



## ОБОБЩЕНИЕ ФОРМУЛЫ К. К. ХРЕНОВА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ СВАРОЧНОЙ ДУГИ

И. В. ПЕНТЕГОВ, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

С помощью принципа минимума дуги Штеенбека получены формулы для определения температуры плазмы сварочной дуги как функции давления в плазме. Показано, что при очень больших давлениях формула К. К. Хренова становится точной, а при низких давлениях справедлива уточненная формула, дающая уменьшение температуры и увеличение степени ионизации плазмы при снижении давления в плазме дуги.

*Ключевые слова:* сварочная дуга, температура плазмы, давление в плазме, расчет

В 1949 г. была опубликована статья академика К. К. Хренова [1], в которой он, используя принцип минимума дуги Штеенбека [2], впервые вывел формулу для определения температуры плазмы электрической дуги, содержащую только универсальные физические постоянные. Формула Хренова вошла во все учебники благодаря своей предельной простоте. Однако решение, полученное им, из-за принятых допущений не учитывает влияние давления в плазме на температуру плазмы дуги.

Полученные в статье результаты справедливы не только для обычных дуг при атмосферном давлении, но и для дуг пониженного давления ( $10^2 \dots 10^4$  Па), используемых в различных технологиях напыления и нанесения покрытий, а также для дуг высокого давления порядка  $10^7 \dots 10^8$  Па, наблюдающихся при подводной сварке и в дуговых лампах высокого давления.

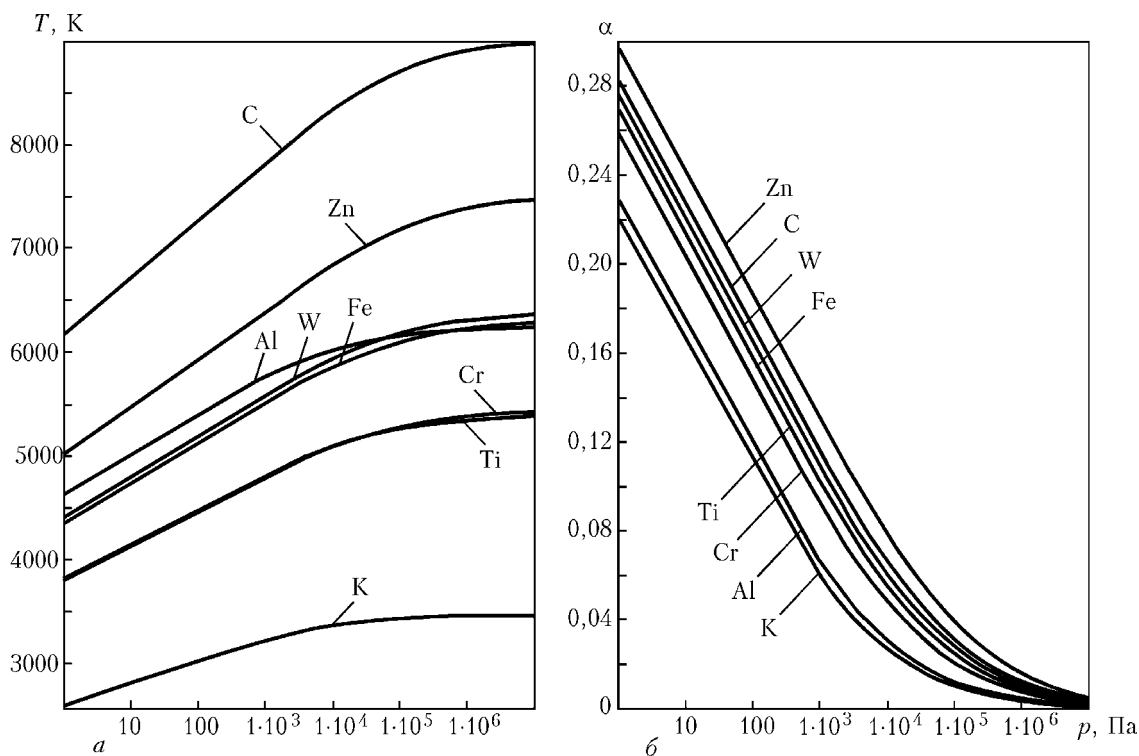
Уравнение Саха для равновесной плазмы в полной форме [3] при однократной ионизации паров металла и газов в столбе дуги имеет вид

$$\frac{\alpha(T, p)^2}{1 - \alpha(T, p)^2} = \left( \frac{2\pi m_e}{h^2} \right)^{3/2} \frac{a^2}{p} (kT)^{5/2} \exp\left(-\frac{eU_i}{kT}\right), \quad (1)$$

