

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

**СООБЩЕНИЕ 1. ВЛИЯНИЕ ВИДА И ВРЕМЕНИ СВАРКИ
НА ТЕМПЕРАТУРУ ЦИКЛА**

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

Проведен статистический анализ влияния вида и времени сварки на температуру цикла сварки при автоматической дуговой сварке под флюсом и при электрошлаковой сварке для различных видов стали.

***Ключевые слова:** сварные соединения, температура цикла сварки, автоматическая дуговая сварка под флюсом, электрошлаковая сварка, матрица плана, статистическая обработка результатов эксперимента.*

**RESEARCH OF THERMAL CYCLES OF WELDING,
DETERMINING THE STRUCTURE AND PROPERTIES
OF WELDED JOINTS.**

**MESSAGE 1. INFLUENCE OF WELDING TYPE AND TIME
ON THE CYCLE TEMPERATURE**

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

A statistical analysis of the influence of the type and time of welding on the temperature of the welding cycle in automatic submerged arc welding and electroslag welding for various types of steel was carried out.

***Keywords:** welded joints, welding cycle temperature, automatic submerged arc, electroslag welding, plan matrix, statistical processing of experimental results.*

Как известно, от степени нагрева металла и характера распределения теплоты и деформаций в изделии зависят структурно-фазовые превращения, механические, технологические и эксплуата-

тационные свойства сварных соединений. Практически все процессы, протекающие в металлах при сварке, зависят от термических циклов сварки и в значительной степени определяются их параметрами. Важнейшими параметрами термических циклов сварки околошовного участка зоны термического влияния (ЗТВ) сварных соединений сталей, претерпевших полиморфное превращение, являются следующие: t_{\max} – максимальная температура цикла; w_n – скорость нагрева в интервале температур от температуры критической точки A_{c3} до t_{\max} ; τ' , τ'' и τ_0 – время пребывания металла выше этой точки, соответственно при нагреве, охлаждении и суммарное; $w_{800-500}$, $w_{600-500}$ – скорости охлаждения в интервалах температур превращения аустенита 800–500 и 600–500 °С, а также соответствующие этим интервалам температур длительность охлаждения $\tau_{800-500}$ и $\tau_{600-500}$; w – мгновенная скорость охлаждения при температуре наименьшей устойчивости аустенита t_{\min} [1].

На основе решения уравнения теплопроводности получены различные расчетные зависимости, широко используемые для определения термических циклов сварки и их параметров [2; 3]. Применение этих зависимостей во многих случаях обеспечивает удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных данных. Однако, в тех случаях, когда необходимо учесть температурную зависимость теплофизических свойств свариваемого металла, распределение источников нагрева по значительному объему, наличие тепловых стоков, например, при сварке с регулированием термических циклов (РТЦ) посредством сопутствующего охлаждения (ПСО), требуются новые подходы к решению задачи по определению параметров теплового поля сварки.

В этом случае весьма полезными могут быть методы статического планирования экспериментов, позволяющие не только сократить число опытов, но и получить эмпирические уравнения, устанавливающие количественную связь между исследуемыми параметрами (показателями) и влияющими на них факторами.

В настоящей работе исследовалось влияние вида и времени сварки на температуру цикла сварки при автоматической дуговой сварке (АДС) под флюсом (сталь 16ГФР толщиной прокатного листа 14 мм) и при электрошлаковой сварке (ЭШС) (сталь 10Г2ФР при толщине проката 40 мм).

Для проведения эксперимента был выбран план 2×3 , где 2 – два уровня способа сварки ($x_1 = -1$ – общепринятая сварка, $x_2 = +1$ – РТЦ), а 3 – три уровня времени сварки ($x_2 = -1, 0$ с; $x_2 = 0, 20$ с; $x_2 = +1, 40$ с).

Сварка с РТЦ производилась посредством принудительного сопутствующего охлаждения (ПСО).

Матрица плана эксперимента 2×3 и результаты опытов приведены в таблице 1, где x_1 и x_2 – кодированные уровни факторов, y_1 и y_2 – температура t , °С при АДС и ЭШС соответственно, N – номер опыта.

Таблица 1 – Матрица плана 2×3

N	x_1	x_2	$x_1 x_2$	x_2^2	y_1	y_2
1	–	–	+	+	0	600
2	–	0	0	0	720	1320
3	–	+	–	+	300	240
4	+	–	–	+	0	600
5	+	0	0	0	1080	1320
6	+	+	+	+	840	870
\sum_1	900	1140	540	1140	2940	–
\sum_2	630	–90	630	2310	–	4950
	(1Y)	(2Y)	(12Y)	(22Y)	(0Y)	(0Y)

Кодирование уровней факторов проводилось для количественных значений по формуле:

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

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

Для качественных факторов кодированные уровни устанавливаются исследователем.

