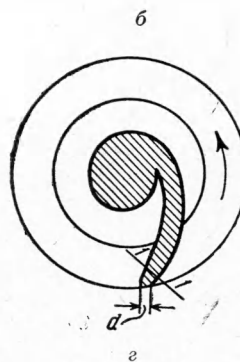
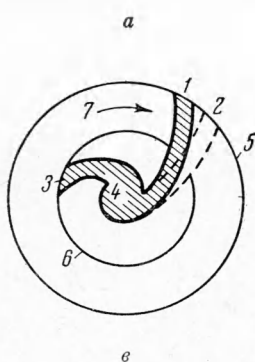
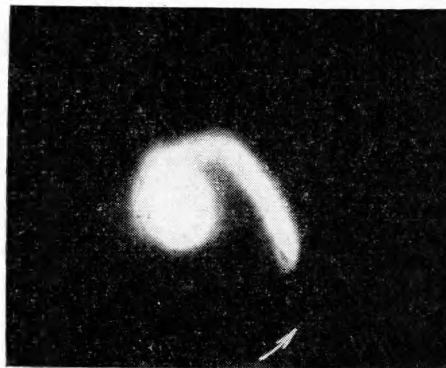
ги во внутреннем электроде двукамерного плазматрона и плотность тока в пятнах дуги и в столбе.

В настоящее время во многих конструкциях плазматронов с целью уменьшения эрозии материала электродов применяется принудительное перемещение опорного конца дуги. При использовании для перемещения дуги аэродинамических сил необходимо знать для теплового расчета электродов, насколько сильно скорость движения опорного конца дуги отличается от скорости движущего его потока газа, насколько равномерно движение опорного конца дуги по поверхности электрода и какова при этом плотность тока в перемещающемся пятне дуги. Выяснение этих вопросов явилось целью настоящей работы.

1. Принципиальные схемы экспериментальных установок изображены на фиг. 1. Плазматрон, изображенный на фиг. 1, а, имеет два охлаждаемых водой цилиндрических трубчатых электрода — внутренний 1 и выходной 2, вихревые камеры — 3 и 4, выполненные из изолятора, и прозрачную стенку 5 из тер-



Фиг. 2



Фиг. 3

мостойкого стекла, через которую производилось фотографирование. Диаметр выходного электрода равнялся 10 мм, внутреннего — 15 мм, диаметр вихревых камер 50 мм. Выполнение внутреннего электрода с диаметром, несколько большим диаметра выходного электрода, обеспечивало четкое проектирование области дуги, примыкающей к поверхности внутреннего электрода, на относительно темном фоне внутреннего торца выходного электрода и отсутствие наложения на него изображения конца дуги в выходном электроде. Основная часть положительного столба дуги располагалась вблизи

оси электродов в зоне наименьшего давления. Дуга замыкалась на стенки электродов радиальными участками, которые вращались под действием закрученного потока газа.

Подача газа осуществлялась через две вихревые камеры, что обеспечивало фиксацию зоны вращения опорного конца дуги в середине цилиндрического участка внутреннего электрода. В остальном принцип работы такого плазматрона почти не отличается от описанного в [1, 2].

В схеме плазматрона фиг. 1, б, с фиксированной длиной дуги массивные медные неохлаждаемые электроды 1 и 2 располагались по обе стороны прозрачной кварцевой трубки 3 диаметром 22 мм и длиной 500 мм. Воздух подавался через вихревую камеру, 4, расположенную со стороны первого электрода.

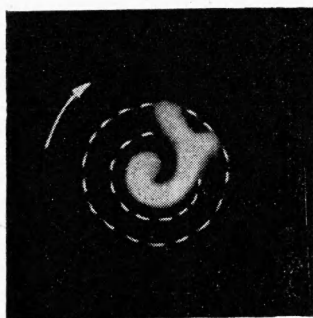
Принципиальная схема фотографирования для фиг. 1, а, приведена на фиг. 2. Съемки во всех случаях производились в установившемся режиме горения дуги через 10—15 сек после запуска. Для ослабления фона от светящегося газа использовалась комбинация светофильтров ЖС-17 и СЗС-22.

