

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ СВАРКИ,
ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СВАРНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ.**

**СООБЩЕНИЕ 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЛЩИНЫ
СВАРИВАЕМОГО МЕТАЛЛА, ПОГОННОЙ ЭНЕРГИИ
СВАРКИ И СПОСОБА СВАРКИ НА СКОРОСТЬ НАГРЕВА**

А. Н. ШАВЕЛЬ, канд. физ.-мат. наук, **Е. С. ГОЛУБЦОВА**, д-р техн. наук
Белорусский национальный технический университет

Проведен статистический анализ влияния толщины металла, погонной энергии сварки и способа сварки на скорость нагрева.

***Ключевые слова:** сварные соединения, погонная энергия сварки, сварка с регулированием тепловых процессов, матрица плана, статистическая обработка результатов эксперимента.*

**RESEARCH OF THERMAL CYCLES OF WELDING,
DETERMINING THE STRUCTURE AND PROPERTIES
OF WELDED JOINTS.
MESSAGE 2. STUDY OF THE THICKNESS OF THE METAL
TO BE WELDED, WELDING ENERGY RATING
AND WELDING METHOD FOR THE HEATING RATE**

A. N. SHAVEL, Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences,
E. S. GOLUBTSOVA, Dr. of Engineering Sciences
Belarusian National Technical University

A statistical analysis of the influence of metal thickness, welding heat input and welding method on the heating rate was carried out.

***Keywords:** welded joints, welding heat input, welding with regulation of thermal processes, plan matrix, statistical processing of experimental results.*

В следующей серии опытов был проведен эксперимент по исследованию влияния толщины металла x_1 (8 и 11,5 мм), погонной энергии сварки x_2 (2,17 и 5,72 МДж/м) и способа сварки x_3 (с регулиро-

ванием тепловых процессов (РТЦ) и без применения РТЦ) на скорость нагрева w_n . Для проведения эксперимента был выбран план $N = 2^3$, где 2 – два уровня факторов, а 3 – количество факторов. Матрица плана и результаты опытов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Матрица ПФЭ $N = 2^3$

N	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	$y = w_n, \text{ } ^\circ\text{C/c}$
1	–	–	–	+	+	+	–	980
2	–	–	+	+	–	–	+	1050
3	–	+	–	–	+	–	+	570
4	–	+	+	–	–	+	–	700
5	+	–	–	–	–	+	+	430
6	+	–	+	–	+	–	–	750
7	+	+	–	+	–	–	–	330
8	+	+	+	+	+	+	+	500
Σ	–1250	–1150	650	370	250	–50	–170	5350

В таблице x_1 , x_2 и x_3 – кодированные уровни толщины проката, погонной энергии сварки и способа сварки (без РТЦ и с РТЦ); y – параметр оптимизации ($y = w_n, \text{ } ^\circ\text{C/c}$) соответственно.

Дисперсия параметров оптимизации составила $S_y^2 = 1118$ (определена была ранее), а ошибка воспроизводимости $S_y = 33,5 \text{ } ^\circ\text{C/c}$.

Обработка результатов эксперимента проводилась в соответствии с работой [1]. Были получены следующие значения коэффициентов регрессии:

$$b_0 = \frac{5350}{8} = 668,75; b_1 = -\frac{1250}{8} = -156,25;$$

$$b_2 = -\frac{1150}{8} = -143,75; b_3 = \frac{650}{8} = 81,25;$$

$$b_{12} = \frac{370}{8} = 46,25; b_{13} = \frac{250}{8} = 31,25;$$

$$b_{23} = -\frac{50}{8} = -6,25; b_{123} = -\frac{170}{8} = -21,25.$$

Дисперсия коэффициентов $S_{b_i}^2 = S_4^2 / N = \frac{1118}{8} = 139,75$; $S_{b_i} = 11,822$; $\Delta b_i = \pm t S_{b_i} = 2,306 \cdot 11,82 = 27,26$.

Коэффициенты $b_{23} = -6,25$ и $b_{123} = -21,25$ меньше $\Delta b_i = 27,26$ и, следовательно, незначимы.

Уравнение регрессии примет вид:

$$y = w_n = 669 - 156x_1 - 144x_2 + 81x_3 + 46x_1x_2 + 31x_1x_3. \quad (1)$$

Проверка адекватности этого уравнения по критерию Фишера подтвердила эту гипотезу, т. к. $F = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_y^2} = \frac{1964}{1118} = 1,757 < F_{\text{кр}} = 4,5$ (при $\alpha = 0,05$; $f_1 = 2$; $f_2 = 8$).

Таким образом, на скорость нагрева w_n наибольшее влияние оказывает x_1 (толщина металла). Чем она меньше, тем больше w_n . Существенно и влияние x_2 (погонной энергии): чем она меньше, тем больше w_n . Существенно и влияние способа сварки (x_3).

Сварка с РТЦ ($x_1 = +1$) позволяет повысить интенсивность нагрева. Максимальная величина скорости нагрева $y = w_n = 1050$ °C/с получена при $x_1 = -1$, $x_2 = -1$, $x_3 = +1$, т. е. при толщине проката 8 мм, погонной энергии сварки 2,17 МДж/м и АДС с РТЦ.

