

2. Электронный учебник по статистике // StatSoft, Inc. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://statsoft.ru/home/textbook/default.htm> – Дата доступа: 15.03.2022.

3. Бокс, Дж., Дженкинс, Г. Анализ временных рядов, прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс: Пер. с англ. // Под ред. В.Ф. Писаренко. – Москва: Мир, 1974. – 406 с.

УДК 621.791.052:620.178

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА (Si, Ni, Co) НА СКЛОННОСТЬ К ОБРАЗОВАНИЮ ГОРЯЧИХ ТРЕЩИН, ПРОЧНОСТЬ И ВЯЗКОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
(СТАЛЬ 38ХС3Н4К2МФА)**

Голубцова Е.С., Шавель А.Н., Шуманская Л.С.
Белорусский национальный технический университет

Выполнен статистический анализ экспериментальных данных по влиянию содержания легирующих элементов — кремния, кобальта, никеля — в присадочном материале на склонность к образованию горячих трещин и характеристики прочности и вязкости металла шва сварных соединений из стали 38ХС3Н4К2МФА, применяемой в авиационной технике. На основе полученных моделей установлено, что содержание кобальта в присадочном материале не должно превышать 1,5%.

Эффективность применения сталей в авиационной технике с прочностью выше 1900 МПа определяется возможностью изготовления из них прочных сварных конструкций.

Обычно для сварки высокопрочной стали 38ХС3Н4К2МФА применяется серийная проволока ВЛ1-ДГ. Одним из факторов, влияющих на технологическую прочность при сварке и эксплуатационные свойства сварных конструкций, является химический состав металла шва, который достигается в среднелегированных высокопрочных сталях многокомпонентным легированием, которое обеспечивает упрочнение феррита и повышение прокаливаемости. Основными легирующими элементами в присадочных материалах для сварки низко-и среднелегированных сталей является кремний, марганец, хром, никель [1, 2].

Поскольку сталь 38ХС3Н4К2МФА содержит в своем составе достаточное количество кремния ($Si \approx 3\%$), никеля ($Ni \approx 4\%$), кобальта ($Co \approx 2\%$), в настоящей работе проведен анализ влияния наличия и содержания этих элементов в присадочном материале типа 32Х2Г2СНВМ

на свойства сварных швов: ударную вязкость, стойкость против образования горячих трещин и прочность сварных соединений.

В качестве параметров оптимизации (характеристик свойств) были выбраны $y_1 = v_{кр}$, мм/мин — стойкость против образования горячих трещин; $y_2 = \sigma_B$, МПа — прочность сварного шва; $y_3 = KCU$ — ударная вязкость образцов с U-образным надрезом, Дж/м²; $y_4 = KCV$ — то же с V-образным надрезом, Дж/м².

В качестве факторов были выбраны: x_1 — вид присадки ($x_1 = -1$ — Si; $x_1 = 0$ — Ni и $x_1 = +1$ — Co), а x_2 — их содержание (0,5; 1,0 и 1,5%).

Цель исследования — составление математической модели для определения оптимальной присадки с целью получения наилучших значений вышеуказанных характеристик.

Для проведения анализа был выбран двухфакторный план 3×3 [3], где 3 — три уровня первого фактора (Si, Ni, Co) и три уровня их содержания (0,5; 1,0 и 1,5%) по результатам проведенных опытов. Ошибку воспроизводимости опытов определяли как 5% от среднего значения параметра оптимизации. Во избежание влияния систематических ошибок и источников неоднородностей, опыты проводили в случайном (рандомизированном порядке).

Матрица плана и результаты испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1 — Матрица плана 3×3 и результаты испытаний

N	x_1	x_2	$x_1 x_2$	x_1^2	x_2^2	$y_1 = v_{кр}$	$y_2 = \sigma_B$	$y_3 = KCU$	$y_4 = KCV$
1	-	-	+	+	+	3,68	1873	680	320
2	-	0	0	+	0	3,00	1880	480	315
3	-	+	-	+	+	2,50	1870	280	240
4	0	-	0	0	+	3,92	1710	800	400
5	0	0	0	0	0	3,70	1800	720	400
6	0	+	0	0	+	3,46	1872	674	340
7	+	-	-	+	+	3,27	1886	600	286
7	+	0	0	+	+	4,00	1880	590	286
9	+	+	+	+	+	5,00	1875	540	257
	1 Y	2 Y	12Y	11 Y	22 Y	0Y ₁	0Y ₂	0Y ₃	0Y ₄

В этой таблице x_1 и x_2 — кодированные уровни факторов (-1, 0, +1) (для удобства единицы опущена); (1Y), (2Y), (12Y), т.д. — сумма произведений столбца $0Y_j$ (j — номер показателя) на столбцы соответствующего фактора. Например, для $y_1 = v_{кр}(0Y)_1 = 3,68 + 3,00 + 2,50 + 3,92 + 3,70 + 3,46 + 3,27 + 4,00 + 5,00 = 32,53$; $(1Y)_1 = -3,68 - 3,00 - 2,50 + 3,27 + 4,00 + 5,00 = 3,09$ и т.д.

