

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, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ЛИТЬЯ, 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.

Цель данной работы – определение оптимальных режимов наплавки прессового инструмента.

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

Указанные коэффициенты определяли по известным зависимостям [1].

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:

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

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

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

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

$$b_0 = \bar{Y}_0 = \frac{\sum_{u=1}^{N_0} Y_{ou}}{N_0}; \quad b_i = \sum_{u=1}^N x_{iu} Y_u; \quad b_{ij} = D_1 \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} Y_u; \\ b_{ii} = B \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 Y_u + C_1 \sum_{j=1}^k \sum_{u=1}^n x_{ju} Y_u - \frac{\bar{Y}_0}{R}, \quad (2)$$

где N – число опытов;

N_0 – число опытов в центре плана;

U – номер опыта;

i – номер фактора.

Для $K = 3$ коэффициенты в (2) равны: $A = 1/8$; $B = 1/4$; $D = 1/4$; $C_1 = 1/16$.

Коэффициенты регрессии, полученные по данным опытов, приведены в табл. 2.

Таблица 1

Факторы и интервалы их варьирования

Интервал варьирования и уровень факторов	$I_{св.}, A$	U_{0}, B	$V_{св.}, M/ч$
Нулевой уровень $X_i = 0$	275	27	22
Интервал варьирования δ_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

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:

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

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:

$$\Delta b_i = t(\alpha; \Psi_y) \cdot S(b_i), \quad (5)$$

где $t(\alpha; \Psi_y)$ табличное значение критерия Стьюдента с Ψ_y степенями свободы. Коэффициент считается значимым, если:

$$|b_i| > \Delta b_i.$$

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

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N (Y_u - \hat{Y}_u)^2}{\Psi_{ад} = N - n}, \quad (6)$$

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

n – число значимых коэффициентов уравнения.

Адекватность модели проверяли по критерию Фишера:

$$F^{\text{Рас}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_Y^2} < F_{\alpha}^{\text{Таб}}; (\Psi_{\text{ад}}; \Psi_Y). \quad (7)$$

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
$S(b_{ii})$	0,1240	0,134	0,622	0,266	0,640
$S(b_{ij})$	0,1130	0,122	0,568	0,243	0,585
Δb_0	0,2920	0,316	1,218	0,627	1,254
Δb_i	0,1460	0,158	0,609	0,314	0,628
Δb_{ii}	0,2530	0,274	1,056	0,543	1,086
Δb_{ij}	0,2010	0,248	0,964	0,496	0,993
$S^2_{\text{ад}}$	0,0160	0,083	3,880	2,040	3,070
$\Psi_{\text{ад}}$	12	8	7	6	7
	1	1	1	2,4	1
	2,09	2,27	2,34	2,42	2,34
Вывод об	адекват.	адекват.	адекват.	адекват.	адекват.

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

$$\alpha_p = 9,3 + 0,946X_1 + X_1^2; \quad (8)$$

$$\alpha_n = 10,38 + 0,964X_1 + 0,844X_2 - 0,563X_1X_2 + 0,957X_1^2 - 0,303X_2^2 + 0,255X_3^2; \quad (9)$$

$$\Psi_{\text{PЗ}} = 8,38 + 0,475X_1^2 + 6,687X_2 + 2,425X_1X_2 - 0,675X_1X_3 - 0,7X_2X_3 + 1,058X_1^2 + 1,283X_2^2 - 1,117X_3^2; \quad (10)$$

$$\Psi = 13,9 + 0,688X_1 + 0,625X_2 + 2,525X_1X_2 - 1,075X_2X_3 + 1,255X_1^2 + 2,55X_2^2 - 2,025X_3^2; \quad (11)$$

$$K_B = 76,3 - 0,637X_1 - 5,875X_2 - 2,325X_1X_2 + 1,105X_2X_3 - X_1^2 - 2,55X_2^2 + 1,6X_3^2. \quad (12)$$

