

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА ОТ СВАРОЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

Л.С. ШУМАНСКАЯ, Е.С. ГОЛУБЦОВА, д-р техн. наук  
Белорусский национальный технический университет

*Проведен статистический анализ скорости плавления электродов с основным покрытием с разбрызгиванием и без разбрызгивания от плотности тока при ручной дуговой сварке, а также влияние марки электрода и силы тока на коэффициенты расплавления и наплавки.*

**Ключевые слова:** *ручная дуговая сварка, набрызгивание электродного металла, потери электродного металла, скорость плавления электродов, плотность тока, статистическая обработка результатов эксперимента.*

## STUDY OF ELECTRODE METAL LOSSES FROM WELDING AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF ELECTRODES UNDER ARC WELDING

L.S. SHUMANSKAYA, E.S. GOLOUBTSOVA, Dr. of Engineering Sciences  
Belarusian National Technical University

*It is carried out the statistical analysis of the melting rate of electrodes with the main coating with and without splashing from the current density during manual arc welding, as well as the influence of the electrode brand and the current strength on the melting and surfacing coefficients.*

**Keywords:** *arc welding, pattering of electrode metal, loss of electrode metal, electrode melting rate, current density, statistical processing of experimental results.*

При ручной дуговой сварке происходит набрызгивание (иногда даже весьма существенное) электродного металла на поверхность свариваемых деталей. При плавлении электродов выпадают крупные фракции пылевидного шлака, которые осаждаются рядом со швом («сварочная пыль»). Это приводит к ухудшению эстетичного

вида готовых изделий и, что, особенно нежелательно, для поверхностей трения или которые будут подвержены окрашиванию.

Потери электродного металла возникают при сварке в нижнем положении повышенными токами (190, 180 и 90 А), а разбрызгивание полностью подавляется при токе 130, 65 А как в верхнем, так и в нижнем положении сварочной ванны. Экспериментально установлено, что с увеличением сварочного тока увеличивается масса «сварочной пыли», а также коэффициент потерь покрытия  $\psi_n$  (отношение массы пылевидной фракции к расплавленной массе покрытия). Наблюдается также зависимость между  $\psi_n$  и суммарным переходом металла стержня в шов ( $\eta_\mu$ ) [1]. Средние значения опытных данных приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость  $\psi_n$  и  $\eta_\mu$  от сварочного тока

Сварочный ток, А	150	160	170	180	190
$\eta_\mu$ , %	96,6	96,0	95,4	90,0	89,4
$\psi_n$ , %	1,7	1,9	2,2	5,4	7,6

Зависимость  $\eta_\mu$  от  $I$  (А) может быть выражена линейным уравнением:

$$y_1 = \eta_\mu, \% = 131,1 - 0,221x, \quad (1)$$

где  $x$  – величина сварочного тока  $I$ , А.

Это уравнение получено из уравнения прямой, представленной в виде [2]:

$$y - \bar{y} = a(x - \bar{x}), \quad (2)$$

параметр  $a$  которой определяется по формуле:

$$a = \frac{\bar{x}\bar{y} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\bar{x}^2 - (\bar{x})^2}, \quad (3)$$

$$\text{где } \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k, \quad \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y_k, \quad \bar{x}^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k^2 \cdot \bar{x}\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k y_k.$$

Здесь  $\bar{x}$  – среднее значение силы тока;  $\bar{y}$  – среднее значение  $\eta_\mu$  или  $\psi_n$ ,  $N$  – число опытов (у нас  $N = 5$ );  $\bar{x}\bar{y}$  – среднее значение произведений  $x_k y_k$ ;  $k$  – номер опыта.

Уравнение (1) адекватно описывает зависимость  $\eta_\mu$  от силы тока ( $x$ ), т.к. критерий Фишера  $F_p = S_{\text{ад}}^2 / N - m$ , где  $S_{\text{ад}}^2$  – дисперсия адекватности, представляемый разницей фактических и экспериментальных значений отклика ( $y$ ), оказался равным  $1,201/22 = < 1$ , т.е. адекватным при всех уровнях доверия  $x$ .

Зависимость  $y_2 = \psi_n$ , % от силы тока адекватно описывается уравнением параболы  $y = ax^2 + bx + c$  в виде

$$y_2 = 0,493u^2 + 1,53u + 2,774, \quad (4)$$

где  $u = \left( \frac{x - \bar{x}}{h} \right)$ ,  $h$  – шаг переменный (в нашем случае  $h = 10$  А).

