

УДК 537.527

## ПРИМЕНЕНИЕ ПАССИВНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗОНДА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ

Е.А. ЯКОВЛЕВ, Е.В. МАКСИМОВ, М.У. ИСАБЕКОВ

*Химико-металлургический институт Национального центра по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан, Караганда*

Измерен потенциал плазменной струи пассивным электрическим зондом, перемещающимся перпендикулярно вектору скорости струи по ее диаметру. Определены условия, при которых кривая температуры плазменной струи совпадает с кривой ее потенциала. Предложены возможные области применения пассивного электрического зонда для диагностики процессов в низкотемпературной плазме.

Потенциал плазменной струи, вытекающей из дугового плазматрона, исследовался в работах [1, 2], где отмечено его максимальное значение, равное 45 В для воздушной плазмы, 50 В для воздушной плазмы с присадкой природного газа и 11 В для аргона. Было показано [2, 3], что источником этого потенциала является прианодная часть дуги (от наиболее выступающей части дуги до анода (рис. 1)), а его величина равна сумме анодного падения потенциала и падения напряжения на прианодном участке дуги.

В работе [1] также установлено, что ход кривой распределения потенциала по сечению плазменной струи аналогичен ходу кривой распределения температуры. Поэтому было проведено исследование плазменной струи пассивным (без наложения внешней ЭДС) электрическим зондом для проверки возможности получения информации о процессах в плазменной струе с помощью измерения ее электрического потенциала.

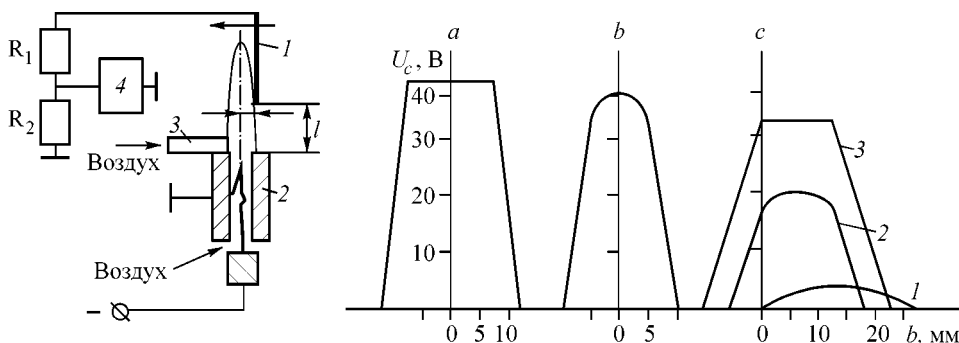


Рис. 1. Схема установки для зондирования плазменной струи и распределение потенциала по ее сечению.

$a$  —  $R_d = 1823$  кОм,  $l = 35$  мм;  $b$  —  $R_d = 16,5$  кОм,  $l = 35$  мм;  $c$  — подача воздуха на срез сопла плазматрона,  $R_d = 1823$  кОм,  $l = 85$  (1), 65 (2), 45 мм (3).

Экспериментальная установка состояла из плазмотрона ЭДП-104 мощностью 10 – 27 кВт, включенного по прямой полярности, который нагревал воздух до среднemasсовой температуры  $T_{cp} = 3000 - 5500$  К при расходе  $Q_{воз} = 1 - 3$  г/с. Для изучения распределения потенциала по сечению плазменной струи использовался электрический зонд (1), представляющий собой вольфрамовую проволоку диаметром 0,8 мм, помещенную в фарфоровый изолятор [4], из которой она выступала на длину 1 мм (см. рис. 1).

Скорость передвижения зонда составляла 7 – 16 мм/с, расстояние от кончика зонда до среза сопла плазмотрона находилось в диапазоне 35 – 85 мм. Потенциал зонда через делитель напряжения R1 – R2 подавался на быстродействующий регистратор Н-338 (4) со входным сопротивлением 2 МОм. Сопротивление делителя было либо  $R_2 = 1,5$ ,  $R_1 = 15$  кОм, либо  $R_2 = 153$ ,  $R_1 = 1670$  кОм. В отдельных опытах на срез сопла плазмотрона подавали через форсунку (3) холодный воздух в количестве 1 г/с со скоростью 150 м/с, поэтому соотношение скоростных напоров холодного воздуха и плазменной струи было равно 2. Измерение температуры плазменной струи производили с помощью вольфрам-рениевых термопар.