где  $\alpha$  — степень ионизации плазмы;  $T$  — температура плазмы, К;  $p$  — давление в плазме, Па;  $m_e$  — масса электрона, равная  $9,1095 \cdot 10^{-31}$  кг;  $h$  — постоянная Планка, равная  $6,626176 \cdot 10^{-34}$  Дж·с;  $a = \sqrt{2g_i/g_a}$ ;  $g_i/g_a$  — отношения статистических весов ионов и атомов, различные для разных металлов, см. таблицу (более подробные таблицы этих величин можно найти в работах [4, 5]);  $k$  — постоянная Больцмана, равная  $1,3806 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;  $U_i$  — потенциал первой ионизации паров металла, В;  $e$  — заряд электрона, равный  $1,6022 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Рассмотрим каналовую модель цилиндрического столба дуги радиуса  $R_0$ . Столб дуги находится в состоянии теплового равновесия. Выделяемое в дуге тепло отводится с поверхности дуги излучением. При напряженности электрического поля в столбе дуги  $E$  и токе дуги  $I$  уравнение баланса мощности для единицы длины столба дуги можно записать в виде

$$IE = 2\pi R_0 \beta \sigma_b T^4, \quad (2)$$



Зависимость температуры (а) и степени ионизации (б) плазмы дуги, горящей в парах различных металлов, от давления (каналовая модель)



**Параметры некоторых химических элементов**

Параметр	C	Al	K	Ti	Cr	Fe	Zr	W
$U_i$ , В	11,26	7,8	4,34	6,8	6,74	7,87	6,92	7,98
$a$ — коэффициент	1,155	0,577	1	1,633	1,309	1,549	1,633	1,549
$g_{ea} \cdot 10^{20}$ , м <sup>2</sup>	50	100	300	50	35	35	50	35

где  $\beta$  — степень черноты плазмы, равная 0,55...0,65;  $\sigma_B$  — постоянная Стефана–Больцмана, равная  $5,6687 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>). В то же время для канальной модели дуги при плотности тока  $j$ , постоянной по сечению дуги,

$$I = j\pi R_0^2 \tag{3}$$

Здесь плотность тока  $j$  в основном обусловлена электронной составляющей плотности тока, равной [4]:

$$j = en_e b_e E, \tag{4}$$

где  $n_e$  — концентрация электронов в плазме;  $b_e$  — подвижность электронов, равная  $b_e = (ae\lambda_e)/m_e v_e$ ; для электронов  $a = 1$ ;  $v_e$  — среднеквадратичная тепловая скорость электронов  $v_e = \sqrt{3kT/m_e}$ .

В выражении (4) длина свободного пробега электрона для дуг высокого давления при малых степенях ионизации  $\alpha$  принимается обычно равной  $\lambda_e = 1/ng_{ea}$ , где  $n$  — первоначальная концентрация неионизированных паров металла;  $g_{ea}$  — сечение столкновения электронов с нейтральными атомами (сечение Рамзауэра). Для металлов, применяемых при сварке, значения  $g_{ea}$  лежат в широком интервале ( $28 \dots 300$ )  $\cdot 10^{-20}$  м<sup>2</sup> (ориентировочные значения  $g_{ea}$  приведены в таблице). Для дуг низкого давления, когда степень ионизации очень высока, уже нельзя не учитывать столкновения электронов с ионами. Поэтому формулу для длины свободного пробега следует записать в виде

$$\lambda_e = \frac{1}{n_a g_{ea} + n_i g_{ei}} = \frac{1}{ng_{ea}(1 + \alpha k_g)} \tag{5}$$

Здесь  $n_a = n(1 - \alpha)$  — концентрация нейтральных молекул паров металла в плазме;  $n_i = \alpha n$  — концентрация ионов паров металла в плазме;  $g_{ei}$  — сечение столкновения электронов с ионами, коэффициент  $k_g = g_{ei}/g_{ea} - 1$ .

Теория эффективных сечений столкновений электронов с ионами [3, 6] пока не дает удовлетворительного совпадения с опытными данными, в существующих методиках взаимодействие налетающего электрона с ионом даже при учете электронного экранирования рассматривается как чисто кулоновское. На самом деле при наличии электронного экранирования это взаимодействие мало отличается от взаимодействия электрона с нейтральным атомом, у которого количество валентных электронов уменьшено на единицу (однократная ионизация) или на несколько единиц (многократная ионизация). Согласно данным работы [3] сечения Рамзауэра  $g_{ea}$  для различных атомов увеличиваются приблизительно в 2 раза при уменьшении валентных электронов на единицу. Поэтому можно считать, что в то же число раз увеличивается сечение столкновения электронов с ионами: при однократной ионизации  $g_{ei}/g_{ea} = 2$ . Поскольку количество многократно ионизированных атомов по сравнению с числом однократно ионизированных атомов в низкотемпературной плазме мало, то при подсчете коэффициента  $k_g$  можно принимать значение  $g_{ei}/g_{ea} = 2$ , при этом  $k_g = 1$ . Это значение коэффициента  $k_g$  дает наилучшее совпадение с экспериментальными данными [7–12].