Коэффициент уравнения (2) определяется по следующим формулам [2]:

$$a = \frac{1}{3H_2} \left[ 3 \sum_{k=1}^N y_k (k - M)^2 - \frac{N^2 - 1}{4} \sum_{k=1}^N y_k \right]; \quad (5)$$

$$b_1 = \frac{1}{H_1} \sum_{k=1}^N y_k (k - M), \quad c_1 = \bar{y} - \frac{H_1}{N} a_1; \quad (6)$$

$$H_1 = N(N^2 - 1)/12; \quad H_2 = \frac{N(N^2 - 1)(N^2 - 4)}{180}. \quad (7)$$

Уравнение (4) также адекватно описывает зависимость  $y_2 = \psi_n$  от силы тока ( $F_p = 2,7 < F_{\text{кр}} = 6,94$  при  $\alpha = 0,05, f_1 = 2$  и  $f_2 = 4$ ).

Характер переноса электродного металла и определяющие его факторы исследовали в работе [3]. Согласно данным [3] наибольшее значение в этом процессе имеет давление газов, расширяющихся при нагреве и плавлении электродов внутри капель, а затем силы поверхностного натяжения, втягивающие каплю в сварочную

ванну, когда капля приобретает определенную температуру и подвижность.

Косвенно это подтверждают результаты следующего эксперимента при исследовании зависимости скорости плавления электродов ( $v_{пл}$ , см/с) с основным покрытием от плотности тока при плавлении электродов без разбрызгивания ( $x_1 = -1$ ) и с разбрызгиванием ( $x_1 = +1$ ). Вторым фактором были плотность сварочного тока ( $x_2 = -1, 10 \text{ А/мм}^2$ ;  $x_2 = +1, 20 \text{ А/мм}^2$ ). В качестве параметра оптимизации ( $y_3$ ) была выбрана скорость плавления  $v_{пл}$ , см/с.

Для определения ошибки опытов и дисперсии параметра оптимизации в каждой строке матрицы  $u$  проводили три параллельных опыта ( $N_u = 3$ ).

Для проведения эксперимента был выбран полнофакторный план  $N = 2^2$ , где  $N$  – число опытов (строк) в матрице плана, а степень 2 – число факторов. Во избежание влияния систематических ошибок опыты проводили в случайном порядке. Матрица плана и результаты эксперимента (средние значения) приведены в таблице 2, где  $x_1$  и  $x_2$  – кодированные уровни факторов.

Таблица 2 – Матрица плана  $N = 2^2$  и результаты эксперимента

№	$x_1$	$x_2$	$x_1x_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$
1	–	–	+	0,31	9,2	9,5	0,40
2	+	–	–	0,37	9,2	9,5	0,40
3	–	+	–	0,48	8,2	8,1	0,45
4	+	+	+	0,50	2,3	8,1	0,44
$\Sigma$	0,08	0,30	–0,04	1,66			

Статистическую обработку результатов эксперимента проводили по методике [4]. Коэффициенты уравнения регрессии определяли по формуле:

$$b_i = \frac{\sum_{k=1}^N x_i y_i}{N}, \quad (9)$$

где  $i = 0, 1, 2 \dots; k$  – номер фактора.

Значимость коэффициентов уравнения определяли с помощью доверительного интервала:

$$\Delta b_i = \pm t_{\alpha, f} S_{b_i}, \quad (10)$$

где  $t$  – табличный критерий Стьюдента,  $\alpha$  – уровень доверия (обычно  $\alpha = 0,05$ ),  $f$  – число степеней свободы, равное  $N(n - 1)$ ;  $S_{b_i}$  – средняя квадратическая ошибка в определении коэффициента  $b_i$ . Если  $\Delta b_i \leq b_i$  (по абсолютной величине), то коэффициент значим, т.е.  $b_i \neq 0$ . Если же  $\Delta b_i > b_i$ , то  $b_i = 0$ .

Значение  $S_{b_i}$  вычисляли по формуле:

$$S_{b_i} = \sqrt{S_{b_i}^2} = \sqrt{\frac{S_y^2}{N \cdot n}}, \quad (11)$$

где  $S_y^2$  – дисперсия параметра оптимизации, определяемая по формуле:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^N \sum_1^n (y_u - \bar{y}_u)^2}{N(n-1)}. \quad (12)$$

Здесь  $\bar{y}_u$  – среднее значение параметра оптимизации в  $u$ -й строке. В нашем случае  $S_y^2 = 4,3 \cdot 10^{-4}$ .

После указанных расчетов получили уравнение, устанавливающее связь между скоростью плавления ( $v_{\text{пл}}$ ), типом плавления электрода ( $x_1$ ) и плотностью тока ( $x_2$ ) в виде полинома

$$y_3 = v_{\text{пл}} = 0,415 + 0,02x_1 + 0,075x_2. \quad (13)$$

Проверка адекватности этого уравнения по критерию  $F$  подтвердила эту гипотезу, поскольку дисперсия адекватности  $S_{\text{ад}}^2 = 1,2 \cdot 10^{-3}$  и  $F = 2,79 < F_{\text{кр}} = 5,3$  при  $\alpha = 0,05$ ;  $f_1 = 1$  и  $f_2 = 8$ .

