

$$y_3 = P/v_{\text{св}} (\text{комбинированный способ сварки}) = 0,048 - 0,004x; \quad (13)$$

$$y_4 = q/v_{\text{св}} (\text{комбинированный способ сварки}) = 0,376x - 0,088. \quad (14)$$

## Литература

1. **Сущность** и основные преимущества сварки лазерным лучом [www/ svarkainfo.ru>rus/technology/laser](http://www.svarkainfo.ru>rus/technology/laser)

2. **Технологические** особенности лазерной сварки среднеуглеродистой легированной стали / В.М. Куглик [и др.] // Автоматическая сварка. – 2012. – С.11–14.

3. **Bagger, C.** Review of laser hybrid welding / C. Bagger, F.O. Olsen // J. Laser Applications. – 2005. – V. 17, N 1. – P. 2–14.

4. **Abe, N.** Trends in laser arc combination welding methods / N. Abe, M. Hayashi // Welding International. – 2002. – V. 16, N 2. – P. 94–98.

5. **Вознесенский, В.А.** Статистические методы планирования экспериментов в технико-экономических исследованиях / В.А. Вознесенский. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 264 с.

УДК 669.14:539.3+621.785.72

Е.С. ГОЛУБЦОВА, д-р техн. наук (БНТУ),  
Н.Б. КАЛЕДИНА (БГТУ),  
Л.С. ШУМАНСКАЯ (БНТУ)

### ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ И ЕЕ КОМБИНАЦИИ СО СВАРКОЙ ТИГ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ СИСТЕМЫ Fe-Cr-Mn-Si. Сообщение 2. ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ МЕТАЛЛА, СОСТАВА ЗАЩИТНОГО ГАЗА НА СКОРОСТЬ СВАРКИ, ВЕЛИЧИНУ ПОГОННОЙ ЭНЕРГИИ И ШИРИНУ СВАРНЫХ ШВОВ

В следующей серии экспериментов исследовали влияние толщины металла ( $x_i = -1$  (3 мм) и  $x_i = +1$  (6 мм)) при  $P = 4,4$  кВт и состава защитного газа ( $x_2 = -1$  (CO<sub>2</sub>);  $x_2 = 0$  (Ar) и  $x_2 = +1$  (Ar + 17 % CO<sub>2</sub> + 4 % O<sub>2</sub>)) на скорость сварки  $y_1 = v_{\text{св}}$ , м/ч, величину по-

гонной энергии  $y_2 = q/v_{св}$ , Дж/м и ширину швов,  $y_3$  – ширина шва с лицевой стороны, мм, а  $y_4$  – ширина шва с обратной стороны.

Для проведения эксперимента был выбран тот же план  $N = 2 \times 3$ , где 2 – два уровня толщины металла, а 3 – три вида защитного газа.

Матрица плана  $2 \times 3$  и результаты измерения приведенных параметров приведены в таблице 1

Таблица 1 – Матрица плана  $2 \times 3$  и результаты испытаний  $v_{св}$ ,  $q/v_{св}$  и ширина шва после лазерного проплавления легированной стали

№	$x_1$	$x_2$	$x_1 x_2$	$x_2^2$	$y_1 = v_{св}$	$y_2 = q/v_{св}$	$y_3$ , мм	$y_4$ , мм
1	–	–	+	+	150	105,6	1,1	1,3
2	–	0	0	0	150	105,6	1,1	1,3
3	–	+	–	+	150	105,6	1,4	1,1
4	+	–	–	+	60	264	2,8	1,0
5	+	0	0	0	48	330	3,6	3,3
6	+	+	+	+	48	330	4,1	3,7
$\Sigma_1$	–294	–12	–12	410	608	–	–	–
$\Sigma_2$	607,2	66	60	305,2	–	1240,8	–	–
$\Sigma_3$	6,9	1,6	1	9,4	–	–	14,1	–
$\Sigma_4$	4,3	2,5	2,9	7,1	–	–	–	11,7

Ошибки опытов соответственно составляли:  $S_1 = 5,07$ ;  $S_2 = 10,34$ ;  $S_3 = 0,118$ ;  $S_4 = 0,1$ ;  $t = 1,343$ .

Обработку результатов эксперимента проводили по методике [1]:

$$\hat{a}_0 = A_0(0\acute{o}) - A_{02}(22\acute{o}) ; \quad (1)$$

$$\hat{a}_1 = A_1(1\acute{o}) ; \hat{a}_2 = A_2(2\acute{o}) ; \quad (2)$$

$$\hat{a}_{12} = A_{12}(12\acute{o}) ; \quad (3)$$

$$\hat{a}_{22} = A_{22}(22\acute{o}) - A_{02}(0\acute{o}) ; \quad (4)$$

$$S_{\hat{a}\hat{a}}^2 = \frac{1}{N - m} \sum_{n=1}^N \Delta y_n^2 . \quad (5)$$

В результате получили адекватное уравнение, связывающее скорость сварки  $y_1 = v_{св}$  с толщиной свариваемого металла  $x_1$ :

$$y_1 = v_{св} = 93 - 47x_1, \quad (6)$$

т.к.  $\epsilon_2$ ,  $\epsilon_{12}$  и  $\epsilon_{22}$  оказались незначительными ( $\Delta\epsilon_1 = 4$ ;  $\epsilon_1 = -47$ ;  $\Delta\epsilon_2 = \Delta\epsilon_{12} = 4,92$ ;  $\epsilon_2 = -3$ ;  $\epsilon_{12} = -3$ ;  $\epsilon_{22} = 3,5 < \Delta\epsilon_{22} = 8,52$ ).

