

УДК 621.791.75.042

Кошевой А. Д., Макаренко Н. А., Пресняков В. А., Кошечая А. А., Матвиенко С. С.

### ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ НАПЛАВКИ ПРЕССОВОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ГОРЯЧЕЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛА САМОЗАЩИТНОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ

Применение оптимальных режимов наплавки позволяет значительно снизить расход сварочных материалов и повысить качество износостойкого слоя [1]. Показателем качества защиты металла от взаимодействия его с атмосферой воздуха на различных стадиях дугового процесса является величина диапазона напряжения на дуге, при которой в наплавленном металле не образуются поры [2]. Большое значение на качество наплавленного металла оказывают также сварочный ток, скорость сварки, вылет электрода [3, 4]. Следовательно, изучение характеристик плавления самозащитной порошковой проволоки с целью оптимизации режимов наплавки является актуальной задачей.

Целью данной работы является определение оптимальных режимов наплавки прессового инструмента.

Определяли следующие характеристики плавления самозащитной порошковой проволоки: коэффициент расплавления  $\alpha_p$ , коэффициент наплавки  $\alpha_H$ , коэффициент потерь на разбрызгивание  $\Psi_{PЗ}$ , коэффициент потерь на угар и разбрызгивание  $\Psi$ , коэффициент выхода наплавленного металла  $k_B$ .

Указанные коэффициенты определяли по известным зависимостям.

Наплавку производили на пластины из стали Ст 3 размером  $12 \times 120 \times 250$  мм. Пластины до и после наплавки взвешивались на технических весах типа ВЛТ-1 с точностью до 0,1 г, взвешивание брызг – на технических типа ВЛТ – 200 с точностью до 0,01 г. Для полного улавливания брызг наплавку производили в специальном медном коробке.

На фиксированном режиме наплавка выполнялась три раза. По результатам средних значений замеров строились уравнения регрессии второго порядка:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 \quad (1)$$

В качестве плана эксперимента был выбран симметричный некомпозиционный план Бокса-Бенкера.

В табл. 1 приведены выбранные факторы и интервалы их варьирования.

Таблица 1

Факторы и интервалы их варьирования

| Интервал варьирования и уровень факторов | $I_{св.}, A$ | $U_0, B$ | $V_{св.}$ |
|--|--------------|----------|-----------|
| Нулевой уровень $X_i = 0$                | 275          | 27       | 22        |
| Интервал варьирования $d_i$              | 75           | 5        | 4         |
| Верхний уровень $X_i = +1$               | 350          | 32       | 26        |
| Нижний уровень $X_i = -1$                | 200          | 22       | 18        |
| Кодовое обозначение переменных           | $X_1$        | $X_2$    | $X_3$     |

С помощью выбранного планирования строили квадратичную модель, где  $K = 3$ . Коэффициент модели рассчитывали по формулам:

$$b_0 = \bar{Y}_0 = \frac{\sum_{u=1}^{N_0} Y_{ou}}{N_0}; \quad b_i = \sum_{u=1}^N x_{iu} Y_u; \quad b_{ij} = D_1 \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ij} Y_u; \quad (2)$$

$$b_{ii} = B \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 Y_u + C_1 \sum_{j=1}^k \sum_{u=1}^n x_{ju} Y_u - \frac{\bar{Y}_0}{R},$$

где  $N$  – число опытов;

$N_0$  – число опытов в центре плана;

$U$  – номер опыта;

$i$  – номер фактора.

Для  $K = 3$  коэффициенты в (7) равны:  $A = 1/8$ ;  $B = 1/4$ ;  $D = 1/4$ ;  $C_1 = 1/16$ .

Коэффициенты регрессии, полученные по данным опытов, приведены в табл. 1.

