

32. Воронин, Н.А. Топокомпози́ты – новый класс конструкционных материалов триботехнического назначения. Ч. 1 / Н.А. Воронин // Трение и износ. – 1999. – Т. 20 – № 3 – С. 533–544.

УДК 669.14:539.3+621.785.72

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

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ЛАЗЕРНОЙ
СВАРКИ И ЕЕ КОМБИНАЦИИ СО СВАРКОЙ ТИГ
ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ
СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ СИСТЕМЫ Fe-Cr-Mn-Si.
Сообщение 1. ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ СВАРИВАЕМОГО
МЕТАЛЛА НА ВЕЛИЧИНУ УДЕЛЬНОГО РАСХОДА
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ПОГОННОЙ ЭНЕРГИИ СВАРКИ**

Лазерная сварка на сегодняшний день является наиболее современным способом сварки металлических частей и поэтому привлекает к себе все большее внимание, поскольку в некоторых случаях этот вид сварки может оказаться единственным процессом, который может обеспечить качественное соединение трудносвариваемых материалов и конструкций. Основная трудность, возникающая при лазерной сварке – это стык, который должен быть безззорным. При зазоре даже в десятые доли миллиметра металл может потечь, что снизит прочность сварного соединения [1, 2].

Для преодоления этого негативного явления лазерную сварку комбинируют с различными традиционными видами сварки, такими как МИГ, ТИГ или плазменной сваркой (гибридная лазерная сварка), а при добавлении присадочного материала в процесс можно получить удовлетворительное качество соединения даже при большом и неровном зазоре стыка [3, 4].

В настоящей работе приведены результаты исследования влияния различных технологических факторов лазерной сварки на удельный расход электроэнергии $P/v_{св}$ и погонной энергии $q/v_{св}$ при

однопроходной сварке лазером мощностью 4,4 кВт, а также при комбинации со сваркой ТИГ.

В исследованиях использован план эксперимента 2×3 , где 2 – два кодированных уровня сварки ($x_1 = -1$) и способа сварки ($x_1 = +1$), а 3 – три кодированных уровня толщины свариваемой стали ($x_2 = -1, -3$ мм; $x_2 = 0, -5$ мм; $x_2 = +1, -9$ мм).

В качестве параметров оптимизации были выбраны $y_1 = P/v_{св}$; $y_2 = q/v_{св}$ (удельный расход электроэнергии и погонная энергия сварки $q/v_{св}$, $v_{св}$ – скорость сварки, м/ч).

Все исходные материалы для построения графиков формировались с помощью специальной программы, данные для которой предварительно представлялись в соответствующем формате согласно спецификации графического пакета. Для подготовки массивов данных для построения графиков разработана специальная программа на языке FORTRAN для персонального компьютера.

Матрица плана 2×3 представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Матрица плана 2×3 и результаты эксперимента по выполнению способа сварки и толщины листа на $P/v_{св}$ и $q/v_{св}$

№	x_1	x_2	$x_1 x_2$	x_2^2	$y_1 = P/v_{св}$	$y_2 = q/v_{св}$	Примечание
1	–	–	+	+	0,02	0,072	$P/v_{св}$, кВт·/м
2	–	0	0	0	0,10	0,360	
3	–	+	–	+	0,25	0,972	
4	+	–	–	+	0,04	0,360	$q/v_{св}$, кДж/мм
5	+	0	0	0	0,015	1,152	
6	+	+	+	+	0,015	2,615	
Σ_1	–0,3	0,205	–0,255	0,325	0,44	–	
Σ_2	2,723	3,227	1,355	4,019	–	5,531	

В таблице 1 x_1 и x_2 – кодированные уровни факторов. Ошибки экспериментов соответственно составляли: $S_1 = \frac{0,44}{120} = 0,00367$ (5 % от среднего значения); $S_2 = 0,046$ (5 % от y_2).

Обработку результатов эксперимента проводили по методике [5]. Коэффициенты уравнений определяли по формулам:

$$\hat{a}_0 = A_0(0\hat{o}) - A_{02}(22\hat{o}) ; \quad (1)$$

$$\hat{a}_1 = A_1(1\acute{o}); \hat{a}_2 = A_2(2\acute{o}); \quad (2)$$

$$\hat{a}_{12} = A_{12}(12\acute{o}); \quad (3)$$

$$\hat{a}_{22} = A_{22}(22\acute{o}) - A_{02}(0\acute{o}); \quad (4)$$

где (0у); (1у)...(22у) алгебраические суммы произведений столбца у_i на соответствующие столбцы матрицы (x₁; x₂; x₁x₂ и x₂²) – приведены в нижних строках таблицы 1.

Коэффициенты A₀; A₀₂; A₁; ...; A₂₂ брали из таблицы 2 [5]. Для плана 2×3 они соответственно были равны: A₀ = 0,5; A₀₁ = 0; A₀₂ = 0,5; A₁ = 0,16667; A₂ = A₁₂ = 0,25; A₁₁ = 0; A₂₂ = 0,75.

