

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПЛАЗМАТРОНА С ВОЗДУШНОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ДУГИ

Г. Ю. Даутов, М. Ф. Жуков, Б. Я. Смоляков

(Новосибирск)

В последние годы много уделяется внимания исследованию горения электрической дуги в специальных устройствах, именуемых плазматронами. Цель этих исследований — изучить особенности работы дугового разряда, стабилизированного газом или водой, с тем, чтобы обеспечить нагрев рабочего тела до высоких температур (5000—12000°K) при минимальном загрязнении потока газа продуктами разрушения электродов и корпуса камеры горения, связанными с воздействием дугового разряда, и добиться непрерывной работы плазматрона на протяжении достаточно длительного времени, в особенности в окислительной среде, например в воздухе.

Представляет также интерес выяснение путей эффективного использования мощности источника, что тесно связано с выбором внешней характеристики источника питания дуги и его напряжения и определением условий устойчивости горения электрической дуги. Выяснение этих факторов позволит найти границы области устойчивого горения дуги при заданных параметрах внешнего контура и источника энергии. Здесь целесообразно использовать известный метод анализа условий устойчивости горения электрической дуги постоянного тока [1, 2], учитывая особенности конкретной задачи.

Ниже приводятся некоторые результаты исследований по затронутым вопросам.

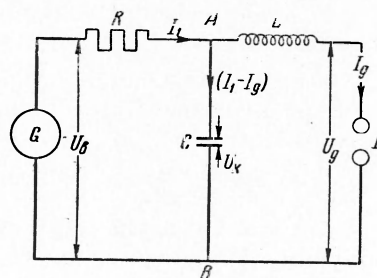
1. Устойчивость горения дуги. Одним из методов исследования электрических процессов в газах является метод вольт-амперных характеристик. Зависимость $U_g = f(I_g)$, где U_g — падение напряжения на дуге, а I_g — сила тока в цепи, называется вольт-амперной характеристикой дуги.

Вид функции $U_g = f(I_g)$ зависит от многих факторов и, в частности, от величины расхода газа через камеру горения и давления, от формы и материала электродов и от других факторов. Функция $f(I_g)$ для дугового разряда нелинейна и падающая. Принципиальная схема питания электрической дуги приведена на фиг. 1. Она является наиболее распространенной и в то же время простейшей для исследования процесса устойчивости горения дугового разряда при малых возмущениях. Такая цепь содержит источник питания G , омическое сосредоточенное сопротивление R , индуктивность L и емкость C , а также дуговой промежуток D . Рассматриваемая схема аналогична с электрической схемой дугового генератора [2]; отличие заключается в том, что напряжение источника питания зависит от силы тока, т. е. $U_b = \varphi(I_g)$.

При совместной работе внешней цепи с электрической дугой должно выполняться равенство

$$f(I_g) = \varphi(I_g) \quad (1)$$

Уравнение (1) имеет в общем случае два решения: одно из них определяет область устойчивого горения дуги, другое — неустойчивого. Предельный случай, когда два решения сливаются в одно, определяет границу отделяющую участки статической вольт-амперной характеристики дуги с устойчивым и неустойчивым горением дуги.



Фиг. 1. Принципиальная схема питания электрической дуги

В случае установившегося режима $I_{10} = I_{g0} = I_0$, поэтому

$$U_b = I_0 R + U_g$$

Индекс 0 указывает на то, что величина соответствует установившемуся режиму. При рассмотрении устойчивости горения дуги предполагали колебания настолько медленными, чтобы можно было к мгновенным значениям электрических величин применить законы квазистационарных токов.

Допустим, что в результате флуктуации тока в электрической дуге или по другим причинам установившийся режим нарушен. Обозначим относительную величину малого возмущения тока через i . Тогда

$$I_g = I_0 (1 + i), \quad i \ll 1 \quad (2)$$

Выясним условия, при которых с течением времени величина i стремится к нулю, т. е. горение дуги возвращается к начальному состоянию. Такой режим работы называется устойчивым.

