

## РАСЧЕТ СКОРОСТИ ПЛАВЛЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАГРЕТЫХ ПРОВОЛОК РАЗЛИЧНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

**Варуха Е.Н., Карченко О.И., Коробцов А.С.**

*(Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону, Россия)*

**Ключевые слова:** сварка, плавящийся электрод, углекислый газ, обратная полярность, подогрев электрода, расчет скорости плавления электрода, эмпирическая формула, точность вычислений.

Создание системы автоматического управления сварочными процессами должно базироваться на достаточно точных математических моделях элементах процесса и в том числе на эмпирических моделях.

Известна эмпирическая формула [1], позволявшая до настоящего времени наиболее простым образом описывать зависимость скорости плавления (подачи) сварочной проволоки –  $V$  (кг/с), далее электрода, от параметров процесса сварки в углекислом газе током обратной полярности:

$$V = AI + BI^2d_3^{-1} + CI^2d_3^{-2}h, \quad (1)$$

где  $I$ ,  $d_3$  и  $h$  – ток сварки, диаметр и вылет электрода;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – постоянные эмпирические коэффициенты.

Недостатком формулы (1) является то, что величина входящих в нее эмпирических коэффициентов однозначно получена экспериментально только для одних конкретных условий сварки. Например, в работе [1] величины коэффициентов были получены только для электрода Св-08Г2С при условии равенства его температуры температуре окружающей среды –  $T_0=20^\circ\text{C}$ . Чтобы определить новые значения коэффициентов для других температур предварительного подогрева  $T_n$  и других марок электрода каждый раз необходимо проводить многочисленные трудоемкие эксперименты.

Поэтому целью настоящей работы явилось получение эмпирической формулы для расчета скорости плавления предварительно нагретых проволок различного химического состава при дуговой сварке в углекислом газе.

Для определения исследуемых в настоящей работе зависимостей в качестве исходных данных были использованы данные расчетов скоростей подачи  $V$  электрода, полученные в работе [2] по численной модели зависимости  $V=f(I, d_3, h, T_n)$  для сварочных проволок Св-08Г2С, Св-06Х19Н9Т и Св-08. Обработка этих данных проводилась с помощью компьютерной программы Statistica, предоставляющая широкие возможности по описанию исследуемых зависимостей функциями или полиномами различного вида и определения входящих в них коэффициентов с помощью метода наименьших квадратов.

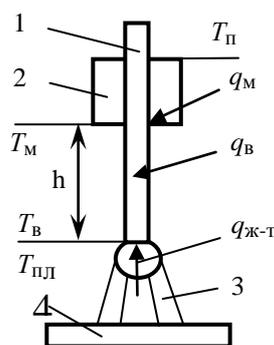


Рисунок 1 - Схема источников нагрева, определяющих плавление электрода  
1 - электрод; 2- токоподводящий наконечник; 3 - дуга; 4 - изделие.

Вид эмпирической формулы (1) аналогичен виду уравнения баланса мощностей (2), определяющих нагрев и плавление электрода (рис.1):

$$V(H_{пл} - H_{п}) = q_{м} + q_{ж-т} + q_{в}, \quad (2)$$

где  $q_{м}$  – часть мощности, выделяющейся в контактом переходе "токоподводящий наконечник – электрод" и поступающая на нагрев электрода от температуры электрода -  $T_{п}$  на входе в токоподводящий наконечник до температуры -  $T_{м}$  на выходе из токоподводящего наконечника, Вт;  $q_{в}$  – мощность, определяемая нагревом вылета проходящим током в соответствии с законом Джоуля-Ленца и поступающая на нагрев электрода от температуры  $T_{м}$  до температуры –  $T_{в}$ , Вт;  $q_{ж-т}$  – мощность, обусловленная тепловым потоком через границу плавления из жидкого металла в твердый и определяющая нагрев электрода от температуры  $T_{в}$  до температуры плавления –  $T_{пл}$  и перевод электродного металла из твердого состояния в жидкое при температуре плавления, Вт;  $H_{пл}$  - энтальпия жидкого электродного металла при температуре плавления.