После расчетов по формулам (1)–(4) получили следующие значения коэффициентов ϵ_i :

для у₁ $\epsilon_0 = 0,0575$; $\epsilon_1 = -0,0501$; $\epsilon_2 = 0,0513$; $\epsilon_{12} = -0,064$; $\epsilon_{22} = 0,024$.

Значимость этих коэффициентов определяли путем сравнения их абсолютных значений ϵ_i с их доверительными интервалами $\Delta\epsilon_i$, которые определяли по формуле $\Delta\hat{a}_i = t \cdot S_y \sqrt{A_i}$, где t – коэффициент Стьюдента (t = 1,943 при $\alpha = 0,1$ и f = 5), S_y – ошибка опытов, A_i – значения соответствующих коэффициентов (A₀, A₁, A₂, A₁₂, ..., A₂₂).

Оказалось, что $\Delta\hat{a}_0 = t \cdot S_y \sqrt{A_0} = 1,943 \cdot 0,00367 \cdot \sqrt{0,5} = 0,0114$; $\Delta\epsilon_1 = 0,0066$; $\Delta\epsilon_2 = \Delta\epsilon_{12} = 0,004$; $\Delta\epsilon_{22} = 0,014$, т.е. все коэффициенты уравнения ϵ_i значимы.

Тогда уравнение регрессии:

$$y_1 = P/V_{св} = 0,058 - 0,05x_1 + 0,05x_2 - 0,064x_1x_2 + 0,024\delta_2^2. \quad (5)$$

Графическое представление полученной модели дано на рисунке 1.

Проверка адекватности этого уравнения (при S₁ = 0,00367) подтвердила эту гипотезу, т.к. дисперсия адекватности S_{аа}², определяемая по формуле

$$S_{\text{аа}}^2 = \frac{\sum_{n=1}^N \Delta y_n^2}{N - m}, \quad (6)$$

оказалась равной $S_{\text{аа}}^2 = \frac{0,000178}{6 - 5} = 0,000178$.

В формуле (6) N – число опытов в матрице плана ($N = 6$), Δy_n – разность между расчетным и экспериментальными значениями y в n -й строке матрицы, m – число значимых коэффициентов в уравнении (5), т.е. $m = 5$.

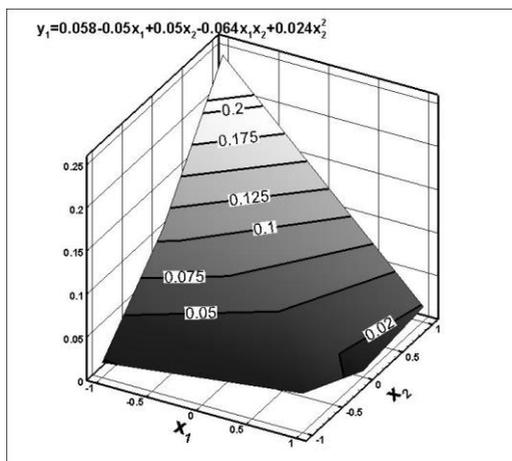


Рисунок 1 – Графическое представление уравнения (5)

Критерий Фишера $F = \frac{S_{\text{аа}}^2}{S_{\text{о}}^2}$, определяемый для проверки адекватности уравнения (5), оказался равным $F = \frac{0,000178}{0,000367^2} = 13,2 <$

$< F_{\text{кр}} = 16,8$ при $\alpha = 0,01$, $f_1 = 1$ и $f_2 = 5$.

Анализ уравнения (5) показывает, что наибольшее влияние на удельный расход электроэнергии y_1 оказывает толщина свариваемого металла (x_2). Минимальное значение этого параметра $y_1 = 0,015$ кВт·ч/м будет при $x_1 = +1$ (лазерная сварка + ТИГ) и $x_2 = 0$ (6 мм).

При обработке результатов, полученных для $y_2 = q/v_{\text{св}}$ получили уравнение:

$$y_2 = q/V_{\text{св}} = 0,756 + 0,0466x_1 + 0,806x_2 + 0,339x_1x_2 + 0,249\delta_2^2. \quad (7)$$

На рисунке 2 дана графическая интерпретация полученной модели (7).