При изменении силы тока в дуге изменяются I_1 , U_g и U_b

$$I_1 = I_{10} (1 + i_1) = I_0 (1 + i_1) \quad (3)$$

$$U_g = U_{g0} (1 + u) \quad (4)$$

$$U_b = U_{b0} (1 + \varepsilon) \quad (5)$$

Полное падение потенциала в цепи (фиг. 1) должно равняться электродвижущей силе, действующей в цепи, т. е.

$$U - L \frac{dI_g}{dt} = U_g + I_1 R \quad (6)$$

Применяя второй закон Кирхгофа для цепи ABD и помня, что

$$CdU_k = (I_1 - I_g) dt \quad (7)$$

получим

$$I_1 = C \left(\frac{dU_g}{dt} + L \frac{d^2 I_g}{dt^2} \right) + I_g \quad (8)$$

Здесь U_k — разность потенциалов на обкладках конденсатора. Подставляя значение I_1 в (6), найдем дифференциальное уравнение

$$CRL \frac{d^2 I_g}{dt^2} + L \frac{dI_g}{dt} + RI_g = U_b - U_g - CR \frac{dU_g}{dt} \quad (9)$$

Подставляя в (9) выражения для U_g , U_b , I_1 и их производных, получим

$$CRL \frac{d^2 i}{dt^2} + L \frac{di}{dt} + Ri = \frac{U_b}{I_{g0}} \varepsilon - CR \frac{U_{g0}}{I_{g0}} \frac{du}{dt} - \frac{U_{g0}}{I_{g0}} u \quad (10)$$

Зная внешнюю характеристику источника питания, найдем

$$U_b \varepsilon = \left(\frac{\partial U_b}{\partial I_1} \right)_0 dI_1 = \Phi I_0 i_1 \quad \left(\Phi = \left(\frac{\partial U_b}{\partial I_1} \right)_0 \right) \quad (11)$$

Из уравнения (8) найдем зависимость между i_1 и i

$$i_1 = \frac{1}{I_0} \left[C \left(U_0 \frac{du}{dt} + I_0 L \frac{d^2 i}{dt^2} \right) + I_0 i \right] \quad (12)$$

Вольт-амперная характеристика дуги связывает величины u и i соотношением

$$u = R^* \frac{I_{g0}}{U_{g0}} i \left(\frac{\partial U_g}{\partial I_g} \right)_0 = R^* \quad (13)$$

Величина R^* меньше нуля и называется дифференциальным сопротивлением дуги. Таким образом, имеем

$$\frac{du}{dt} = R^* \frac{I_{g0}}{U_{g0}} \frac{di}{dt} \quad (14)$$

Подставляя полученные выражения i , u , ε и du/dt в уравнение (10), получим

$$\frac{d^2 i}{dt^2} CL(R - \varphi) + (L + CRR^* - \varphi CR^*) \frac{di}{dt} + (R + R^* - \varphi) i = 0 \quad (15)$$

Отсюда

$$i = Ae^{r_1 t} + Ae^{r_2 t} \quad (16)$$

где r_1 и r_2 — корни характеристического уравнения, определяемые формулой

$$r = -\frac{1}{2} \frac{L + CRR^* - \varphi CR}{CL(R - \varphi)} \pm \left(\frac{1}{4} \left[\frac{L + CRR^* - \varphi CR}{CL(R - \varphi)} \right]^2 - \frac{R + R^* - \varphi}{CL(R - \varphi)} \right)^{1/2} \quad (17)$$

Если подкоренная величина больше нуля, то условием устойчивости горения дуги является отрицательность корней r_1 и r_2 , т. е. выполнение следующих неравенств:

$$\frac{L + CRR^* - \varphi CR}{CL(R - \varphi)} > 0, \quad \frac{R + R^* - \varphi}{CL(R - \varphi)} > 0$$

Так как величины C и L положительны, эти условия можно представлять так:

$$\frac{L}{R - \varphi} + CR^* > 0, \quad \frac{R^*}{R - \varphi} + 1 > 0$$

Учитывая отрицательность дифференциального сопротивления дуги из первого неравенства следует, что $(R - \varphi)$ всегда должно быть больше нуля, поэтому можно окончательно условия устойчивости дуги, при сделанных выше допущениях, записать в виде следующих неравенств:

$$L + (R - \varphi) CR^* > 0, \quad R^* + (R - \varphi) > 0 \quad (18)$$

Таким образом, если подкоренная величина в уравнении (17) положительна и выполняются условия (18), то возникающие в цепи от тех или иных причин возмущения затухают аperiodически и тем быстрее, чем больше по абсолютной величине значение корней уравнения (17).

В случае, когда подкоренная величина в равенстве (17) меньше нуля, т. е. корни уравнения комплексные, условием устойчивости является отрицательность действительных частей корней r_1 и r_2 , т. е.

$$\frac{L + CRR^* - \varphi CR}{CL(R - \varphi)} > 0 \quad (19)$$

Условием отрицательности подкоренного выражения будет неравенство

$$\frac{R + R^* - \varphi}{CL(R - \varphi)} > \frac{1}{4} \left[\frac{L + CRR^* - \varphi CR}{CL(R - \varphi)} \right]^2 > 0 \quad (20)$$

Таким образом, в обоих случаях условиями устойчивости будут неравенства (18). Однако затухание возникающего в цепи возмущения носит колебательный характер.