В свою очередь,

$$q_{м} = U_{м} \cdot I, \quad (3)$$

где  $U_{м}$  – часть падения напряжения в контакте "токоподводящий наконечник – электрод", определяющая тепловой поток  $q_{м}$ .

Мощность

$$q_{в} = I^2 \cdot R_{в}, \quad (4)$$

где  $R_{в}$  – интегральное сопротивление вылета электрода, (Ом).

$$q_{ж-т} = q_{н} + q_{L}, \quad (5)$$

где  $q_{н}$  - часть мощности  $q_{ж-т}$ , идущая на нагрев электрода от  $T_{в}$  до  $T_{пл}$ , Вт;  
 $q_{L}$  – часть мощности  $q_{ж-т}$ , идущая на перевод металла из твердого состояния в жидкое при постоянной температуре  $T_{пл}$ , равная:

$$q_{L} = V \cdot H_{L}, \quad (6)$$

где  $H_{L}$  – скрытая теплота плавления.

По данным численной модели расчета скорости плавления  $V$  [2]:

$$q_{н} = I \cdot (U'_{аэф} + k_{к} \cdot I \cdot d_{э}^{-1}) - k_2 \cdot V, \quad (7)$$

где  $U'_{\text{эф}}$  – часть эффективного анодного падения напряжения  $U_{\text{эф}}$ , определяющая мощность, которая идет на нагрев электродного металла от  $T_{\text{в}}$  до температуры отделившейся от электрода капли –  $T_{\text{к}}$ . Другая часть  $U_{\text{эф}}$  определяет мощность, расходуемую на потери энергии за счет излучения и испарения с поверхности формирующейся на торце электрода капли расплавленного металла.  $k_{\text{к}}$  – постоянная, определяемая тепловыделением в капле расплавленного металла за цикл ее формирования от нагрева проходящим током, Ом·м;  $k_2$  – постоянная, равная мощности, уносимой с электрода отрывающейся каплей.

Обработка исходных данных с использованием (2) позволила установить общий вид эмпирического уравнения для расчета скорости плавления электрода:

$$V = \left\{ \left[ (U_{\text{м}} + U'_{\text{эф}}) / \Delta H - A + (k_{\text{к}} / \Delta H - B) \cdot I / d_3 \right] \cdot I \cdot \exp(-\theta h / d_3) + (AI + BI^2 / d_3 + CI^2 h / d_3^2) \right\} \quad (8)$$

где  $\Delta H = H_{\text{пл}} - H_{\text{п}} + k_2 - H_L$  . (9)

Величина констант, входящих в уравнения (8) и (9), для проволок разных марок представлены в табл. 1.

Таблица 1 - Константы, входящие в уравнения (8) и (9)

Константа	Величина константы [2]		
	Св-08	Св-08Г2С	Св-06Х19Н9Т
$H_{\text{пл}}$ , кДж/кг	1367,5	1383,0	1175,8
$H_L$ , кДж/кг	270,4		283,3
$U'_{\text{эф}}$ , В	4,67		4,73
$k_{\text{к}} \cdot 10^6$ , Ом·м	4,69		5,0
$k_2$ , кДж/кг	858,3	858,0	928,2

Таблица 2 - Коэффициенты уравнений (11)-(16) для разных диапазонов температур подогрева электродов