Для оценки статистической значимости полученных коэффициентов регрессии определили их дисперсии по формулам:

$$S^2(b_0) = \frac{1}{N_0} \cdot \frac{S_y^2}{m}; \quad S^2(b_i) = A \cdot \frac{S_y^2}{m}; \quad S^2(b_{ij}) = D_1 \cdot \frac{S_y^2}{m}; \quad S^2(b_{ii}) = \left( B + \frac{1}{R^2 N_0} \right) \cdot \frac{S_y^2}{m}, \quad (3)$$

где  $S_y^2$  – дисперсия опыта;

$m$  – число параллельных опытов (в нашем случае  $m = 3$ ).

Дисперсию опыта определяли по формуле:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{U=1}^N \sum_{j=1}^m (Y_{ju} - Y_u)^2}{y_Y = N(m-1)}. \quad (4)$$

Таблица 2

Коэффициенты регрессии эксперимента

| $b_i$    | $Y_1$  | $Y_2$  | $Y_3$  | $Y_4$  | $Y_5$  |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $b_0$    | 9,300  | 10,380 | 13,900 | 8,830  | 76,300 |
| $b_1$    | 0,946  | 0,964  | 0,688  | 0,475  | -0,637 |
| $b_2$    | 0,006  | -0,844 | 6,625  | 6,687  | -5,875 |
| $b_3$    | -0,007 | 0,040  | -0,387 | -0,267 | 0,488  |
| $b_{12}$ | -0,030 | -0,563 | -0,525 | 2,425  | -2,325 |
| $b_{13}$ | -0,037 | -0,115 | 0,35   | -0,675 | -0,200 |
| $b_{23}$ | -0,022 | 0,070  | -1,075 | -0,700 | 1,105  |
| $b_{11}$ | 1,000  | 0,957  | 1,225  | 1,058  | -1,000 |
| $b_{22}$ | 0,051  | -0,303 | 2,550  | 1,288  | -2,225 |
| $b_{33}$ | -0,092 | 0,255  | -2,025 | -1,117 | 1,600  |

Доверительный интервал для коэффициентов регрессии находим по формуле:

$$\Delta b_i = t(a; y_y) \cdot S(b_i), \quad (5)$$

где  $t(a; y_y)$  – табличное значение критерия Стьюдента с  $y_y$  степенями свободы. Коэффициент считается значимым, если:

$$|b_i| > \Delta b_i. \quad (6)$$

После исключения незначимых коэффициентов проводилась проверка адекватности полученных квадратичных моделей. Дисперсия адекватности вычислялась по формуле:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N (Y_u - y_u)^2}{y_{\text{ад}} = N - n}, \quad (7)$$

где  $y_{\text{ад}} = N - n$  – дисперсия адекватности;

$n$  – число значимых коэффициентов уравнения.

Адекватность модели проверяли по критерию Фишера:

$$F^{\text{Рас}} = \frac{S_{\text{аЯ}}^2}{S_Y^2} < F_a^{\text{Таб}}; (y_{\text{ад}}; y_Y). \quad (8)$$

Если последнее неравенство выполняется, то гипотеза об адекватности принимается. Расчеты уравнений регрессии и статистический анализ по приведенным выше формулам произведён на ЭВМ.

Результаты статистического анализа сведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты статистического анализа