В частном случае, когда $\varphi = 0$, т. е. $U_b = \text{const}$, приходим к известным неравенствам [1,2] и др.

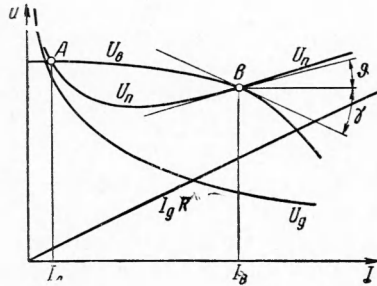
$$R + R^* > 0, \quad L + CRR^* > 0 \quad (21)$$

Условие (18) показывает, что при данных емкости и индуктивности цепи устойчивость дуги зависит от внешнего сопротивления R и внешней характеристики источника питания φ . Построим зависимость потребного напряжения:

$$U_n = RI_g + U_g \quad (22)$$

При R , не зависящим от I , тангенс угла наклона φ касательной к кривой $U_n = U_n(I)$ представляет собой величину $R + R^*$ (фиг. 2), а $\varphi = \text{tg } \gamma$ представляет собой тангенс угла наклона касательной к внешней характеристике источника. Тогда условие (19) можно переписать в виде

$$\text{arc tg}(R^* + R) > \gamma \quad (23)$$



Фиг. 2. Зависимость U_g и U_n от силы тока

В точке B угол $\text{arc tg}(R^* + R)$ положительный, угол γ — отрицательный (угол отсчитывается от оси I_g в сторону положительного направления касательной).

Следовательно, в точке B условие (23) выполняется, дуга будет устойчивой. Действительно, предположим, что сила тока случайно отклонилась от I_B в сторону увеличения. Напряжение источника становится меньше требуемого напряжения, источник оказывается не в состоянии поддерживать силу

тока большую, чем I_B . Сила тока начинает уменьшаться до I_B . Если сила тока случайно уменьшится, возникает избыточное напряжение, т. е. $U_b > U_n$, и сила тока снова возрастает до значения I_B . Таким образом, дуга в режиме B при любых малых отклонениях I устойчива.

В точке A условие (23) не выполняется, и если сила тока стала больше I_A , то напряжение источника становится больше требуемого напряжения, и сила тока продолжает увеличиваться. При уменьшении силы тока напряжение источника становится меньше требуемого напряжения, и сила тока продолжает быстро уменьшаться до полного гашения дуги. Таким образом, при любых отклонениях силы тока в режиме A дуга в начальное состояние не возвращается, т. е. является неустойчивой.

При увеличении R точки A и B , перемещаясь по кривой U_b , сближаются. Поэтому, изменяя внешнее сопротивление, можно регулировать силу тока I . R можно увеличить так, чтобы точки A и B совпали. В этом случае уравнение (1) имеет только один корень I_{\min} . При данных параметрах цепи L, C, R^*, φ и $\partial R / \partial I = 0$ горение дуги на токах меньших, чем I_{\min} , невозможно.

Если неустойчивость дуги наступает из-за нарушения второго условия (18), при перемещении вдоль кривой статической вольт-амперной характеристики из зоны устойчивого горения дуги к границе величина

$$\text{arc tg}(R^* + R) \rightarrow \gamma$$

В этом случае подкоренная величина в равенстве (17), начиная с некоторого значения $(R^* + R - \varphi)$, будет положительным и возникающие возмущения затухают по аperiодическому закону.

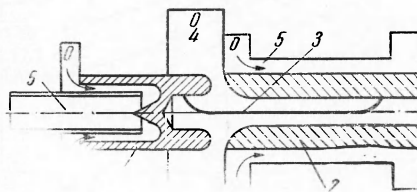
Меняя условие в газовом промежутке и внешнее сопротивление, можно получить верхнюю границу области устойчивого горения дуги для данного источника питания.

Для расширения верхней границы области устойчивого горения в направлении увеличения U_g необходимы источники с более высоким выходным напряжением.

Условие (18) показывает, что дуга может работать устойчиво и без внешнего сопротивления, но для этого необходимо иметь источник питания с крутопадающей внешней характеристикой, при котором $R^* > \varphi$.