Коэффициент	Величина коэффициента для диапазона температур подогрева проволоки					
	Св-08		Св-08Г2С [1]		Св-06Х19Н9Т	
	0÷450°C	450÷600°C	0÷450°C	450÷600°C	0÷450°C	450÷600°C
$n_1 \cdot 10^6$ , кг/(А·с)	2,417	1,763	2,400	1,934	2,509	2,330
$n_2 \cdot 10^{10}$ , кг/(А·с·°С)	4,000	1,800	6,100	1,510	9,000	1,300
$n_3 \cdot 10^{13}$ , кг/(А·с·°С <sup>2</sup> )	-2,074	0	-2,700	0	0	0
$n_4 \cdot 10^{12}$ , кгм/(А <sup>2</sup> ·с)	1,843		1,995		2,204	
$n_5 \cdot 10^{15}$ , кгм/(А <sup>2</sup> ·с·°С)	1,600		1,400		1,400	
$n_6 \cdot 10^{13}$ , кгм/(А <sup>2</sup> ·с)	5,518		6,450		8,1018	
$n_7 \cdot 10^{16}$ , кгм/(А <sup>2</sup> ·с·°С)	5,600		4,180		4,000	
$n_8$	0,765		0,465		0,284	
$n_9 \cdot 10^3$	2,000		1,260		0,200	
$u_1$ , В	0,3874		0,3016		0,1031	
$u_2 \cdot 10^5$ , В/°С	-20		-3,897		2,3147	
$u_3 \cdot 10^6$ , В/°С <sup>2</sup>	-1,4101		-1,404		-0,5584	
$c_1$ , кДж/кг·°С	0,4714		0,4490		0,4549	
$c_2 \cdot 10^4$ , кДж/(кг·°С <sup>2</sup> )	1		2		2	
$c_3 \cdot 10^7$ , кДж/(кг·°С <sup>3</sup> )	1,4453		0		-1,5563	

$$\text{В свою очередь,} \quad H_{\text{п}} = c_{\text{cp}} \cdot T_{\text{п}} \quad , \quad (10)$$

где  $c_{\text{cp}}$  – средняя удельная теплоемкость электродного металла в интервале температур от  $0^{\circ}\text{C}$  до температуры подогрева проволоки  $T_{\text{п}}$ , Дж/(кг· $^{\circ}\text{C}$ ), вычисленная для исследуемых электродов по данным работ [3, 4].

Расчетами также были установлены следующие зависимости эмпирических коэффициентов  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $\theta$  и параметра  $U_{\text{м}}$  от температуры предварительного подогрева  $T_{\text{п}}$ :

$$U_{\text{м}} = u_1 + u_2 \cdot T_{\text{п}} + u_3 \cdot T_{\text{п}}^2 \quad , \quad (11)$$

$$C_{\text{cp}} = c_1 + c_2 T_{\text{п}} + c_3 T_{\text{п}}^2 \quad , \quad (12)$$

$$A = n_1 + n_2 T_{\text{п}} + n_3 T_{\text{п}}^2 \quad , \quad (13)$$

$$B = n_4 + n_5 T_{\text{п}} \quad , \quad (14)$$

$$C = n_6 + n_7 T_{\text{п}} \quad , \quad (15)$$

$$\theta = n_8 + n_9 T_{\text{п}} \quad . \quad (16)$$

Величины коэффициентов уравнений (11)-(16), полученные с помощью метода наименьших квадратов с доверительным интервалом 0,95, представлены в табл.2.

В диапазоне температур  $T_{\text{п}}$  от  $20^{\circ}\text{C}$  до  $600^{\circ}\text{C}$  установлена высокая сходимость расчетных данных по формуле (8) с величинами, полученными по численной модели  $V=f(I, d_3, h)$ . В самом общем случае при вылетах проволоки  $h \geq 6$  мм их расхождение не превышает  $\pm 1,5$  %.

**Заключение.** Результаты настоящей работы показали, что полученная эмпирическая формула обеспечивает практически равную точность расчетов скорости плавления предварительно нагретых электродов Св-08, Св-08Г2С и Св-06Х19Н9Т с расчетами по ранее верифицированной численной модели плавления проволоки при сварке в углекислом газе на токе обратной полярности.

#### Перечень ссылок

- 1.Варуха Е.Н., Докторский Р.Я. Расчет скорости плавления электрода при механизированной сварке// Сварочное производство.- 1991.- № 6.- С.33-35.
- 2.Варуха, Е.Н. Нагрев и плавление электрода при дуговой механизированной сварке: дис. д-ра техн. наук. — Ростов-на-Дону, 1998. — С. 294.
- 3.Казанцев Е.И. Промышленные печи: Справочн. руководство для расчетов и проектирования. - М.: Металлургия, 1975.- 368с.
- 4.Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: Справоч-ник / Под ред. Б.Е. Неймарк. - М.-Л.: Энергия, 1967.- 471 с.