Уравнения (8)–(12) 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:

$$Y - Y_c = \sum_{i=1}^K \lambda_i Z_i^2. \quad (13)$$

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 (9). Определим координаты нового центра, для чего дифференцируем уравнение (9) по независимым переменным и приравняем производные нулю, получаем систему линейных уравнений.

$$\begin{aligned}\frac{\partial Y_2}{\partial X_1} &= 0,964 - 0,563X_2 + 20,957X_1 = 0; \\ \frac{\partial Y_2}{\partial X_2} &= -0,844 - 0,563X_1 - 0,606X_2 = 0; \\ \frac{\partial Y_2}{\partial X_3} &= 20,255X_3 = 0.\end{aligned}$$

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 $\alpha H = 10,34$ г/Ач. Для нахождения значений λ_i составляем характеристическое уравнение для квадратичной модели (9). Корни характеристического уравнения и будут коэффициентами канонического уравнения (13):

$$D(\lambda) = \begin{vmatrix} b_{11} - \lambda & 1/2b_{12} & 1/2b_{13} \\ 1/2b_{12} & b_{22} - \lambda & 1/2b_{23} \\ 1/2b_{13} & 1/2b_{23} & b_{33} - \lambda \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,957 - \lambda & -0,281 & 0 \\ -0,281 & -0,303 - \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0,253 - \lambda \end{vmatrix}.$$

Раскрывая определитель, получим уравнение:

$$(0,255 - \lambda)(\lambda^2 - 0,654\lambda - 0,369) = 0. \quad (14)$$

Решая это уравнение, получим следующие корни:

$$\lambda_1 = -0,3628; \quad \lambda_2 = 1,0168; \quad \lambda_3 = 0,255.$$

В итоге каноническая форма уравнения (15) имеет вид:

$$Y_2 - 10,34 = -0,3628Z_1^2 + 1,0168Z_2^2 + 0,255Z_3^2. \quad (15)$$

Старые координаты X_i связаны с новыми Z_i системой уравнений:

$$X_i = \sum_{j=1}^K m_{ij}Z_j + X_{iC}, \quad (i = 1 - k), \quad (16)$$

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

$$\sum_{i=1}^K m_{ij} = 1, \quad (j = 1 - k). \quad (17)$$

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 αH в точке $Z_1 = Z_2 = Z_3 = 0$. Уравнение (9) 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 т. C имеет максимум, а по Z_2 и Z_3 – минимум.

В табл. 4 приведены координаты центров поверхностей (8)–(12) 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. Поскольку поверхности (9)–(12) 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).

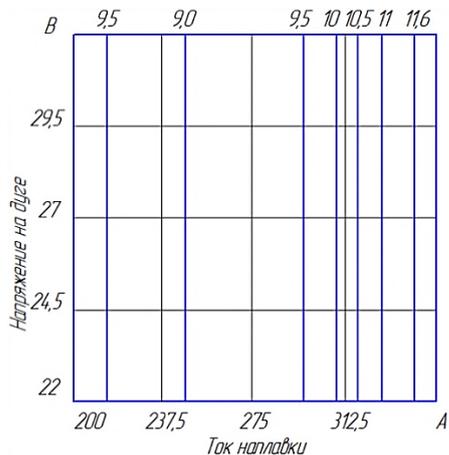


Рис. 1. Коэффициент расплавления в зависимости от силы сварочного тока и напряжения на дуге ($V_{CB} = 18$ м/ч)

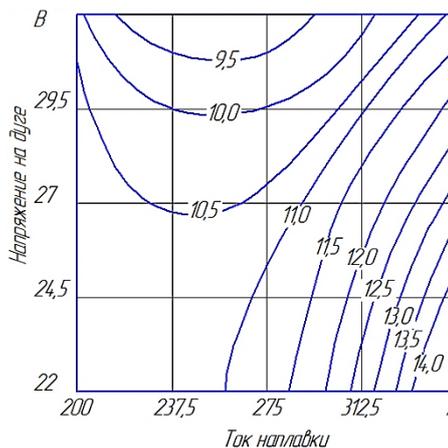


Рис. 2. Коэффициент наплавки в зависимости от силы сварочного тока и напряжения на дуге ($V_{CB} = 18$ м/ч)