| Рас. вел.               | $Y_1$    | $Y_2$    | $Y_3$    | $Y_4$    | $Y_5$    |
|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $S^2(Y)$                | 0,1850   | 0,215    | 4,640    | 0,850    | 4,920    |
| $S(b_0)$                | 0,1430   | 0,155    | 0,718    | 0,307    | 0,739    |
| $S(b_i)$                | 0,0716   | 0,773    | 0,359    | 0,154    | 0,730    |
| $S(b_{ij})$             | 0,1240   | 0,134    | 0,622    | 0,266    | 0,640    |
| $S(b_{ii})$             | 0,1130   | 0,122    | 0,568    | 0,243    | 0,585    |
| $\Delta b_0$            | 0,2920   | 0,316    | 1,218    | 0,627    | 1,254    |
| $\Delta b_i$            | 0,1460   | 0,158    | 0,609    | 0,314    | 0,628    |
| $\Delta b_{ij}$         | 0,2530   | 0,274    | 1,056    | 0,543    | 1,086    |
| $\Delta b_{ii}$         | 0,2010   | 0,248    | 0,964    | 0,496    | 0,993    |
| $S_{\text{ад}}^2$       | 0,0160   | 0,083    | 3,880    | 2,040    | 3,070    |
| $y_{\text{ад}}$         | 12       | 8        | 7        | 6        | 7        |
| $F_1^{\text{Рас}}$      | 1        | 1        | 1        | 2,4      | 1        |
| $F_{0,05}^{\text{Таб}}$ | 2,09     | 2,27     | 2,34     | 2,42     | 2,34     |
| Вывод об адекватности   | адекват. | адекват. | адекват. | адекват. | адекват. |

Все уравнения оказались адекватными при  $\alpha = 0,057$ . После исключения незначимых коэффициентов уравнения регрессии имеют вид:

$$a_p = 9,3 + 0,946X_1 + X_1^2; \quad (9)$$

$$a_H = 10,38 + 0,964X_1 + 0,844X_2 - 0,563X_1X_2 + 0,957X_1^2 - 0,303X_2^2 + 0,255X_3^2; \quad (10)$$

$$y_{P3} = 8,38 + 0,475X_1^2 + 6,687X_2 + 2,425X_1X_2 - 0,675X_1X_3 - 0,7X_2X_3 + 1,058X_1^2 + \\ + 1,283X_2^2 - 1,117X_3^2; \quad (11)$$

$$y = 13,9 + 0,688X_1 + 0,625X_2 + 2,525X_1X_2 - 1,075X_2X_3 + 1,255X_1^2 + 2,55X_2^2 - 2,025X_3^2; \quad (12)$$

$$K_B = 76,3 - 0,637X_1 - 5,875X_2 - 2,325X_1X_2 + 1,105X_2X_3 - X_1^2 - 2,55X_2^2 + 1,6X_3^2. \quad (13)$$

Уравнения (14)–(18) показывают, что все факторы в одинаковой степени влияют на параметры оптимизации. Напряжение на дуге и скорость наплавки не влияют на коэффициент расплавления.

Для того чтобы четче судить о характере влияния каждого фактора на интересующие показатели и определить оптимальные условия протекания процесса, необходимо провести канонический анализ полученных уравнений, т. е. привести их к виду:

$$Y - Y_C = \sum_{i=1}^K l_i Z_i^2. \quad (14)$$

Каноническое преобразование содержит две процедуры: перенос начала координат в особую точку  $C$ , замену старых координатных осей  $X_i$  новыми  $Z_i$ , повернутыми на некоторый угол относительно старых осей.

Опишем каноническое преобразование уравнения (10). Определим координаты нового центра, для чего дифференцируем уравнение (10) по независимым переменным и приравняем производные нулю, получаем систему линейных уравнений:

$$\frac{\partial Y_2}{\partial X_1} = 0,964 - 0,563X_2 + 20,957X_1 = 0;$$

$$\frac{\partial Y_2}{\partial X_2} = -0,844 - 0,563X_1 - 0,606X_2 = 0;$$

$$\frac{\partial Y_2}{\partial X_3} = 20,255X_3 = 0.$$

Решение этой системы даёт координаты особой точки  $C$ :

$$X_{1C} = -0,1717;$$

$$X_{2C} = -0,726;$$

$$X_{3C} = 0.$$

Выход для коэффициента наплавки в этой точке составляет  $a_H = 10,34$  г/Ач. Для нахождения значений  $\lambda_i$  составляем характеристическое уравнение для квадратичной модели (10). Корни характеристического уравнения и будут коэффициентами канонического уравнения (14):

$$D(I) = \begin{vmatrix} b_{11} - I & 1/2b_{12} & 1/2b_{13} \\ 1/2b_{12} & b_{22} - I & 1/2b_{23} \\ 1/2b_{13} & 1/2b_{23} & b_{23} - I \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,957 - I & -0,281 & 0 \\ -0,281 & -0,303 - I & 0 \\ 0 & 0 & 0,253 - I \end{vmatrix}.$$