Ошибка воспроизводимости опытов S_y составляет 5 % от средней величины для y : $S_{y_1} = 24,5$ °С и $S_{y_2} = 41,25$ °С.

Статистическую обработку результатов экспериментов проводили по формулам:

$$b_0 = A_0(0Y) - A_{01}(11Y) - A_{02}(22Y); \quad (2)$$

$$b_1 = A_1(1Y); b_2 = A_2(2Y); b_{12} = A_{12}(12Y); \quad (3)$$

$$b_{11} = A_{11}(11Y) - A_{01}(0Y); b_{22} = A_{22}(22Y) - A_{02}(0Y), \quad (4)$$

где b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – коэффициенты уравнения регрессии вида $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{22}x_2^2$. Значения $A_0, A_{01} \dots A_{22}$ приведены в таблице 2.19 [4]. Для плана 2×3 $A_0 = A_{02} = 0,5$; $A_1 = 0,1667$; $A_{01} = A_{11} = 0$; $A_2 = A_{12} = 0,25$; $A_{22} = 0,75$. $(0Y), (22Y), (1Y), (2Y), (12Y)$ и $(22Y)$ – алгебраическая сумма произведений столбца Y на соответствующие столбцы матрицы плана x_1, x_2, x_1x_2, x_2^2 (приведены внизу таблицы 1).

В результате обработки итогов эксперимента для АДС было получено уравнение:

$$y_1 = t, \text{ °С} = 900 + 150x_1 + 285x_2 + 135x_1x_2 - 615x_2^2. \quad (5)$$

Значимость коэффициентов уравнения (отличие от 0 в статическом смысле) определяли путем сравнения абсолютной величины коэффициента с их доверительными интервалами, которые рассчитываются по формулам:

$$\Delta b_0 = tS_y \sqrt{A_0}; \quad (6)$$

$$\Delta b_i = tS_y \sqrt{A_i}; \quad (7)$$

$$\Delta b_{ij} = tS_y \sqrt{A_{ij}}; \quad (8)$$

$$\Delta b_{ii} = tS_y \sqrt{A_{ii}}, \quad (9)$$

где t – табличное значение критерия Стьюдента при заданном уровне доверия (обычно $\alpha = 0,05$) и степенях свободы $f = 6$ (количество опытов).

В нашем случае $t = 2,447$, $S_y = 24,5$. Соответственно, $\Delta b_0 = 42,4$; $\Delta b_1 = 24,5$; $\Delta b_2 = \Delta b_{12} = 30$; $\Delta b_{22} = 52$ (для АДС).

Следовательно, все коэффициенты уравнения (5) значимы, т. к. их доверительные интервалы меньше их абсолютных значений.

Адекватность уравнения с помощью критерия Фишера проверяли путем сравнения дисперсии адекватности $S_{ад}^2$ с дисперсией параметра оптимизации S_y^2 .

Величину $S_{ад}^2$ определяли по формуле:

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N \Delta y_u^2}{N - m}, \quad (10)$$

где u – номер опыта, Δy_u – разность между расчетным и опытным значениями температуры для u -го опыта, N – число опытов, m – число значимых коэффициентов в уравнении (5), включая b_0 .

По расчетам $S_{ад}^2 = \frac{2700}{6-5} = 2700$. Тогда, согласно критерию Фишера, $F = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} = \frac{2700}{600} = 4,5$, что меньше табличного $F_{кр} = 6,61$ (при $\alpha = 0,05$; $f_1 = 1$; $f_2 = 5$), т. е. модель (5) адекватно описывает факторное пространство.

Анализ уравнения (5) показывает, что наибольшее влияние на параметр оптимизации ($y_1 = t$, °С) оказывает время сварки x_2 (τ , с). Максимальная величина $y_1 = 1080$ °С достигается при $x_1 = +1$ и $x_2 = 0$, т. е. при АДС с РТЦ и $\tau = 20$ с. Подставив в (5) $x_1 = +1$, получим $y_1 = 1050 + 420x_2 - 615x_2^2$. Это парабола с точкой перегиба $x_{2e} = \frac{420}{2 \cdot 615} = 0,34$ (при переходе к количественным переменным получим $\tau \approx 27$ с), в которой $y_1 = 1122$ °С. Следовательно, для получения максимальной температуры следует производить АДС с РТЦ при $\tau = 27$ с.