Адекватность (6) подтверждается тем, что  $S_{\text{аа}}^2 = \frac{144}{6-2} = 20,6$ , а

$$F = \frac{20,6}{25,67} < 1.$$

Для  $y_2 = q/v_{св}$  получено уравнение:

$$y_2 = 217,8 + 101,4x_1 + 16x_2 + 16x_1x_2, \quad (7)$$

т.к.  $\epsilon_{22} = 16,5 < \epsilon_{22} = 17,41$ .

Графическое представление полученной зависимости приведено на рисунке 1.

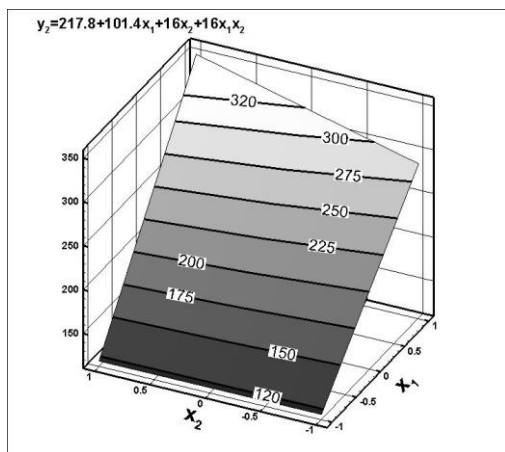


Рисунок 1 – Графическое представление уравнения (7)

Уравнение (7) также адекватно, т.к.  $S_{\text{дд}}^2 = \frac{1456,41}{6-4} = 728,205$ , а  $F = \frac{728,205}{106,9} = 6,81 < F_{\text{кр}} = 13,3$  при  $\alpha = 0,001$  и  $f_1 = 2; f_2 = 6$ .

Для ширины шва с наружной стороны  $y_3$  получено уравнение

$$y_3 = 2,35 + 1,15x_1 + 0,4x_2 + 0,25x_1x_2. \quad (8)$$

Графическая интерпретация модели (8) дана на рисунке 2.

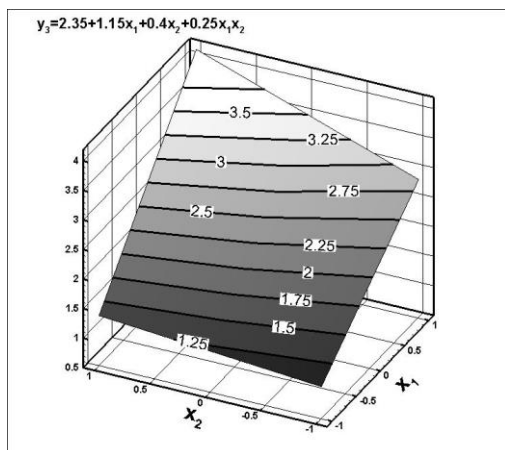


Рисунок 2 – Графическая интерпретация модели (8)

Это уравнение адекватно описывает экспериментальное пространство, т.к.  $S_{\text{дд}}^2 = \frac{0,0252}{6-4} = 0,0128$ , а  $F = \frac{0,0128}{25,67} = 0,913 < 1$ .

Наконец, для  $y_4$  (ширина шва с обратной стороны) получено уравнение, которое адекватно описывает факторное пространство только при  $\alpha = 0,001, f_1 = 1$  и  $f_2 = 6$  ( $F_{\text{кр}} = 35,5 > F_{\text{экс}} = 24,12$ ):

$$y_4 = 2,3 + 0,72x_1 + 0,63x_2 + 0,73x_1x_2 + 0,53 \delta_2^2. \quad (9)$$

Рисунок 3 дает графическое представление полученного уравнения (9).

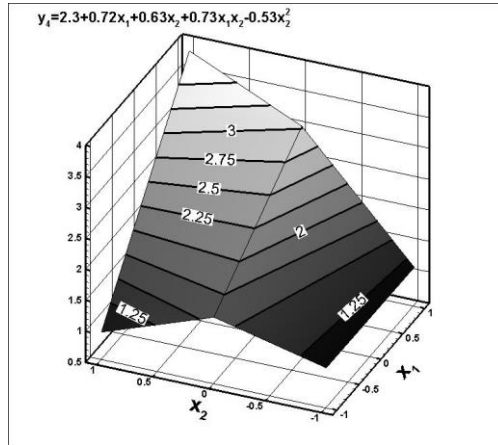


Рисунок 3 – Графическое представление уравнения (9)

Анализ полученных уравнений показывает, что на скорость сварки  $y_1 = v_{св}$  влияет только  $x_1$  (толщина свариваемой пластины), влияние среды  $x_2$  несущественно. Максимальная величина  $y_1 = 150$  будет при  $x_1 = -1$  (3 мм).

На величину  $y_2 = q/v_{св}$  наибольшее влияние оказывает также  $x_1$  (толщина свариваемой пластины), влияние  $x_2$  (среды защитного газа) немного меньше  $y_{2max} = 330$  при  $x_1 = +1$  и  $x_2 = +1$  (толщина свариваемой пластины – 6 мм и защитная среда – Ar + 17 % CO<sub>2</sub> + 4 % O<sub>2</sub>).

На  $y_3$  (ширина шва с лицевой стороны) также наибольшее влияние оказывает  $x_1$  (толщина свариваемой стали), влияние  $x_2$  меньше.  $y_{3max} = 4,15$  при  $x_1 = +1$  и  $x_2 = +1$ .

На  $y_4$  (ширина шва с обратной стороны) большее влияние оказывает защитная среда ( $x_2$ ), где  $y_{4max} = 3,85$  мм при  $x_1 = +1$  и  $x_2 = +1$ .

## Литература

**1. Вознесенский, В.А.** Статистические методы планирования экспериментов в технико-экономических исследованиях / В.А. Вознесенский. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 264 с.