Раскрывая определитель, получим уравнение:

$$(0,255 - I) \cdot (I^2 - 0,654I - 0,369) = 0. \quad (15)$$

Решая это уравнение, получим следующие корни:

$$I_1 = -0,3628;$$

$$I_2 = 1,0168;$$

$$I_3 = 0,255.$$

В итоге каноническая форма уравнения (15) имеет вид:

$$Y_2 - 10,34 = -0,3628Z_1^2 + 1,0168Z_2^2 + 0,255Z_3^2. \quad (16)$$

Старые координаты  $X_i$  связаны с новыми  $Z_i$  системой уравнений:

$$X_i = \sum_{j=1}^K m_{ij} Z_j + X_{ic}, \quad (i=1-k), \quad (17)$$

где  $m_{ij}$  – направляющие косинуса угла поворота новых координатных осей относительно старых, для которых выполняется соотношение:

$$\sum_{j=1}^K m_{ij} = 1 \quad (j=1-k). \quad (18)$$

В результате вычисления коэффициента  $m_{ij}$  получили следующую систему:

$$\begin{cases} X_1 = 0,2087Z_1 + 0,9784Z_2 + 0,717; \\ X_2 = 0,9785Z_1 - 0,2087Z_2 - 0,726; \\ X_3 = Z_3 + 0. \end{cases}$$

Новое начало координат лежит в точке  $C(-0,717; -0,726; 0)$ . Здесь  $Y_{2C} = 10,34$  – коэффициент наплавки  $\alpha_n$  в точке  $Z_1 = Z_2 = Z_3 = 0$ . Уравнение (15) описывает поверхность минимакса: при движении от центра по осям  $Z_2, Z_3$  показатель  $Y_2$  увеличивается, а по  $Z_1$  – уменьшается. По фактору  $Z_1$  поверхность отклика в точке  $C$  имеет максимум, а по  $Z_2$  и  $Z_3$  – минимум.

Уравнения (16)–(18) также описывают поверхность минимакс. Движение по осям  $Z_1$  и  $Z_2$  из центра приводит к уменьшению показателя  $Y$ , а по  $Z_3$  – к увеличению.

В табл. 4. приведены координаты центров поверхностей (14)–(18) и значение выходов  $Y$  в центрах.

Таблица 4

Координаты центров поверхностей и значение выходов в центрах

|       | $X_{1C}$ | $X_{2C}$ | $X_{3C}$ | $X_C$   |
|-------|----------|----------|----------|---------|
| $Y_1$ | -0,473   | 0        | 0        | 9,08    |
| $Y_2$ | -0,717   | -0,726   | 0        | 10,34   |
| $Y_3$ | -43,485  | 19,158   | -5,085   | 1312,06 |
| $Y_4$ | -33,177  | 28,445   | -1,112   | 93,27   |
| $Y_5$ | -1,2     | 0,758    | -0,262   | 71,8    |

Поверхности  $Y_1, Y_2, Y_3$  имеют центры в области экспериментирования. Центры поверхностей  $Y_3$  и  $Y_4$  находятся далеко за границами области, в которой производились эксперименты. Поэтому значения выходов  $Y_{3C}$  и  $Y_{4C}$  в т. С не имеют физического смысла. Поскольку поверхности (15)–(18) представляют собой поверхности типа минимакс, то в дальнейшем искомый условный экстремум в области экспериментирования.