Обработка результатов y_2 (ЭШС) позволила получить адекватное уравнение (при ошибке воспроизводимости $S_y = 41,25$). $F = 10,3 < 10,9$ ($\alpha = 0,04$; $f_1 = 2$; $f_2 = 5$):

$$y_2 = t, \text{ } ^\circ\text{C} = 1320 + 105x_1 + 13158x_1x_2 - 743x_2^2. \quad (11)$$

Здесь также наибольшее влияние на y_2 оказывает x_2 (τ , с) в случае установки на уровнях 0, 150 и 300 с.

В следующей серии опытов исследовали интенсивность изменения температур на стадии нагрева термических циклов АДС по общепринятой технологии и с РТЦ в околошовном участке ЗТВ сварных соединений стали 17С при толщине проката 8 и 11,5 мм на погонной энергии 2,17 и 5,72 МДж/м.

В качестве параметра оптимизации (показателя термического цикла) была выбрана температура цикла ($y = t$, $^\circ\text{C}$), а в качестве факторов: способ сварки x_1 (общепринятая АДС и с РТЦ); толщина проката x_2 (8 и 11,5 мм); уровень погонной энергии сварки x_3 (q/v 2,17 и 5,72 МДж/м) и время сварки x_4 (τ , с = 8 и 16).

Для проведения эксперимента вначале был выбран дробный факторный эксперимент (ДФЭ) $N = 2^{4-1}$, N – число строк в матрице плана, 4 – число факторов.

Матрица плана и результаты эксперимента представлены в таблице 2, где x_1 , x_2 , x_3 и x_4 – кодированные уровни факторов.

Таблица 2 – Матрица ДФЭ $N = 2^{4-1}$

N	x_1	x_2	x_3	x_4	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$y = t, \text{ } ^\circ\text{C}$
1	+	+	+	+	+	+	+	665
2	-	+	+	-	-	-	+	1232
3	+	-	+	-	-	+	-	780
4	-	-	+	+	+	-	-	1131
5	+	+	-	-	+	-	-	716
6	-	+	-	+	-	+	-	1067
7	+	-	-	+	-	-	+	329
8	-	-	-	-	+	+	+	1025
Σ	-1965	415	671	-561	129	129	-444	6945

Во избежание влияния систематической ошибки опыты проводились в случайном (рандомизированном) порядке.

Ошибка воспроизводимости опытов была определена ранее по результатам 5-ти параллельных опытов на нижних уровнях факторов. Она оказалась равной $S_y = 43$ °С.

Статистическую обработку результатов эксперимента проводили по методике [4].

Коэффициенты уравнения рассчитывали по формуле:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} \cdot y_u}{N}, \quad (12)$$

где u – номер опыта, x_{iu} – уровень i -го фактора в u -ом опыте, y_u – температура в u -м опыте.

В результате получили уравнение:

$$y = 868 - 246x_1 + 52x_2 + 84x_3 - 70x_4 - 56x_2x_3 + 16x_1x_2 + 16x_1x_3. \quad (13)$$

Значимость коэффициентов уравнения проверяли путем сравнения их доверительного интервала (Δb_i) с абсолютной величиной коэффициента. Доверительный интервал определяли по формуле:

$$\Delta b_i = \pm t S_{b_i}, \quad (14)$$

где t – табличный критерий Стьюдента, S_{b_i} – средняя квадратическая ошибка в определении коэффициента b_i .

В нашем случае $t = 1,860$ ($\alpha = 0,1; f_1 = 8$); $S_{b_i} = \sqrt{S_y^2 - 231} = 15,2$; $\Delta b_i = 28,3$. Следовательно, коэффициенты $b_{12} = b_{13} = 16$ незначимы, т. к. они меньше 28,3.

Тогда уравнение (13) преобразуется в (13а):

$$y = 868 - 246x_1 + 52x_2 + 84x_3 - 70x_4 - 56x_2x_3. \quad (13а)$$

Адекватность этого уравнения проверяли с помощью критерия Фишера $F = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2}$, где $S_{ад}^2$ – дисперсия адекватности, определяемая по формуле

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N (y_u - \hat{y}_u)^2}{N - m}, \quad (15)$$

где y_u – экспериментальное значение параметра оптимизации в u -ом опыте, а \hat{y}_u – расчетное значение параметра оптимизации в u -ой строке.

В нашем случае $S_{ад}^2 = \frac{4165}{8-6} = 2082,5$; $F = \frac{2082,5}{1849} = 1,13 < F_{кр} = 4,2$ при $\alpha = 0,05$; $f_1 = 2$ и $f_2 = 7$. Следовательно, уравнение (13а) адекватно описывает процесс.