2. Характерные снимки дуги со стороны внутреннего электрода, полученные при скорости съемки $5 \cdot 10^3$ кадр / сек (СКС-1М) и $125 \cdot 10^3$ кадр / сек (СФР-1М), представлены на фиг. 3, а, в. На фиг. 3, а, видны (см. схему 3, в) радиальный участок дуги во внутреннем электроде, в начальном положении 1 и конечном 2, за счет смещения за время

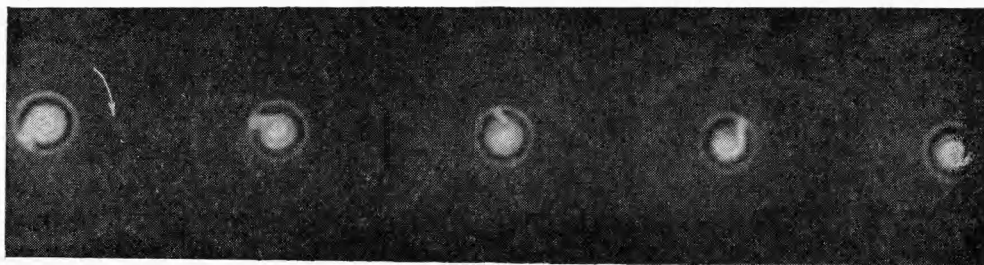
экспозиции кадра, радиальный участок дуги в выходном электроде 3, проекция столба дуги 4, блики на внутренних полостях электродов: внутреннего — 5, выходного — 6. На фиг. 3, б, конец дуги в выходном электроде не виден из-за малой глубины резкости при съемках лупой времени.

Из фотографий видно, что радиальные участки дуги во внутреннем и выходном электродах имеют вид запятой, выпуклостью в сторону направления движения газа. При детальном рассмотрении фиг. 3, б (см. поясняющую схему 3, в) на максимальном радиусе можно заметить характерное сужение столба дуги у электрода, причем, оно оказывается примерно одинаковым для разной полярности. Отношение диаметра суженной части (пятна дуги на электроде) к диаметру столба вблизи пятна (сечение 1—1) составляло в среднем 0,78 и очень незначительно менялось в диапазоне токов 50—150 а и давлений от 2 до 5 бар.

3. Эксперименты показали, что имеется различие в характере перемещения приэлектродной части дуги и пятна во внутреннем электроде при изменении давления в зоне вращения от 2 до 6 бар. При пониженном давлении (около 2 бар) часто наблюдается электрический пробой с радиальной части столба на стенку электрода, обуславливающий скачкообразное движение пятна по электроду. На фиг. 4 изображен радиальный участок дуги при наличии шунтирующего пробоя, при котором новый (короткий на снимке) канал образуется впереди по движению дуги. Скачкообразное (из-за пробоев) перемещение наблюдалось в проведенных экспериментах только для анодного пятна, когда электрическое поле в зазоре дуга — электрод способствует попаданию электро-



Фиг. 4



Фиг. 5

нов, эмитированных дугой, на стенку электродов. Оценка напряженности электрического поля в пробойном промежутке по результатам измерений при помощи потенциального зонда, проведенным авторами совместно с А. Д. Лебедевым, дает величину порядка 100 в на см. В случае катодного пятна пробой с дуги на электрод затруднен, так как эмиссии с холодного катода недостаточно при данной напряженности для пробоя. В проведенных экспериментах в этом случае пробоя действительно не наблюдались.

С повышением давления и соответствующим повышением пробивного напряжения, согласно правой ветви кривой Пашена, пробои не наблюдались даже в случае анодного пятна, и движение пятна во всех случаях было непрерывным. Кинограмма движения радиального участка дуги и пятна при давлении 5 бар для случая, когда электрод является анодом, приведена на фиг. 5. Из кинограммы, включающей в себя изображение почти полного оборота дуги, видно, что движение дуги в течение одного периода вращения достаточно равномерно. При понижении давления, кроме возникновения для анодной части дуги пробоев, характерно увеличение неравномерности движения пятна по электроду.