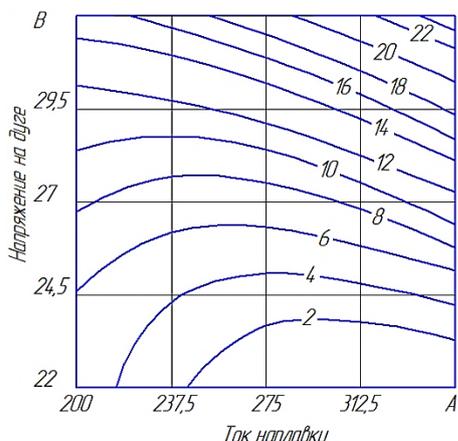


Рис. 3. Коэффициент потерь на разбрызгивание в зависимости от силы сварочного тока и напряжения на дуге ($V_{CB} = 18$ м/ч)

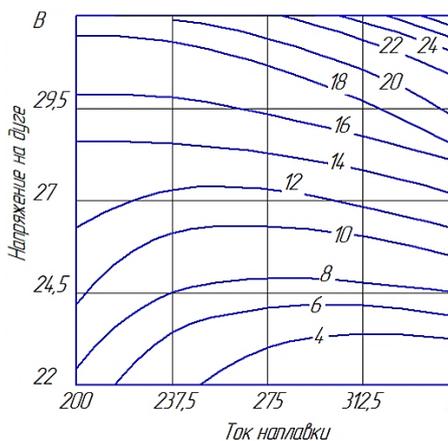


Рис. 4. Коэффициент потерь на угар и разбрызгивание в зависимости от силы сварочного тока и напряжения на дуге ($V_{CB} = 18$ м/ч)

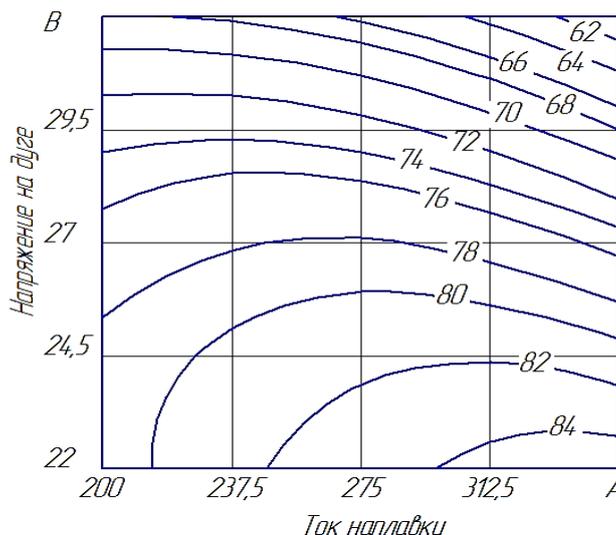


Рис. 5. Коефіцієнт вихода наплавленого металу в залежності від сили зварочного струму та напруги на дугі ($V_{CB} = 18$ м/ч)

Как следует из графических зависимостей, а также из статистического анализа уравнений регрессии α_H , Ψ , Ψ_{P3} незначительно изменяются при изменении скорости сварки, а α_P практически не зависит от напряжения на дуге. С увеличением напряжения на дуге коэффициенты α_H и K_B уменьшаются (рис. 2 и 5), а Ψ и Ψ_{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 α_H , α_P и K_B возрастают (рис. 1, 2 и 5), а коэффициенты Ψ и Ψ_{P3} уменьшаются (рис. 3 и 4). Уменьшение потерь является главной причиной повышения α_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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

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. – 16 с.
2. Оптимизация состава газошлакообразующих компонентов самозащитной порошковой проволоки / Г. Б. Билык, 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 / А. Д. Кошевой, В. М. Карпенко, В. А. Пресняков // Захист металургійних машин від поломок : Міжвузівськ. темат. зб. – Маріуполь, 2000. – № 5. – С. 271–276.

Статья поступила в редакцию 14.12.2011 г.