Анализ этого уравнения показывает, что наибольшее влияние на температуру t оказывает x_1 (АДС), остальные факторы оказывают меньшее влияние.

Максимальная величина $y = t, \text{ } ^\circ\text{C} = 1232 \text{ } ^\circ\text{C}$ получена при $x_1 = -1$; $x_2 = +1$; $x_3 = +1$ и $x_4 = -1$, т. е. при АДС с общепринятой технологией; толщине листа 11,5 мм; 5,72 МДж/м погонной энергии и $\tau_c = 8$ с.

Минимальная величина $y = t, \text{ } ^\circ\text{C} = 329 \text{ } ^\circ\text{C}$ получена при $x_1 = +1$; $x_2 = -1$; $x_3 = -1$ и $x_4 = +1$, т. е. при АДС с РТЦ; толщине листа 8 мм, $q/v = 2,17$ МДж/м и $\tau_c = 16$ с.

В следующем эксперименте время сварки изменялось в пределах 0, 8 и 16 с, и эксперимент проводился уже по трехфакторному плану $2 \times 2 \times 3$ для АДС по общепринятой технологии и АДС с РТЦ.

В этом эксперименте, как и в первом случае, $x_2 = 8$ и 11,5 мм; $x_3 = 2,17$ и 5,72 МДж/м и $x_4 = 0, 8$ и 16 с.

Матрица плана $2 \times 2 \times 3$ и результаты эксперимента приведены в таблице 3, где y_1 и y_2 – температура при сварке АДС и АДС с РТЦ соответственно, x_2, x_3 и x_4 – кодированные уровни толщины проката, погонной энергии и времени сварки.

Ошибки воспроизводимости опытов составили соответственно $S_1 = 36 \text{ } ^\circ\text{C}$ (общепринятая АДС) и $S_2 = 21,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ (АДС + РТЦ). Опыты проводились в случайном порядке.

Статистическую обработку результатов эксперимента проводили по ранее указанной методике [4]. Для плана $2 \times 2 \times 3$ $A_0 = A_{04} = 0,25$; $A_2 = A_3 = A_{23} = 0,08333$; $A_4 = A_{24} = A_{34} = 0,125$; $A_{44} = 0,375$.

Таблица 3 – Матрица плана 2×2×3

N	x_2	x_3	x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4	x_4^2	y_1	y_2
1	-	-	-	+	+	+	+	0	0
2	-	-	0	+	0	0	0	1025	535
3	-	-	+	+	-	-	+	871	329
4	-	-	+	-	-	+	-	0	0
5	-	-	+	0	-	0	0	1232	1025
6	-	-	+	+	-	-	+	1263	665
7	+	+	-	-	-	-	+	0	0
8	+	+	-	0	-	0	0	1128	716
9	+	+	-	+	-	+	-	871	458
10	+	+	+	-	+	-	-	0	0
11	+	+	+	0	+	0	0	1182	870
12	+	+	+	+	+	+	+	1132	561
\sum_1	-78	914	4137	-284	-131	653	4137	8704	-
\sum_2	91	1043	2013	-529	25	439	1973	-	5119

Расчеты коэффициентов проводили по формулам:

$$b_0 = A_0(0Y) - A_{04}(44Y) = 0,25(8704 - 4137) = 1142; \quad (16)$$

$$b_2 = A_2(2Y) = 0,08333(-78) = -6,5; \quad (17)$$

$$b_3 = A_3(3Y) = 0,08333 \cdot 914 = 76,2; \quad (18)$$

$$b_4 = A_4(4Y) = 0,125 \cdot 4137 = 517; \quad (19)$$

$$b_{23} = 0,08333(-284) = -23,7; \quad (20)$$

$$b_{24} = 0,125(-131) = -16,4; \quad (21)$$

$$b_{34} = 0,1215 \cdot 653 = 81,6; \quad (22)$$

$$b_{44} = 0,375 \cdot 4137 - 0,25 \cdot 8704 = -625. \quad (23)$$

Значимость этих коэффициентов определяли с помощью доверительных интервалов для каждой группы коэффициентов. Они

оказались равны: $\Delta b_0 = 32,3$; $\Delta b_2 = \Delta b_3 = \Delta b_{23} = 18,68$; $\Delta b_4 = \Delta b_{24} = \Delta b_{34} = 22,85$ и $\Delta b_{44} = 39,55$.