4. Из снимка на фиг. 3,6, видно, что проекция приосевой части дуги имеет диаметр, значительно больший диаметра столба в радиальном участке. Этот факт можно объяснить особенностью расположения столба дуги в выходном электроде.

При съемках перпендикулярно оси электродов (схема фиг. 1,6) через прозрачный участок выходного электрода (наблюдаемая длина составляла 480 мм) наблюдались отклонения дуги от геометрической оси электродов, имеющие почти стабильное положение во времени. Вид дуги приведен на фиг. 6, где стенки трубки обозначены пунктиром. Можно предположить, что эти отклонения связаны с воздействием продольно-вихревого потока на дугу. В таком вихревом потоке вследствие центробежных сил давление по радиусу трубки переменное и имеет минимум на оси, куда выталкивается дуга.



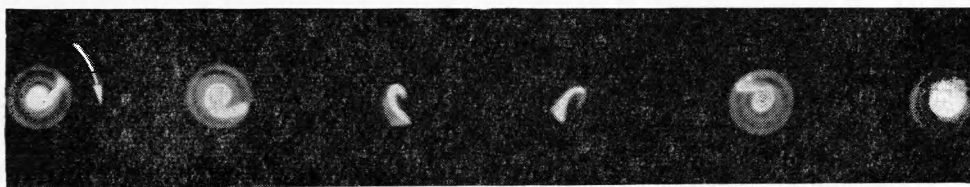
Фиг. 6

Зону минимального давления можно наблюдать при движении завихренной жидкости по пузырькам газа, выделяющимся в зоне минимума давления вследствие кавитации. Проведенные нами наблюдения при проливке воды через плазматрон с прозрачными электродами показали наличие радиальных отклонений зоны минимального давления от оси, подобных радиальным отклонениям дуги, горящей в плазматроне, причем траектория пузырьков имела вид спирали.

Если принять предложенную гипотезу, то можно легко объяснить как большой диаметр проекции осевой части дуги на фиг. 3,6, так и нестабильность формы проекции столба, хорошо видную на фиг. 7. Такая нестабильность объясняется изменением длины дуги при шунтировании в выходном электроде [2]. С изменением длины дуги и колебаниями тока при шунтировании связаны и периодические пульсации яркости (фиг. 7), на что указывает совпадение частоты шунтирования и пульсаций яркости.

5. Измерение скорости движения приэлектродного участка дуги во внутреннем электроде плазматрона (фиг. 1,а) проводилось путем статистической обработки кинограммы СКС-1М вращения дуги для ста полных оборотов дуги по электроду. Обработка показала, что период вращения дуги достаточно стабилен во времени, максимальное отклонение не превышало 20% от средней величины, что свидетельствует о достаточной равномерности движения дуги под действием газового потока.

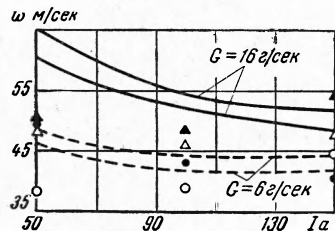
Для тех условий, в которых измерялась скорость вращения дуги, производились измерения окружной скорости газа при помощи трубки Пито в среднем по ширине сечения второй вихревой камеры на радиусе, соответствующем радиусу внутреннего электрода. Предполагалось, что окружная скорость газа в этом сечении мало отличается от таковой у стенок внутреннего электрода.