Были построены контурные кривые равного выхода при различных значениях  $X_3 = -1; 0; +1$ , что соответствует  $V_{CB} = 18$  м/ч; 22 м/ч; 26 м/ч (рис. 1–5).

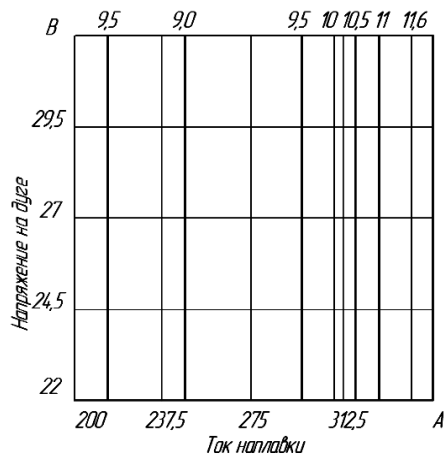


Рис. 1. Коэффициент расплавления в зависимости от силы сварочного тока и напряжения на дуге ( $V_{CB} = 18$  м/ч)

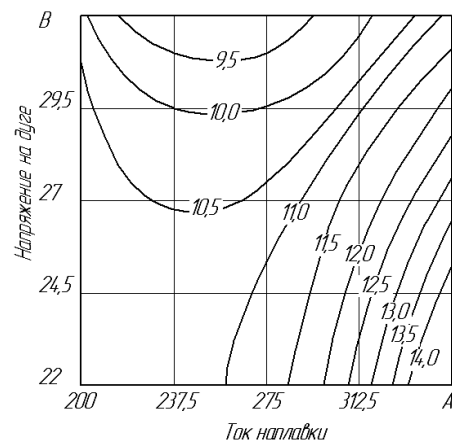


Рис. 2. Коэффициент наплавки в зависимости от силы сварочного тока и напряжения на дуге ( $V_{CB} = 18$  м/ч)

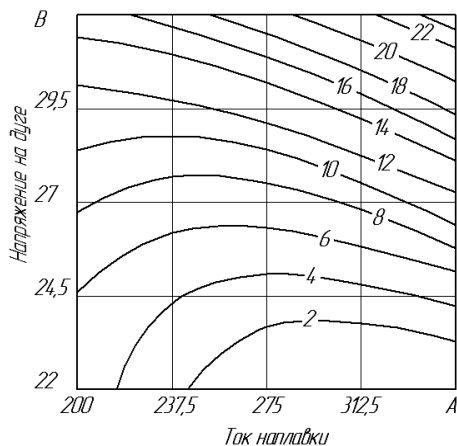


Рис. 3. Коэффициент потерь на разбрызгивание в зависимости от силы сварочного тока и напряжения на дуге ( $V_{CB} = 18$  м/ч)

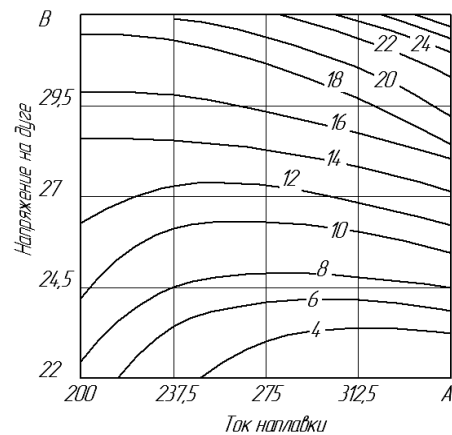


Рис. 4. Коэффициент потерь на угар и разбрызгивание в зависимости от силы сварочного тока и напряжения на дуге ( $V_{CB} = 18$  м/ч)