Следовательно, коэффициенты b_2 , b_{24} незначимы, а уравнение регрессии примет вид:

$$y = 1142 + 76x_3 + 517x_4 - 23x_2x_3 + 82x_3x_4 - 625x_4^2. \quad (24)$$

Проверка адекватности этого уравнения подтвердила эту гипотезу, т. к. $F = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} = 1,715 < F_{кр} = 3,1$ (при $\alpha = 0,05$; $f_1 = 6$ и $f_2 = 11$).

Анализ уравнения (24) показывает, что наибольшее влияние на функцию отклика (y_1) оказывает x_4 (время сварки); влияние остальных факторов на порядок меньше.

Максимальная величина $y_1 = 1263$ °С получена при $x_2 = -1$, $x_3 = +1$, $x_4 = +1$, т. е. при толщине проката 8 мм, погонной энергии $q/v = 5,72$ МДж/м и времени сварки 16 с.

Обработка результатов АДС с РТЦ (y_2) позволила получить адекватное уравнение (25) при ошибке воспроизводимости $S_y = 38,7$ °С (9 % от средней величины):

$$y = 787 + 87x_3 + 252x_4 - 44x_2x_3 + 55x_3x_4 - 540x_4^2. \quad (25)$$

Анализ этого уравнения показывает, что и в этом случае наибольшее влияние на функцию отклика оказывает x_4 (τ) – время сварки. Влияние q/v (x_3) существенно меньше, а влияние толщины проката (x_2) совсем незначительно (проявляется лишь во взаимодействии с погонной энергией).

Для оценки разницы между общепринятой технологией и РТЦ сравнивали дисперсии обоих экспериментов (S_1^2 и S_2^2) и их средние значения (\bar{y}_1 и \bar{y}_2).

Дисперсии по критерию Фишера $F = \frac{S_1^2}{S_2^2} = \frac{36,3^2}{38,7^2} = 0,88 < F_n = 2,82$ ($\alpha = 0,05$; $f_1 = 11$ и $f_2 = 11$) однородны. Средневзвешенная дисперсия будет равна $S^2 = \frac{36,3^2 + 38,7^2}{2} = 1407,69$, откуда ошибка

воспроизводимости $S = \sqrt{1407,69} = 37,52$. Число степеней свободы $f = 22$. Из таблицы в приложении 1 [4] находим $t_{0,95} = 2,07$, поэтому

$$t_{0,95} S \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} = 2,07 \cdot 37,52 \sqrt{\frac{2}{24}} = 12,9.$$

$$\text{Видно, что } \Delta y = \bar{y}_1 - \bar{y}_2 = \frac{8704}{12} - \frac{1519}{12} = 298,75 \approx 300 \text{ } ^\circ\text{C} \gg 12,9.$$

Следовательно, при 5%-м уровне значимости разницу между общепринятой технологией и технологией с РТЦ можно считать весьма значительной.

Список литературы

1. Абрамова, З. А. Изготовление крупногабаритной нефтеаппаратуры из сталей, не требующих высокотемпературной термической обработки / З. А. Абрамова, С. А. Румянцева // Экспресс-информация. Серия ХМ 3. – М.: ЦИНТИ-химнефтемаш, 1979. – № 12. – 9 с.

2. Рыкалин, Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М.: Машгиз, 1951. – 296 с.

3. Ion, J. C. A Second Report on diagrams of microstructure and Hardness for Heat-Affected Zones in welds / J. C. Ion, K. E. Earterling, M. F. Ashby // Acta metal. – 1984. – Vol. 32, No 11. – P. 1949–1962.

4. 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. Abramova, Z. A. *Izgotovlenie krupnogabaritnoj nefteapparatury iz stalej, ne trebuyushchih vysokotemperaturnoj termicheskoj obrabotki* [Manufacturing of large-sized oil equipment from steels that do not require high-temperature heat treatment] / Z. A. Abramova, S. A. Rumyanцева // *Ekspress-informaciya. Seriya HM 3 = Express information. XM series 3.* – Moscow: CINTI-himneftemash Publ., 1979. – No 12. – 9 p.

2. Rykalin, N. N. *Raschety teplovyh processov pri svarke* [Calculations of thermal processes during welding] / H. H. Rykalin. – Moscow: Mashgiz Publ., 1951. – 296 p.

3. Ion, J. C. A Second Report on diagrams of microstructure and Hardness for Heat-Affected Zones in welds / J. C. Ion, K. E. Earterling, M. F. Ashby // *Acta metal.* – 1984. – Vol. 32, No 11. – P. 1949–1962.

4. Voznesenskij, V. A. *Statisticheskie metody planirovaniya eksperimenta v tekh-niko-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