Исключая  $R_0$  из уравнений (2) и (3), находим

$$\left( \frac{Ie^2}{4\pi\beta^2\sigma_B^2 g_{ea} \sqrt{3km_e}} \right) E^3 = T^{17/2} \left( k_g + \frac{1}{\alpha(T, p)} \right) \tag{6}$$

Formulae to determine temperature of the welding arc plasma as a function of pressure in the plasma have been derived using the Steenbeck principle of the arc minimum. It is shown that the K.K.Khrenov formula is accurate for a very high pressure, whereas for low pressure the refined formula is valid, yielding decrease in temperature and increase in the degree of plasma ionisation with decrease in pressure in the arc plasma.

Принцип минимума дуги, сформулированный Штеенбеком [2], заключается в том, что при фиксированных  $I$  и  $p$  дуга стремится обеспечить минимально возможное значение напряженности электрического поля  $E$  в столбе дуги, при котором выполняется требование  $\partial E/\partial T = 0$ .

Дифференцируя правую часть уравнения (6) по  $T$  при  $p = \text{const}$  и приравнявая производную нулю, после преобразований при  $k_g = 1$  получаем уравнение

$$\left( \frac{eU_i}{kT} + \frac{5}{2} \right) [1 - \alpha(T, p)] = 17. \tag{7}$$

Формула (7) позволяет выразить  $p$  как функцию от  $T$  в явном виде. При  $\alpha \rightarrow 0$  приходим к известной формуле К. К. Хренова [1, 13], в которой температура плазмы не зависит от давления:

$$T = 2eU_i/29k \approx 800U_i, \tag{8}$$

Полученные зависимости  $T(p)$  для различных металлов приведены на рисунке. Под давлением  $p$  подразумевается суммарное давление в плазме, состоящее из давления среды  $p_0$  и избыточного электромагнитного давления в дуге  $p_{эм}$ , обусловленного электромагнитными силами. Значения  $U_i$  и  $a$  для различных металлов, использовавшиеся при расчетах, приведены в таблице.

После определения  $T(p)$  можно получить зависимости коэффициента ионизации  $\alpha$  от давления для плазмы паров различных металлов (рисунок, б). Минимальные (граничные) давления, при которых еще справедливы полученные кривые, определяются условиями сохранения квазизотермичности плазмы столба дуги (и сохранения самого столба дуги, как такового). Эти условия различных для разных металлов, область граничных давлений носит весьма размытый характер и находится в интервале 5...100 Па.

1. Хренов К. К. Температура сварочной дуги // Автоген. дело. — 1949. — № 8. — С. 14–15.
2. Steenbeck M. Eine Prufung des Minimumprinzips fur termische Bogensaulen an Hand neuer Messergebnisse, Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus den Siemens-Werken. — 1940. — 19, № 1. — S. 59.
3. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. — М.: Физматгиз, 1971. — 543 с.
4. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга. — М.: Машиностроение, 1970. — 335 с.
5. Схемотехника инверторных источников питания для дуговой сварки / Е. Н. Верещаго, В. Ф. Квасницкий, Л. Н. Мирошниченко, И. В. Пентегов. — Николаев: Укр. гос. мор. техн. ун-т. — 2000. — 283 с.
6. Митчнер М., Кругер Ч. Частично ионизированные газы. — М.: Мир, 1976. — 496 с.
7. Семенова О. П. К вопросу о механизме дугового разряда // Докл. АН СССР. — 1946. — 51, № 9. — С. 683–686.
8. Броун И. Я., Погудин-Алексеев Г. И. Термическая теория электросварочной дуги. — М.: Машгиз, 1951. — 124 с.
9. Hirschfeld G. Die Lichtbogentemperatur der Schweißelectroden // ZIS-Mitt. — Halle. — 1961. — 3, № 6. — S. 432–435.
10. Латин И. Л., Самсонов В. И. Температура дуги с плавящимся электродом при сварке без защиты // Автомат. сварка. — 1975. — № 3. — С. 10–11.
11. Kobajashi T., Kuwana T. The influence of shield gas composition on the arc temperature in gas-shielded metal-arc welding // J. Jap. Welding Soc. 1970. — 39, № 8. — S. 785–791.
12. Schellhase M. Der Schweißlichtbogen-ein technologisches Werkzeug. — Berlin: VEB Verlag Technik, 1985. — 236 S.
13. Хренов К. К. Электрическая сварочная дуга. — Киев–Москва: Машгиз, 1949. — 204 с.

Поступила в редакцию 09.02.2004, в окончательном виде 01.06.2004