Таким образом, как видно из таблицы 1, а также полученного уравнения, при автоматической дуговой сварке (АДС) под флюсом по общепринятой технологии значения параметров изменяются в определенных пределах регулированием факторов. Например, при уменьшении погонной энергии сварки с 5,72 до 2,17 МДж/м скорость нагрева в околосшовном участке ЗТВ увеличивается с 330 до 980 °C/с. Применение технологии сварки с РТЦ позволяет повысить интенсивность нагрева до 1050 °C/с.

Применение принудительного сопутствующего охлаждения позволяет существенно расширить интервал регулируемых значений параметров термических циклов, в том числе при постоянной погонной энергии сварки. Такое охлаждение является наиболее эффективным средством воздействия на параметры теплового поля и при ЭШС. Подтверждением этого являются результаты следующего эксперимента, где изучалось влияние марки стали ($x_1 = -1$, 10Г2ФР;

$x_1 = 0$, 09Г2С; $x_1 = +1$, 12ХМ) и способа сварки ($x_2 = -1$, общепринятая; $x_2 = -1/3$, с РТЦ; $x_2 = +1/3$, с ГПМ и $x_2 = +1$, с РТЦ и ГПМ). ГПМ – гранулированный присадочный материал.

В качестве параметров оптимизации были выбраны скорость сварки $y_1 = v_{св}$, мм/с, $y_2 = \tau'$, $y_3 = \tau''$, $y_4 = \tau_c$ – время пребывания металла выше критической точки A_{c_3} при нагреве, охлаждении и суммарное значение соответственно; $y_5 = w_{8-5}$, °С/с – скорость охлаждения в интервале температур превращения аустенита 800–500 °С.

Для проведения эксперимента был выбран план 3×4, где 3 – три уровня марки стали, а 4 – четыре уровня способов сварки. Ошибки воспроизводимости соответственно составляли: $S_1 = 0,045$ мм/с; $S_2 = 3,9$ с; $S_3 = 12$ с; $S_4 = 12$ с; $S_5 = 0,37$ °С/с.

Матрица плана 3×4 и результаты опытов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Матрица плана 3×4

N	x_1	x_2	$x_1 x_2$	x_1^2	x_2^2	$y_1 = v_{св}$	$y_2 = \tau'$	$y_3 = \tau''$	$y_4 = \tau_c$	$y_5 = w_{8-5}$
1	–	–	+	+	+	0,610	45	150	195	3,8
2	–	–1/3	+1/3	+	+1/9	0,610	50	85	135	6,0
3	–	+1/3	–1/3	+	+1/9	0,122	10	155	165	8,0
4	–	+	–	+	+	0,123	12	85	97	9,6
5	0	–	0	0	+	0,330	60	180	240	0,1
6	0	–1/3	0	0	+1/9	0,330	43	80	123	1,28
7	0	+1/3	0	0	+1/9	0,380	55	140	195	2,0
8	0	+	0	0	+	0,330	50	125	175	2,5
9	+	–	–	+	+	0,360	40	170	210	1,8
10	+	–1/3	–1/3	+	+1/9	0,360	45	125	170	2,0
11	+	+1/3	+1/3	+	+1/9	0,580	20	155	175	1,8
12	+	+	+	+	+	0,580	19	115	134	1,2
\sum_1	0,416	–0,341	0,944	3,344	2,597	4,714	–	–	–	–
\sum_2	7	81,67	17	241	251	–	449	–	–	–
\sum_3	90	–121,7	–3,33	1040	907	–	–	1565	–	–
\sum_4	97	–203,3	13,70	1281	1158	–	–	–	2014	–
\sum_5	–21	8,87	–7,13	33,4	21,16	–	–	–	–	40,08

Статистическую обработку результатов экспериментов проводили по указанной выше методике.

Для плана 3×4 : $A_0 = 0,38021$; $A_{01} = 0,25$; $A_{02} = 0,23438$; $A_1 = 0,125$; $A_2 = 0,15$; $A_{12} = 0,225$; $A_{11} = 0,375$ и $A_{22} = 0,42188$.

В результате получим следующие уравнения в виде полиномов 2-го порядка:

$$y_1 = 0,348 + 0,052x_1 - 0,051x_2 + 0,212x_1x_2 + 0,076x_1^2; \quad (2)$$

$$y_2 = 52 - 12x_2 + 4x_1x_2 - 22x_1^2; \quad (3)$$

$$y_3 = 122,4 + 11,25x_1 - 18,25x_2 + 15,84x_2^2; \quad (4)$$

$$y_4 = 174 + 12x_1 - 30x_2 - 23x_1^2 + 17x_2^2; \quad (5)$$

$$y_5 = 1,7 - 2,6x_1 + 1,3x_2 - 1,6x_1x_2 + 2,9x_1^2 - 0,5x_2^2. \quad (6)$$

Из этих уравнений видно, что наибольшее влияние на скорость сварки, время τ' , τ'' и τ_0 оказывает способ сварки (x_2), влияние марки стали (x_1) меньше. На скорость охлаждения $y_5 = w_{8-5}$, °C/с большее влияние оказывает марка стали (x_1).

Список литературы

1. Вознесенский, В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. – Изд. 2-е. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 263 с.

References

1. Voznesenskij, V. A. *Statisticheskie metody planirovaniya eksperimenta v tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniyah* [Statistical methods of experiment planning in feasibility studies] / V. A. Voznesenski. Edition 2. – Moscow: Finansy i statistika Publ., 1981. – 263 p.

Поступила 16.10.2023

Received 16.10.2023