Некоторые результаты экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования горения электрической дуги в плазматроне проводились на модели, схема которой приведена на фиг. 3. Катод имел форму стакана, а анод — толстостенной трубки. Материалом электродов служила

медь. Для предохранения стенок электродов от термического разрушения последние интенсивно охлаждались. Надежное охлаждение электродов при небольших гидравлических потерях оказалось возможным осуществить, выбрав схему водяного вихревого охлаждения. В этом случае охлаждающая жидкость через специальный насадок подается параллельно касательной к наружной поверхности цилиндра. Применение вихревого водяного охлаждения позволило отказаться от оребрения поверхности и значительно упростило конструкцию. В исследованной конструкции для успешного охлаждения достаточно было иметь избыточное давление воды на входе в рубашку охлаждения не более 1 кг / см^2 . Опыт показал, что закрутка воды сохранялась на всем протяжении канала. Воздух в камеру горения дуги подавался через отверстия, тангенциально размещенные на периферии камеры закручивания, выполненной из оргстекла и являющейся одновременно и электрическим изолятором, отделяющим анод от катода.



Фиг. 3. Схема плазматрона. 1 — катод, 2 — анод, 3 — электрическая дуга, 4 — вихревая камера, 5 — вода

При стационарной работе большая часть положительного столба дуги располагается вдоль оси цилиндрической камеры горения, что связано с существованием вихревого движения газа, строго определяющего положение дуги в зоне наименьшей плотности в центре вихря. Концы дуги искривлены и опираются на внутреннюю цилиндрическую поверхность электродов (фиг. 3).

Наличие вихревого движения газа в камере не только стабилизирует положение дуги в пространстве, но и обеспечивает непрерывное перемещение опорных точек дуги с достаточно большими скоростями, что в сочетании с водяным охлаждением электродов предотвращает последние от чрезмерного нагревания, а следовательно, и от интенсивного теплового разрушения и предотвращает загрязнение рабочей среды. Заметим, что если вихревое движение внутри полости анода существует всегда, то внутри полости катода оно существует только при определенных соотношениях между внутренними диаметрами катода и анода, когда такое движение может индуцироваться наиболее сильно. Качественные экспериментальные исследования позволяют найти это соотношение, равное примерно единице. Можно считать, что дуга по характеру процесса на катоде является дугой с относительно холодным катодом, а следовательно, выход электронов с поверхности обусловлен в основном автоэлектронной эмиссией. Потеря мощности на электродах определялась посредством замера изменений температуры охлаждающей воды.

При проведении экспериментов одновременно измерялись:

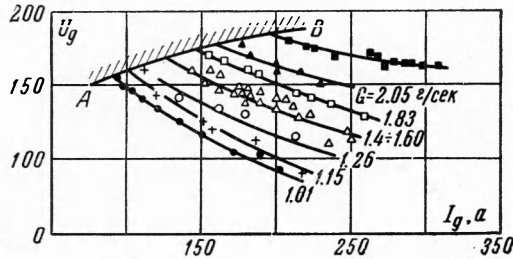
1. Расход охлаждающей воды и расход воздуха — ротаметрами РС-5.
2. Температура воды — хромель-капельными термометрами с подачей сигнала на электронный потенциометр.
3. Ток дуги и падение напряжения на ней — соответственно амперметром и вольтметром типа Н-375, класс 1,5.

Опыты проводились при давлении воздуха в камере горения дуги, близком к атмосферному. По измеренным величинам строились вольт-амперные характеристики, определялась температура струи газа и к. п. д. плазматрона.

На фиг. 4 приведено семейство статических вольт-амперных характеристик электрической дуги, стабилизированной воздушным вихрем. Каждая кривая соответствует определенному значению расхода воздуха через плазматрон. Падение напряжения тем больше, чем больше расход газа через камеру горения. Кривая АВ — граница устойчивого горения.

Получить экспериментальные точки вольт-амперной характеристики при токах меньших, чем это приведено на фигуре для $G = \text{const}$, не удалось из-за погасания дуги.

Электрическая дуга питалась от генератора постоянного тока. Для данного источника можно принять значение $\varphi = 0$ ($U_{b0} = 220-230$ в).



Фиг. 4. Семейство статических вольт-амперных характеристик дуги

Поэтому условиями устойчивости являются неравенства (24), а границей устойчивости — равенство

$$R^* + R = 0$$

Из приведенного эксперимента следует, что экспериментально найденная граница достаточно точно совпадает с кривой $R^* + R = 0$.

Нижней границей семейства вольт-амперных харак-

теристик должна быть характеристика дуги при $G = 0$ и постоянном межэлектродном промежутке. Если этот промежуток небольшой, то это есть вольт-амперная характеристика сварочной дуги.