Эксперименты показали, что распределение потенциала по сечению плазменной струи, измеренное вольфрамовым зондом (см. рис. 1 а, б), зависит от величины сопротивления делителя  $R_d = R_1 + R_2$ . Если бы сопротивление делителя напряжения и самопишущего вольтметра равнялось бесконечности, то, очевидно, значение потенциала было бы одинаковым во всех точках струи. Но так как оно имеет определенное конечное значение, то напряжение распределяется пропорционально сопротивлением делителя и участка плазменной струи от анода до кончика зонда  $R_{пл}$ :

$$U_c = IR_{пл} + IR_d, \quad (1)$$

где  $I$  — ток зонда.

$$\text{Если } R_{пл} \ll R_d, \text{ то } U_c = IR_d = U'_c. \quad (2)$$

$$\text{Если } R_{пл} \gg R_d, \text{ то } U_c = IR_{пл}. \quad (3)$$

Так как  $R_{пл} = f(T_{пл})$ , где  $T_{пл}$  — температура плазмы, а сопротивление участка плазменной струи в основном сосредоточено в области, прилегающей к зонду (как наиболее холодной и, следовательно, наименее проводящей области), то при соблюдении условия (3) можно оценивать температуру плазменной струи по показаниям самописца. Тогда из (1) имеем

$$R_{пл} = (U_c - IR_d)/I = (U_c - U'_c) R_d / U'_c = R_d U_c / U'_c = K / U'_c = f(T_{пл}), \quad (4)$$

$$1/R_{пл} = 1 U'_c / U_c R_d = K_1 U'_c = f_1(T_{пл}). \quad (5)$$

Таким образом, кривая распределения потенциала по сечению плазменной струи будет повторять кривую распределения температуры только при соблюдении условия (3) (см., например, кривую 1 на рис. 1, с). При соблюдении условия (2) получается, что  $U'_c = U_c = \text{const}$ , что и видно из рис. 1, а. Ход кривой потенциала не соответствует ходу кривой температуры, и только в крайних областях плазменной струи при  $b > 12$  мм условие (3) выполняется для случая на рис. 1, а и при  $b > 10$  мм для случая на рис. 1, б. При боковой подаче воздуха (см. рис. 1, б) наблюдается также смещение максимума потенциала относительно оси симметрии плазмотрона.

На рис. 2 представлены экспериментальные кривые потенциала и температуры по сечению плазменной струи. Видно, что эти кривые совпадают (за исключением граничных областей) при  $l = 35$  мм и не совпадают при  $l = 85$  мм.

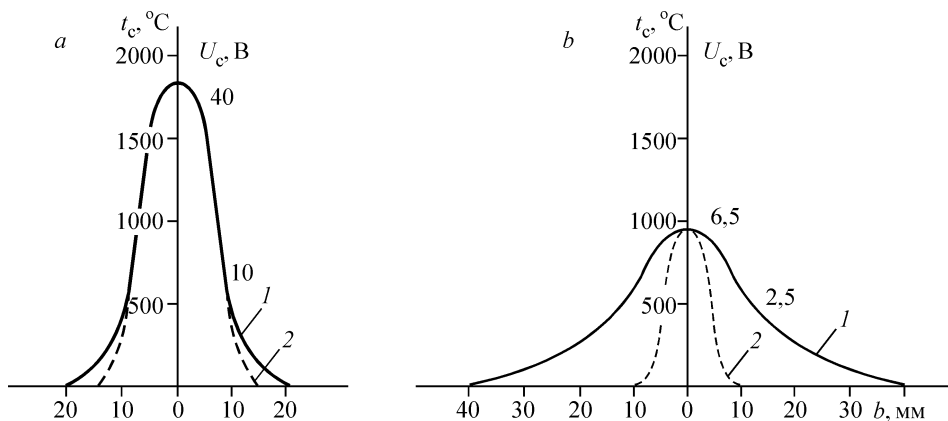


Рис. 2. Форма кривой температуры (1) и потенциала (2) по сечению плазменной струи при  $l = 35$  мм (а), 85 мм (б).

$$R_d = 16,5 \text{ кОм}, U_{пл} = 240 \text{ В}, I_{пл} = 50 \text{ А}.$$

Следовательно, по мере удаления от сопла плазматрона и остывания плазменная струя “вырождается” в обычную тепловую струю.

Таким образом, определение температуры с помощью измерения потенциала струи допустимо начиная с некоторого расстояния (температуры). Преимуществом такого метода измерения температуры является безынерционность.

С помощью измерения потенциала можно найти область невырожденной плазменной струи, т. е. ту границу, за которой плазменная, т. е. содержащая заряженные частицы, струя превращается в обычную тепловую.

Приведенные примеры дают возможность полагать, что метод диагностики плазменных струй с помощью пассивного электрического зонда будет играть определенную роль в процессах исследования струй низкотемпературной плазмы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гинзбург Б.И., Поляков С.П. и др. Влияние присадок на свойства плазменных струй высоких давлений // Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы. — Алма-Ата, 1970. — С. 215 – 218.
2. Яковлев Е.А., Дахно Л.А. Исследование потенциала плазменной струи // Теплофизика высоких температур. — 1989. — Т. 27, № 4. — С. 830.
3. Яковлев Е.А. Электрофизические свойства плазменных струй. — Караганда, Изд. Карагандинский ЦНТИ, 1977. — 22 с.
4. Фялков Б.С., Щербаков Н.Д., Плицын В.Т. Распределение потенциала в углеводородных пламенах // ФГВ. — 1978. — № 3. — С. 87 – 90.

Статья поступила в редакцию 14 июля 1999 г.