

Е.С. ГОЛУБЦОВА, д-р техн. наук (БНТУ),  
Н.Б. БАЗЫЛЕВ, канд. физ.-мат. наук  
(ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси)

## ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ЗАЩИТНОГО ГАЗА НА СВОЙСТВА НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ И УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ СВАРКИ. СООБЩЕНИЕ 2. ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ЗАЩИТНОГО ГАЗА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СВАРКИ И УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Известно, что механические свойства сварного соединения в достаточной степени подвержены влиянию состава защитного газа.

Это подтверждают результаты приведенного эксперимента, в котором изучалась зависимость ударной вязкости металла от состава защитного газа ( $x_1 = -1$ , CO<sub>2</sub>;  $x_1 = +1$ ; Ar + 20 % CO<sub>2</sub>) и температуры испытания ( $x_2 = -1$ , 40 °С;  $x_2 = 0$ , -30 °С;  $x_2 = +1$ , -20 °С).

Для проведения эксперимента был выбран двухфакторный план  $N = 2 \times 3$ , где 2 – два вида состава защитного газа (CO<sub>2</sub> и Ar + 20 % CO<sub>2</sub>), а 3 – три уровня температуры.

Матрица плана  $2 \times 3$  и результаты эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Матрица плана  $2 \times 3$  и значения ударной вязкости

$N$	$x_1$	$x_2$	$x_1 x_2$	$x_2^2$	$y_1, \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2}$	Примечание
1	-	-	+	+	40	$\bar{y} = 56,8 \text{ Дж/см}^2$ $S_y = 2,84 \text{ Дж/см}^2$ $S_y^2 = 8,35$
2	-	0	0	0	42	
3	-	+	-	+	44	
4	+	-	-	+	55	
5	+	0	0	0	78	
6	+	+	+	+	82	
$E$	89	31	23	221	341	
Шифр	(1Y)	(2Y)	(12Y)	(22Y)	(0Y)	

Обработку результатов эксперимента проводили по методике [1].

Коэффициенты предполагаемого уравнения  $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{22}x_2^2$  рассчитываем по формулам:

$$b_0 = A_0(OY) - A_{01}(11Y) - A_{02}(22Y); \quad (1)$$

$$b_1 = A_1(1Y); b_2 = A_2(2Y); b_{12} = A_{12}(12Y); \quad (2)$$

$$b_{22} = A_{22}(22Y) - A_{02}(OY). \quad (3)$$

Шифры (0Y); (1Y); (2Y); (12Y); (22Y) – геометрические суммы произведений столбца Y на соответствующие столбцы матрицы плана (приведены в нижней строке матрицы).

Значения коэффициентов  $A_0; A_1; \dots; A_{22}$  брали из таблицы 1 [1]. Для плана  $2 \times 3$   $A_0 = 0,5$ ;  $A_{01} = 0$ ;  $A_{02} = 0,5$ ;  $A_1 = 0,167$ ;  $A_2 = A_{12} = 0,25$ ;  $A_{11} = 0$ ;  $A_{22} = 0,75$ .

В результате получим следующие значения коэффициентов  $b_i$ :  $b_0 = 0,5(341 - 221) = 60$ ;  $b_1 = 0,167 \cdot 89 = 14,9$ ;  $b_2 = 0,25 \cdot 31 = 7,8$ ;  $b_{21} = 0,25 \cdot 23 = 5,8$ ;  $b_{22} = 0,75 \cdot 221 - 0,5 \cdot 341 = -4,8$ .

Значимость этих коэффициентов определяли путем сравнения их абсолютных значений с их доверительными интервалами  $\Delta b_i$ , которые определяли по формулам:

$$\Delta b_0 = \sqrt{A_0} \cdot t \cdot S_y; \quad (4)$$

$$\Delta b_i = \sqrt{A_i} \cdot t \cdot S_y; \quad (5)$$

$$\Delta b_{ij} = \sqrt{A_{ij}} \cdot t \cdot S_y; \quad (6)$$

$$\Delta b_{ii} = \sqrt{A_{ii}} \cdot t \cdot S_y, \quad (7)$$

где  $S_y$  – ошибки эксперимента (у нас  $S_y = 2,89$ ),  $t$  – критерий Стьюдента (у нас для  $N = 6$  и  $\alpha = 0,1$   $t = 1,943$ ).