Анализ уравнения (13) показывает, что наибольшее влияние на скорость плавления оказывает плотность тока ( $x_2$ ): чем она выше, тем больше скорость плавления. При плотности тока 10–15 А/мм<sup>2</sup>

(125–170 А для электродов диаметром 4 мм) плавление электрода происходит без разбрызгивания электродного металла, что способствует приращению массы шва за счет металлических добавок покрытия. При этом в капле постепенно повышается давление газов до некоторого критического значения, а силы поверхностного натяжения втягивают каплю в сварочную ванну. Взаимодействие давления газов и сил поверхностного натяжения обеспечивают переход металла в сварочную ванну.

При плотности тока  $15 \text{ А/мм}^2$  (170 А) и более зависимость между скоростью плавления электрода и давлением газа в капле нарушается: часто давление газов разрушает металлическую оболочку капли, изменение положения капли не согласуется с силами поверхностного натяжения и происходит выброс части металла без участия межфазных взаимодействий.

Дополнительно оценивалось влияние марки электрода (ТМ-21У и УОНИ-13/45) и силы тока на коэффициенты расплавления  $\alpha_p$  и наплавки  $\alpha_n$ , а также скорость плавления электродов (соответственно  $y_4$ ,  $y_5$  и  $y_6$ ) в нижнем положении сварочной ванны. Эксперимент проводился при плавлении двенадцати электродов (источник питания ВДУ-306, постоянный ток, обратная полярность). Результаты определения указанных параметров, а также план эксперимента приведены в таблице 2, в которой –  $y_4$ ,  $y_5$  и  $y_6$  – средние значения трех параллельных опытов в каждой строке. Обработку результатов эксперимента проводили согласно методике [4]. Получены следующие адекватные уравнения:

$$y_4 = \alpha_p = 8,73 - 0,48x_3; \quad (14)$$

$$y_5 = \alpha_n = 8,8 - 0,70x_3; \quad (15)$$

$$y_6 = v_{\text{пл}} = 0,42 + 0,023x_3. \quad (16)$$

Из этих уравнений видно, что марка электрода в данном случае не оказывает существенного влияния на  $\alpha_p$ ,  $\alpha_n$  и  $v_{\text{пл}}$ . Решающее влияние на эти показатели оказывает сила тока ( $x_3$ ). Коэффициенты расплавления ( $y_4$ ) и наплавки ( $y_5$ ) с ростом силы тока уменьшаются, а скорость плавления ( $y_6$ ) – увеличивается.

Результаты этих экспериментов подтверждают, что потери электродного металла возникают при сварке в нижнем положении повышенными токами.

### Список литературы

1. **Регулирование** разбрызгивания электродного металла при ручной дуговой сварке / И.Н. Ворновицкий [и др.] // Сварочное производство. – 2006. – № 9. – С. 22–24.
2. **Румшинский, Л.З.** Математическая обработка результатов эксперимента / Л.З. Румшинский. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
3. **Мазень, А.Г.** Технологические свойства сварочной дуги / А.Г. Мазень. – М.: Машиностроение, 1969. – 178 с.
4. **Жарский, И.М.** Планирование и организация эксперимента / И.М. Жарский, Б.А. Каледин, И.Ф. Кузьмицкий. – Минск: Изд-во БГТУ, 2003. – 179 с.

### References

1. **Regulirovanie razbryzgivaniya elektrodnoho metalla pri ruchnoj dugovoj svarke** [Spatter control of electrode metal in manual arc welding] / I.N. Vornovickij [et.al] // *Svarochnoe proizvodstvo = Welding production*. – 2006. – No. 9. – P. 22–24.
2. **Rumshinskij, L.Z.** *Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta* [Mathematical processing of experimental results] / L.Z. Rumshinskij. – Moscow: Nauka Publ., 1971. – 192 p.
3. **Mazen', A.G.** *Tekhnologicheskie svojstva svarochnoj dugi* [Technological properties of the welding arc] / A.G. Mazen'. – Moscow: Mashinostroenie Publ., 1969. – 178 p.
4. **Zharskij, I.M.** *Planirovanie i organizaciya eksperimenta* [Experiment planning and organization] / I.M. Zharskij, B.A. Kaledin, I.F. Kuz'mickij. Minsk: Izdatel'stvo BGTU Publ., 2003. – 179 p.

Поступила 20.05.2020

Received 20.05.2020