На следующем этапе рассчитывали коэффициенты уравнений по формулам:

$$b_0 = A_0 \cdot (0Y) - A_{01} \cdot (0Y) - A_{02} \cdot (0Y) \quad (1)$$

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

$$b_{11} = A_{11}(11Y) - A_{01}(0Y), b_{22} = A_{22}(22Y) - A_{02}(0Y) \quad (3)$$

Значения коэффициентов $A_0, A_{01}, A_{02} \dots A_{11}$ и A_{22} берутся из таблиц [3]. Для плана 3×3 эти коэффициенты соответственно будут равны:

$A_0 = 0,55556, A_{01} = A_{02} = 0,33333, A_1 = A_2 = 0,16667; A_{12} = 0,25; A_{11} = A_{22} = 0,50$. Например, для $y_1 = v_{кр}$ $b_0 = 3,64; b_1 = 0,52; b_2 = 0,015; b_{12} = 0,73; b_{11} = -0,12; b_{22} = 0,075$.

Для проверки статистической значимости коэффициентов нужно рассчитать среднюю квадратическую ошибку этих коэффициентов по формулам:

$$S_{b_0} = \sqrt{A_0} \cdot S_3 \quad (4)$$

$$S_{b_i} = \sqrt{A_i} \cdot S_3 \quad (5)$$

$$S_{b_{ij}} = \sqrt{A_{ij}} \cdot S_3 \quad (6)$$

$$S_{b_{ii}} = \sqrt{A_{ii}} \cdot S_3 \quad (7)$$

Для $y_1 = v_{кр}$ $S_{b_0} = 0,134; S_{b_1} = S_{b_2} = 0,07344; S_{b_{12}} = 0,09; S_{b_{11}} = S_{b_{22}} = 0,127$.

Доверительный интервал Δb_i для всех коэффициентов определялся по формулам:

$$\Delta b_0 = \pm t \cdot S_{b_0} \quad (8)$$

$$\Delta b_1 = \Delta b_2 = \pm t \cdot S_{b_1} \quad (9)$$

$$\Delta b_{12} = \pm t \cdot S_{b_{12}} \quad (10)$$

$$\Delta b_{11} = \Delta b_{22} = \pm t \cdot S_{b_{ii}} \quad (11)$$

Для $y_1 = v_{кр}$ $\Delta b_0 = 0,303; \Delta b_1 = \Delta b_2 = 0,166; \Delta b_{12} = 0,204; \Delta b_{11} = \Delta b_{22} = 0,287$.

Значение критерия Стьюдента t берется из таблиц [3] при заданном уровне доверия α (обычно $\alpha \approx 0,05$) и степенях свободы f (у нас $f = 9$).

Таким образом, коэффициенты b_2, b_{11} и b_{22} оказались незначимы, т.к. их абсолютные значения меньше соответствующих $\Delta b_2, \Delta b_{11}$.

Заключительным этапом расчетов является проверка адекватности полученных уравнений:

$$y_1 = v_{кр} = 3,64 + 0,52x_1 + 0,73x_1x_2 \quad (12)$$

$$y_2 = \sigma_B = 1798 \quad (13)$$

$$y_3 = KCU = 732 + 48x_1 - 97x_2 + 85x_1x_2 - 203x_1^2 \quad (14)$$

$$y_4 = KCV = 398 - 28x_2 - 96x_1^2 - 87x_2^2 \quad (15)$$

Для этого находим расчетные значения $\hat{y}_1, \hat{y}_2, \hat{y}_3$ и \hat{y}_4 , подставляя в каждой строке кодированные уровни факторов, затем находим разность

между расчетным значением \hat{y}_i и экспериментальным y_3 ($\Delta y = \hat{y}_i - y_3$), затем возводим эту разность в квадрат (Δy_u^2) и суммируем их, т.е. $\sum_1^N \Delta y_u$, где u — номер строки плана, N — число опытов.

После этого определяем дисперсию адекватности $S_{ад}^2$ по формуле

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N \Delta y_u^2}{N-m} \quad (16)$$

где m — число значимых коэффициентов уравнения, включая b_0 .

Адекватность моделей проверялась по критерию Фишера F по формуле:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} \quad (17)$$

где S_y^2 — дисперсия параметра оптимизации ($S_y^2 = S_3^2$).

Если $F_p < F_{кр}$ (табличного) при заданном α и числе степеней свободы $f_1 = N - m$ (для числителя) и $f_2 = N - 1$ (для знаменателя). Табличные значения $F_{кр}$ берутся из таблиц [4]. Например, для $y_3 = 732 + 48x_1 - 97x_2 + 85x_1x_2 - 203x_1^2$ $S_{ад}^2 = \frac{4072}{9-5} = 1018$; $F_p = \frac{1018}{30^2} = 1,13 < F_{кр} = 3,8$ (при $\alpha = 0,05$; $f_1 = 4$; $f_2 = 8$), т.е. модель адекватна.

Заключительным этапом является интерпретация полученных адекватных моделей.

Например, анализ уравнения (12) показывает, что наибольшее влияние на $v_{кр}$ оказывает вид присадки (x_1), влияние содержания присадки (x_2) проявляется только во взаимодействии x_1x_2 . Максимальная величина $v_{кр} = 5,0$ мм/мин будет при $x_1 = +1$ и $x_2 = +1$, т.е. при использовании в качестве присадки кобальта, содержание которого должно быть 1,5%.

Литература

1. Присадочный материал для сварки высокопрочных конструкционных легированных сталей /Л.Л. Старова, В.Г. Ковальчук, М.Т. Борисов и др. // Сварочное производство. — 2005. — № 9. — С. 3—6.
2. Сварочные проволоки для высокопрочных сталей / В.Е. Лазько, Л.Л. Старова, В.Г. Ковальчук и др. // Сварочное производство. — 1993. — № 10. — С. 33—35.
3. Вознесенский В.А., Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. — М.: Статистика, 1974. — 192 с.
4. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. — М.: Машиностроение, София: Техника, 1980. — 304 с.