В результате получили:  $\Delta b_0 = 3,97$ ;  $\Delta b_1 = 2,3$ ;  $\Delta b_2 = \Delta b_{12} = 2,81$ ;  $\Delta b_{22} = 4,86$ , т.е. все коэффициенты уравнения  $b_i$  значимы.

Уравнение регрессии будет таким: (после округления)

$$y = KCU = 60 + 15x_1 + 8x_2 + 6x_1x_2 - 5x_2^2, \quad (8)$$

а графически, для наглядности на рисунке 1.

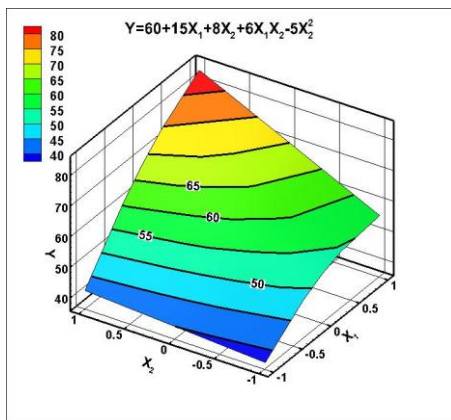


Рисунок 1 – Графическое представление модели (8)

Адекватность этого уравнения проверили путем сравнения расчетного критерия Фишера  $F_p$  с табличным значением этого критерия  $F_{кр}$  при  $\alpha = 0,05$ ;  $f_1 = 1$   $f_2 = 5$ ;  $F_p = \frac{S_{ay}^2}{S_y^2}$ , где  $S_{ay}^2$  – дисперсия

адекватности, определяется по формуле  $S_{ay}^2 = \frac{\sum_{n=1}^N (y_n - y_p)^2}{N - m}$ , где  $y_n$  – значение ударной вязкости в  $n$ -ой строке,  $y_p$  – расчетное значение этого параметра в  $n$ -ой строке,  $m$  – число значимых коэффициентов уравнения, включая  $b_0$  (у нас  $m = 5$ ).

$$\text{В результате } S_{ay}^2 = \frac{31}{6-5} = 31, \text{ а } F_p = \frac{31}{8,35} = 3,71 < F_{кр} = 6,6.$$

Следовательно, уравнение (8) адекватно описывает факторное пространство.

Анализ уравнения (8) показывает, что  $x_1$  (состав газа) оказывает большее влияние, чем  $x_2$  (температура испытания). Максимальная ударная вязкость  $y = 82$  Дж/см<sup>2</sup> будет при  $x_1 = +1$  и  $x_2 = +1$ , т.е. при использовании смеси Ag + 20 % CO<sub>2</sub> и  $T = -20$  °C.

Минимальная величина  $y = 40 \text{ Дж/см}^2$  будет при  $x_1 = -1$  и  $x_2 = -1$ , т.е. при  $\text{CO}_2$  и  $T = -40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Таким образом, чем ниже содержимое  $\text{CO}_2$ , тем лучше металл сварного шва, тем меньше оксидных включений он содержит. Также микроструктура становится более мелкозернистой, что благоприятно сказывается на ударной вязкости металла шва.

При увеличении скорости сварки в чистом углекислом газе ( $\text{CO}_2$ ) профиль сварного шва становится более выпуклым, а также ухудшается перенос металла, что ограничивает скорость сварки по сравнению в смесях на основе аргона. Этот вывод подтверждают результаты следующего эксперимента, в котором были использованы три различных газа в процессе МАГ-сварки низколегированной стали. Скорость подачи проволоки сохранялась постоянной, напряжение было установлено на оптимальном уровне для каждого защитного газа. Скорость сварки увеличивалась до тех пор, пока профиль шва не становился слишком выпуклым.