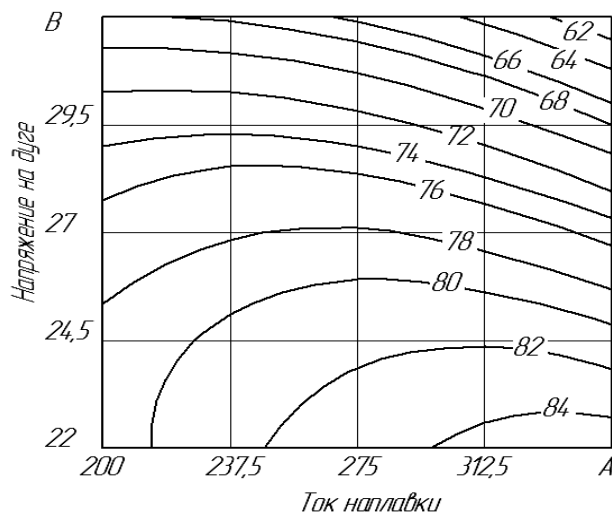


Рис. 5. Коефіцієнт вихода наплавленого металу в залежності від сили зварочного струму та напруги на дугі ( $V_{CB} = 18$  м/ч)

Как следует из графических зависимостей, а также из статистического анализа уравнений регрессии  $\alpha_H$ ,  $\Psi$ ,  $\Psi_{P3}$  незначительно изменяются при изменении скорости сварки, а  $\alpha_P$  практически не зависит от напряжения на дуге. С увеличением напряжения на дуге коэффициенты  $\alpha_H$  и  $K_B$  уменьшаются (рис. 2 и 5), а  $\Psi$  и  $\Psi_{P3}$  – увеличиваются (рис. 3 и 4).

При малом напряжении на дуге и короткой длине дуги наблюдается нестабильный дуговой процесс для исследуемой шлаковой основы.

С увеличением силы зварочного струму коэффициенты  $\alpha_H$ ,  $\alpha_P$  и  $K_B$  возрастают (рис. 1, 2 и 5), а коэффициенты  $\Psi$  и  $\Psi_{P3}$  уменьшаются (рис. 3 и 4). Уменьшение потерь является главной причиной повышения  $\alpha_H$  и  $K_B$  при увеличении силы зварочного струму. В свою очередь, снижение можно объяснить измельчением капель электродного металлу.

Следовательно, для достижения хороших показателей параметров оптимизации необходимо выполнить наплавку на низком напряжении, выбирать его из условия стабильности зварочного процесса.

## ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель, описывающая зависимость характеристик плавления самозащитной порошковой проволоки от параметров режима наплавки.

Для обеспечения следующих характеристик плавления:  $\alpha_P = 12...13$  г/А·ч;  $\alpha_H = 13...14$  г/А·ч;  $\Psi = 8...10\%$ ;  $\Psi_{P3} = 5...6\%$  и  $K_B = 82...84\%$  наплавку необходимо выполнять на режимах:  $I_{CB} = 300...315$  А;  $U_D = 23...24$  В;  $V_{CB} = 18...20$  м/ч.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Юзвенко Ю. А. Исследование и разработка материалов и технологии механизации наплавки открытой дугой: автореф. дис. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук / Ю. А. Юзвенко. – Киев, 1978.
2. Оптимизация состава газошлакообразующих компонентов самозащитной порошковой проволоки / Г. Б. Бильк, В. М. Карпенко, Ю. Д. Дорофеев, А. Д. Богуцкий // Автоматическая сварка. – 1979. – № 2. – С. 42–50.
3. Порошковая проволока для наплавки прессового инструмента / Карпенко В. М., Кошевой А. Д., Катренко В. Т. и др. // Экспресс-информация. Сварка, термообработка, покрытия. – 1989. – № 3. – С. 1–7.
4. Кошевой А. Д. Исследование процесса легирования металлу при наплавке самозащитной порошковой проволокой прессового инструмента. Захист металургійних машин від поломок / А. Д. Кошевой, В. М. Карпенко, В. А. Пресняков // Міжвуз. темат. зб. – Маріуполь, 2000. – № 5. – С. 271–276.