При выбранном источнике питания и заданном межэлектродном промежутке дуга может гореть устойчиво только внутри области (фиг. 5), ограниченной:

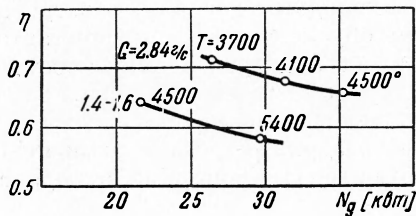
1) сверху — кривой AB , проходящей через точки, разделяющие вольт-амперную характеристику на зоны устойчивого и неустойчивого горения дуги;

2) справа — кривой BC , соответствующей максимально допустимому току нагрузки через источник электроэнергии;

3) снизу — кривой AC .

Расширение области устойчивого горения возможно в том случае, если выбрать источник питания с большим напряжением холостого хода или допускающий большие токи.

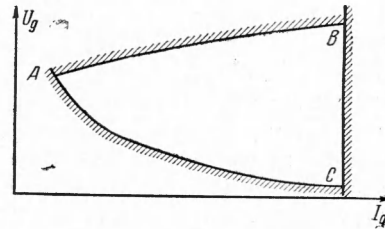
Таким образом, для наиболее эффективного использования мощности



Фиг. 6. Тепловой к. п. д. плазматрона в зависимости от мощности дуги

источника питания желательно, чтобы дуга в плазматроне с балластным сопротивлением в цепи работала на режимах, близких к I_{max} , а геометрия проточной части камеры горения дуги (при заданном расходе газа) должна быть выбрана такой, чтобы вольт-амперная характеристика располагалась в верхней части области устойчивого горения дуги. Вторым путем повышения эффективности является использование источников питания с круто падающей характеристикой.

В процессе эксперимента определялись также тепловые к. п. д. установки и температура торможения струи. Тепловым к. п. д. плазматрона названо отношение мощности, пошедшей на непосредственный нагрев воздуха, к мощности, вложенной в электрическую дугу. На фиг. 6 на основании экспериментального материала приведена зависимость η от подведенной к дуге мощности N_g в некотором диапазоне расхода воздуха. При относительно небольших температурах



Фиг. 5. Границы области устойчивого горения дуги

газа (от 3700 до 4500° К) к. п. д. изменяется от 70 до 65%. С повышением температуры газа к. п. д. снижается, и при 5400° К будет равен $\eta = 58\%$.

На фиг. 7 приведена зависимость температуры торможения нагретого в плазматроне воздуха T_0 от $\Delta N = N_g - N_k$ для двух значений $G = 2.84$ (кривая 1) и 3.15 г/сек (кривая 2); N_k — мощность, отводимая при охлаждении катода. Температура торможения воздуха T_0 вычислялась по полному теплосодержанию воздуха.

Из баланса тепла, предполагая режим работы электродугового подогревателя стационарным, определялось количество тепла Q , подведенное к газу. Определение температуры струи проводилось не только методом баланса энергии, но и при помощи спектрального метода. Сопоставление результатов измерений показало вполне удовлетворительное совпадение. Предположение о стационарности режима близко к истине, так как замеры температур производились после выдержки постоянного режима по электрическим и газовым параметрам в течение 2—3 минут. Контроль за температурой охлаждающей воды также подтверждает это предположение.

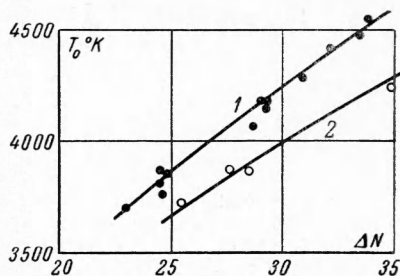
Таким образом, на основании проведенных исследований удалось установить границы области устойчивого горения электрической дуги в описанном плазматроне. Для расширения этой области необходимы источники питания более высокого напряжения. Проведенные эксперименты показали удовлетворительное соответствие между экспериментом и теорией.

В исследуемой установке с воздушной стабилизацией дуги удалось достигнуть температуры газовой струи до 6000° К; при этом тепловой к. п. д. плазматрона был около 50%. Использование вихревого охлаждения и закрученного потока газа в исследованной конструкции позволило значительно снизить расход материала электродов. Загрязненность струи газа продуктами разрушения электродов была менее 1%.

Поступила 4 IX 1961

ЛИТЕРАТУРА

1. Грановский В. П. Электрический ток в газе. ГИТЛ, 1952.
2. Капцов Н. А. Электрические явления в газах и вакууме. ГИТЛ, 1960.



Фиг. 7. Зависимость температуры торможения плазмы от $(N_g - N_k)$