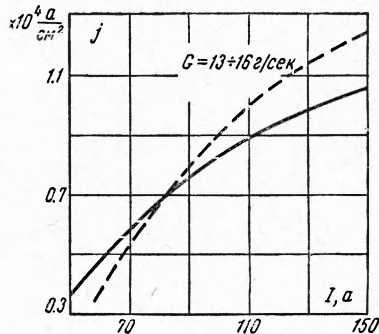
Фиг. 7

Сравнение скоростей движения газа и опорного пятна дуги показало, что скорость движения приэлектродного участка пятна дуги во внутреннем электроде двукамерного плазматрона близка к скорости движущего ее потока газа (фиг. 8). На фиг. 8 проведены кривые соответствующей окружной скорости движения газа (для прямой полярности — верхняя кривая и для обратной — нижняя кривая для каждого расхода).

Экспериментальные значения линейных скоростей движения пятна нанесены точками. Треугольники соответствуют прямой полярности (внутренний электрод — катод), кружочки — обратной. Причем зачерненные значки даны для точек, полученных при расходе воздуха $G = 16$ г/сек, а незачерненные — для $G = 6$ г/сек.



Фиг. 8



Фиг. 9

Видно также, что степень увлечения конца дуги потоком почти не зависит от полярности. Окончательные выводы о зависимости степени увлечения дуги потоком от силы тока (и других параметров) сделать трудно ввиду того, что измерения скорости вращения газа и радиального участка дуги проводились одновременно и не строго в одном сечении, а имеющихся экспериментальных точек для скорости вращения дуги пока недостаточно, чтобы провести кривые, а можно говорить лишь об области.

Измерение скорости вращения радиального участка дуги в выходном электроде при помощи киносъемки со стороны факела дало значение угловой скорости вращения, близкое к угловой скорости вращения опорного конца дуги во внутреннем электроде. Оценка будет грубой: она производилась максимум по одному или даже доле оборота пятна, соответствовавшему удлинению дуги до момента шунтирования.

6. По величине светового диаметра дуги, определенного при съемках СФР, была произведена оценка величин плотности тока в пятне дуги в диапазоне токов $I = 50-150$ а. Соответствующий график для двух различных полярностей приведен на фиг. 9. Сплошная кривая на графике соответствует случаю, когда внутренний электрод был анодом, пунктирная кривая — катодом. Расход воздуха составлял в среднем 14.5 г/сек при статическом давлении в зоне пятна 5 бар. Можно видеть, что для случаев обеих полярностей имеется некоторое возрастание плотности тока в пятне с током дуги.

Ориентировочное сравнение светового диаметра пятна с диаметром пятна, определенным по следу термического воздействия дуги на электрод, наблюдаемого на поверхности электрода, показало, что световой диаметр пятна во всех случаях несколько больше диаметра термического воздействия.

По данным для светового диаметра можно оценить величину удельного теплового потока через пятна дуги. Она оказалась близкой для случаев катодного и анодного пятна и имела при давлении 5 бар в диапазоне токов 50—150 а порядок от $0.6 \cdot 10^9$ до $2.5 \cdot 10^9$ вт/м². На основании вышеизложенного можно сделать некоторые выводы.

Примерное соответствие скоростей движения опорного конца дуги во внутреннем электроде скорости газа позволяет в исследуемом диапазоне токов определять скорость движения пятна дуги, необходимую для теплового расчета, по вычисленной или измеренной скорости газа. При малых давлениях газа в плазматроне следует обращать внимание на возможность возникновения скачкообразного движения дуги, ухудшающего охлаждение электрода в пятне. По предварительной оценке можно говорить о незначительной разности плотностей тока в анодном и катодном пятнах в исследованном диапазоне токов, давлений и скоростей движения пятна.

Замеченные радиальные отклонения осевой части дуги от геометрической оси электродов необходимо учитывать при изучении условий шунтирования в выходном электроде плазматрона с вихревой стабилизацией.

Поступила 9 X 1964

ЛИТЕРАТУРА

1. Даутов Г. Ю., Жуков М. Ф., Смоляков В. Я. Исследование работы плазматрона с воздушной стабилизацией дуги. ПМТФ, 1961, № 6.
2. Смоляков В. Я. О некоторых особенностях горения электрической дуги в плазматроне постоянного тока. ПМТФ, 1963, № 6.