Результаты эксперимента приведены в таблице 2, где  $y$  – скорость сварки, см/мин, а  $x$  – содержание  $\text{CO}_2$ , % (100, 20, 8):

Таблица 2 – Экспериментальные данные скорости сварки и содержания  $\text{CO}_2$

$N$	$x$ , %	$y$ , см/мин
1	100	40
2	20	47
3	8	53

Зависимость  $y$  от  $x$  можно выразить в виде уравнения  $y = a + bx$ , т.е. попытаться установить корреляционную связь между  $y$  и  $x$ , определив коэффициент корреляции между ними  $r_{x,y}$ .

Для этого можно воспользоваться формулами

$$r_{xy} = \frac{\sum_i^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_i^N (y_i - \bar{y})^2}};$$

$$b = \frac{\sum_i^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_i^N (x_i - \bar{x})^2};$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x},$$

в которых  $\bar{y}$  и  $\bar{x}$  – средние значения изучаемых параметров.

Действительно, коэффициент корреляции  $r_{x,y}$  оказался равным  $r_{x,y} = -0,936 > r_{кр} = 0,934$  при  $N = 3$  и  $P = 0,02$ ,  $a = 52$  и  $b = -0,12$ , а уравнение связи между  $y$  и  $x$  можно записать в виде

$$y = 52 - 0,12x. \quad (9)$$

Проверка адекватности этого уравнения подтвердила эту гипотезу, т.к.  $S_{ay}^2 = \frac{16}{3-2} = 16$ , а  $F = \frac{16}{5,44} = 2,94 < F_{кр} = 18,5$  при  $\alpha = 0,05$ ;  $f_1 = 1$  и  $f_2 = 2$  ( $S_y^2 = 5,44$ ).

Таким образом, при снижении процента содержания  $CO_2$  ( $x$ ) в защитной смеси скорость сварки может быть увеличена.

Преимущества, получаемые при переходе с чистого  $CO_2$  на смеси  $Ar + CO_2$  подтверждаются также результатами следующего эксперимента. Изучалась работа удара металла шва при использовании различных защитных газов (CORGON 5S2, CORGON 12S2, CORGON 18 и  $CO_2$ ) при содержании в них  $CO_2$  (5, 12, 18 и 100 %). Результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Экспериментальные данные работы удара металла шва сварных соединений и содержания  $CO_2$  [2]

$x, CO_2$	5	12	18	100
$y, Дж$	75	61	59	34

$$S_y = 2,863, S_y^2 = 8,194.$$

Здесь коэффициенты корреляции  $r_{x,y} = -0,95$ ;  $a = 69,53$ ;  $b = 0,364$ , а  $r_{кр} = 0,8114$  при  $N = 4$ ;  $\alpha = 0,05$ .

Уравнение будет таким

$$y = 69,53 - 0,364x \quad (10)$$

Данное уравнение адекватно, т.к.  $S_{ay}^2 = \frac{87,2068}{4-2} = 43,6$ , а

$$F = \frac{43,6}{8,194} = 5,32 < F_{кр} = 9,3 \text{ при } \alpha = 0,05; f_1 = 2 \text{ и } f_2 = 3.$$

Таким образом, с ростом содержания  $\text{CO}_2$  работа удара (при  $-20^\circ\text{C}$ ) снижается более чем в 2 раза.

При оценке влияния содержания аргона на работу удара можно также получить зависимость  $y = a + bx$ .

Для этого построим таблицу 4.

Таблица 4 – Данные о влиянии содержания аргона в смеси на работу удара при испытании сварного соединения

$x$ , Аг, %	93	86	82	0
$y$ , Дж	75	61	59	34

$$S_y = 2,863, S_y^2 = 8,194.$$

Здесь  $r_{x,y} = 0,946$ ;  $a = 33,182$ ;  $b = 0,369$ . Уравнение будет таким

$$y = 33,18 + 0,37x. \quad (11)$$

Это уравнение адекватно, т.к.  $S_{ay}^2 = \frac{92}{4-2} = 46$ , а  $F = \frac{46}{8,194} = 5,61 <$

$< F_{кр} = 9,3$ .

Следовательно, с ростом содержания Аг в составе защитного газа работа удара увеличивается.

### Список литературы

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

**2. Бугинов, А.** Влияние состава защитного газа на процесс МАГ-сварки низколегированных и углеродистых сталей / А. Бугинов // Сварщик. – № 2 (63). – 2014. – С. 28–31.