уравнения и его адекватности получено уравнение, адекватно описывающее факторное пространство ($F_р = \frac{629}{811} < 1$)

$$y = \sigma_т,\ МПа = 578 - 33x_1 + 53x_2. \qquad (19)$$

Фактор $H_р$ (x_1) характеризует степень изменения свойств малоуглеродистых и низколегированных марганцовистых сталей различного способа выплавки. С ростом $H_р$ снижается прочность стали, но влияние его на $y = \sigma_т$ все же меньше, чем исходный предел текучести стали (x_2). Прочность стали 20Х2НМФА после проведения отпуска зависит от исходной прочности заготовок. При исходном значении $\sigma_т$ = 743 МПа она снижается до 524 МПа.

Список литературы

1. **Земзин, В.Н.** Термическая обработка и свойства сварных соединений / В.Н. Земзин, Р.З. Шрон. – М.: Машиностроение, 1978. – 368 с.

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

УДК 621.791.053–024.78:621.785

Е.С. ГОЛУБЦОВА, д-р техн. наук (БНТУ),
Н.Б. БАЗЫЛЕВ, канд. физ.-мат. наук (ИТМО НАН Беларуси),
Н.Б. КАЛЕДИНА (БГТУ)

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ, КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛОТЫ, ТОЛЩИНЫ СВАРИВАЕМОГО ЛИСТА И ТЕМПЕРАТУРЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПОДОГРЕВА НА ПЛОЩАДЬ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ СВАРНОГО ШВА

В работе приведены результаты исследований влияния четырех факторов (скорости охлаждения, погонной энергии, толщины листа и температуры подогрева) на площадь поперечного сечения сварного шва.

Уровни этих факторов и кодированные значения этих уровней приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Уровни и коды факторов

Факторы / Уровни	Скорость охлаждения $w_{6/5}$, °С/с	Количество теплоты q, кДж/м	Толщина листа δ, мм	Температура подогрева, °С
Код	x_1	x_2	x_3	x_4
Нижний (–1)	5,0	1800	8	–40
Основной (0)	6,8	2075	14	+40
Верхний (+1)	8,6	2350	20	+120

Для проведения эксперимента был выбрал некомпозиционный четырехфакторный план Бокса-Бенкина, поскольку была выдвинута гипотеза, что факторное пространство адекватно описывается полиномом второго порядка [1]. Опыты проводились в случайном порядке.

Матрица плана и результаты эксперимента приведены в таблице 2, где x_1, x_2, x_3, x_4 – кодированные уровни факторов, N – число опытов (строк в матрице), $y_э$ – экспериментальные значения площади поперечного сечения. Ошибка воспроизводимости опытов (S_y – 3 мм^2) определялась по результатам трех параллельных опытов при нулевых (основных) уровнях факторов (опыты 25–27).

Кодирование уровней факторов проводилось по формуле

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - 0{,}5(\tilde{x}_{i\max} + \tilde{x}_{i\min})}{0{,}5(\tilde{x}_{i\max} + \tilde{x}_{i\min})}, \tag{1}$$

где x_i – кодированный уровень i-го фактора, а $\tilde{x}_i$, $\tilde{x}_{i\max}$, $\tilde{x}_{i\min}$ – текущее, максимальное и минимальное значений i-го фактора в натуральных единицах.

Таблица 2 – Матрица плана Бокса-Бенкина и результаты эксперимента

N	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4	x_1^2	x_2^2	x_3^2	x_4^2	$y_э$
1	–	–	0	0	+	0	0	0	0	0	+	+	0	0	80
2	+	–	0	0	–	0	0	0	0	0	+	+	0	0	30
3	–	+	0	0	–	0	0	0	0	0	+	+	0	0	65
4	+	+	0	0	+	0	0	0	0	0	+	+	0	0	5
5	–	0	–	0	0	+	0	0	0	0	+	0	+	0	70
6	+	0	–	0	0	–	0	0	0	0	+	0	+	0	7
7	–	0	+	0	0	–	0	0	0	0	+	0	+	0	112
8	+	0	+	0	0	+	0	0	0	0	+	0	+	0	48
9	0	–	–	0	0	0	0	+	0	+	0	+	+	0	42
10	0	+	–	0	0	0	0	–	0	–	0	+	+	0	28
11	0	–	+	0	0	0	0	–	0	–	0	+	+	0	100
12	0	+	+	0	0	0	0	+	0	+	0	+	+	0	55
13	0	0	–	–	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	102
14	0	0	+	–	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	141
15	0	0	–	+	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	26
16	0	0	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	70
17	–	0	0	–	0	0	+	0	0	0	+	0	0	+	154
18	+	0	0	–	0	0	–	0	0	0	+	0	0	+	50
19	–	0	0	+	0	0	–	0	0	0	+	0	0	+	40
20	+	0	0	+	0	0	+	0	0	0	+	0	0	+	20
21	0	–	0	–	0	0	0	0	+	0	0	+	0	+	123
22	0	+	0	–	0	0	0	0	–	0	0	+	0	+	77
23	0	–	0	+	0	0	0	0	–	0	0	+	0	+	36
24	0	+	0	+	0	0	0	0	+	0	0	+	0	+	22
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	58
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	61
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	64
Σ	–36	–16	251	–43	–10	–1	84	–31	32	5	681	663	801	861	1686

Коэффициенты уравнения регрессии рассчитывали по формулам [2]:

$$b_0 = \sum_{n=1}^{n_0} y_{0n} \Big/ n_0 = \frac{58+61+64}{3} = 61; \tag{2}$$

$$b_i = A\sum_{n=1}^{N} x_{in} y_n ; \tag{3}$$

$$b_{ij} = D\sum_{n=1}^{N} x_{in} x_{jn} y_n ; \tag{4}$$

$$b_{ii} = B\sum_{n=1}^{N} x_{in}^2 y_n + C\sum_{i=1}^{k}\sum_{n=1}^{N} x_{in}^2 y_n - \frac{\sum_1^{n_0} y_{0n}}{n_0 p} ; \tag{5}$$

Значения коэффициентов *A*, *B*, *C*, *D*, *p* брали из таблицы 15 [2]. Для числа факторов $k = 4$; $A = 1/12$; $B = 1/8$; $C = -1/48$; $D = 1/4$; $p = 2$.

Дисперсии для определения значимости коэффициентов уравнения регрессии вычисляли по формулам:

$$S_{b_0}^2 = S_y^2 \Big/ n_0 ; \tag{6}$$

$$S_{b_i}^2 = AS_y^2 ; \tag{7}$$

$$S_{b_{ij}}^2 = DS_y^2 ; \tag{8}$$

$$S_{b_{ii}}^2 = \left(B + \frac{1}{p^2 n_0} \right) S_y^2 , \tag{9}$$

где S_y^2 – дисперсия параметра оптимизации (площади сечения), определяемая по формуле:

$$S_y^2 = \frac{\sum_1^{n_0} (y_{i0} - \bar{y}_0)^2}{(n_0 - 1)} , \tag{10}$$

где y_{i0} и $\bar{y}_0$ – текущее и среднее значение параметра оптимизации в опытах 25–27 (таблица 2).

Доверительные интервалы для коэффициентов уравнения регрессии определяли по формулам:

$$\Delta b_0 = \pm t\sqrt{S_{b_0}^2}\ ; \tag{11}$$

$$\Delta b_i = \pm t\sqrt{S_{b_i}^2}\ ; \tag{12}$$

$$\Delta b_{ij} = \pm t\sqrt{S_{b_{ij}}^2}\ ; \tag{13}$$

$$\Delta b_{ii} = \pm t\sqrt{S_{b_{ii}}^2}\ , \tag{14}$$

где t – критерий Стьюдента, берущийся из таблиц (обычно при $\alpha = 0{,}05$, $f = 27N$). В нашем случае $t = 2{,}05$.

После обработки по указанным формулам получили соответственно доверительные интервалы для коэффициентов: $\Delta b_0 = 3{,}55$, $\Delta b_i = 1{,}8$, $\Delta b_{ij} = 3{,}075$, $\Delta b_{ii} = 2{,}81$.

После исключения незначимых коэффициентов ($b_{13} = –0{,}25$, $b_{34} = 1{,}25$) уравнение регрессии запишем в таком виде:

$$\begin{gathered} y = 61 - 30x_1 - 14x_2 + 21x_3 - 36x_4 - 3x_1x_2 + 21x_1x_4 - 8x_2x_3 + \\ + 8x_2x_4 - 8x_1^2 - 10x_2^2 + 7x_3^2 + 15x_4^2. \end{gathered} \tag{15}$$

Адекватность этого уравнения проверяли по критерию Фишера

$$F = \frac{S_{ay}^2}{S_y^2} \tag{16}$$

где дисперсия адекватности S_{ay}^2 определяется по формуле

$$S_{ay}^2 = \frac{SS_{\text{ост}} - SS_y}{N - m - (n_0 - 1)}\ . \tag{17}$$

Здесь $SS_{\text{ост}} = \sum_{n-1}^{N}(y_{\text{р}} - y_{\text{э}})^2$; $SS_y = \sum_{1}^{n_0}(y_{0n} - \bar{y}_0)^2$; m – число значимых коэффициентов в уравнении (15). Для нашего случая m = 13, n_0 = 3, $SS_{\text{ост}}$ = 191, SS_y = 18. Следовательно, $S_{ay}^2 = \frac{191-18}{27-13-1} = \frac{173}{12} =$ = 14,417, а $F_{\text{р}} = \frac{14{,}417}{9}$ = 1,6, что меньше табличного $F_{\text{кр}}$ = 19,4 (при α = 0,05; f_1 = 12; f_2 = 2), т.е. уравнение (15) адекватно описывает факторное пространство.

Анализ уравнения (15) показывает, что наибольшее влияние на площадь поперечного сечения сварного шва (y) оказывает температура подогрева (x_4), затем скорость охлаждения (x_1), толщина листа δ(x_3) и величина погонной энергии (x_2).

Максимальная площадь сечения $y_{\max}$ = 200 мм^2 получена при x_1 = –1, x_2 = –1, x_3 = 1, x_4 = –1, т.е. при скорости охлаждения $w_{6/5}$ = = 5 °С/с, q = 1800 кДж/м, S = 20 мм и температуре подогрева 40 °С.

Минимальная площадь сечения (около нуля) получена при x_1 = 1, x_2 = 1, x_3 = –1, x_4 = 1, т.е. при скорости охлаждения $w_{6/5}$ = 8,6 °С/с, q = 2350 кДж/м, S = 8 мм и температуре подогрева 120 °С.

Таким образом, пользуясь уравнением (15), можно прогнозировать величину площади поперечного сечения шва при тех или иных уровнях скорости охлаждения, количестве подвозимого тепла q, толщине листа и температуры предварительного подогрева.

Список литературы

1. Жарский, И.М. Планирование и организация эксперимента: Учеб. пособие / И.М. Жарский, Б.А. Каледин, И.Ф. Кузьмицкий. – Минск: БГТУ, 2003. – 179 с.

2. Каледин, Б.А. Планирование эксперимента в порошковой металлургии / Б.А. Каледин . – Ч. I, II. – Минск: БПИ, 1982 . – 102 с.