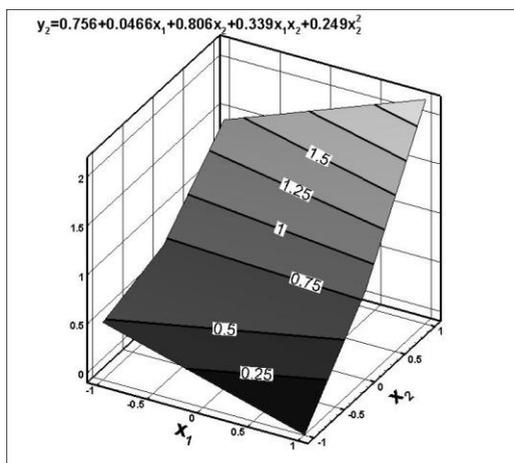


Рисунок 2 – Графическая интерпретация модели (7)

Коэффициенты этого уравнения также оказались значимыми (> 0), т.к. их доверительные интервалы Δb_i были такими (при $S_2 = 0,046$); $\Delta b_0 = 0,063$; $\Delta b_1 = 0,037$; $\Delta b_2 = \Delta b_{12} = 0,045$; $\Delta b_{22} = 0,078$.

Проверка адекватности уравнения (7) также подтверждает эту гипотезу, поскольку $S_{\text{дд}}^2 = 0,011233$, а $F = \frac{0,011233}{0,02116} = 0,531 < 1$.

И в этом случае наибольшее влияние на $y_2 = q/v_{\text{св}}$ оказывает толщина свариваемой пластины x_2 . Минимальная величина погонной энергии будет при $x_1 = -1$ (сварка при 4,4 кВт) и $x_2 = -1$ (толщина 3 мм), $y_{\text{max}} = 2,615$ будет при $x_1 = +1$ и $x_2 = +1$, т.е. при толщине свариваемой пластины 9 мм и (лазерная сварка + ТИГ).

Представляет некоторый интерес тот факт, что между толщиной металла (x) и $y_1 = P/v_{\text{св}}$ и $y_2 = q/v_{\text{св}}$ существует тесная корреляционная связь, т.к. коэффициенты парной корреляции r_{xy} , будут равны $r_{xy1} = 0,985$; $r_{xy2} = 0,979$; $r_{xy3} = -0,866$ и $r_{xy4} = 0,986$ (таблица 2), где y_3 и y_4 для комбинированного способа сварки.

Таблица 2 – Расход электроэнергии $P/v_{св}$ и погонной энергии $q/v_{св}$ при однопроходной сварке различных толщин металла лазером и комбинированном способе сварки

Виды расхода электро- энергии	x – толщина, мм			Примечание
	3	6	9	
$y_1 = P/v_{св}$	0,02	0,10	0,25	4,4 кВт
$y_2 = q/v_{св}$	0,072	0,36	0,972	
$y_3 = P/v_{св}$	0,04	0,015	0,015	А-ТИГ
$y_4 = q/v_{св}$	0,36	1,152	2,615	

Коэффициенты r_{xy} определяли по формуле:

$$r_{\hat{o}\hat{o}} = \frac{\sum_1^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_1^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_1^N (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (8)$$

где x_i, \bar{x} – текущее и среднее значения одного из параметров (например, толщина металла); y_i, \bar{y} – текущее и среднее значение другого параметра (например, $y = P/v_{св}$). Если $r_{xy} > r_{табл}$ при $\alpha = 0,1$ и N , то $y = a + vx$.

В нашем случае $r_{кр} = 0,805$ при $\alpha = 0,1$ и $n = 3$.

Коэффициенты a и v определяются по формулам:

$$\hat{a} = \frac{\sum_1^i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_1^i (x_i - \bar{x})^2}; \quad (9)$$

$$\hat{a} = \bar{Y} - \hat{a}\bar{X}. \quad (10)$$

В результате связь между параметрами (таблица 2) можно выразить системой линейных уравнений:

$$y_1 = P/v_{св} \text{ (при 4,4 кВт)} = 0,038 x - 0,107; \quad (11)$$

$$y_2 = q/v_{св} \text{ (при 4,4 кВт)} = 0,15 x - 0,432; \quad (12)$$

$$y_3 = P/v_{\text{св}} \text{ (комбинированный способ сварки)} = 0,048 - 0,004x; \quad (13)$$

$$y_4 = q/v_{\text{св}} \text{ (комбинированный способ сварки)} = 0,376x - 0,088. \quad (14)$$

Литература

1. **Сущность** и основные преимущества сварки лазерным лучом [www/ svarkainfo.ru>rus/technology/laser](http://www.svarkainfo.ru>rus/technology/laser)

2. **Технологические** особенности лазерной сварки среднеуглеродистой легированной стали / В.М. Куглик [и др.] // Автоматическая сварка. – 2012. – С.11–14.

3. **Bagger, C.** Review of laser hybrid welding / C. Bagger, F.O. Olsen // J. Laser Applications. – 2005. – V. 17, N 1. – P. 2–14.

4. **Abe, N.** Trends in laser arc combination welding methods / N. Abe, M. Hayashi // Welding International. – 2002. – V. 16, N 2. – P. 94–98.

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

УДК 669.14:539.3+621.785.72

Е.С. ГОЛУБЦОВА, д-р техн. наук (БНТУ),
Н.Б. КАЛЕДИНА (БГТУ),
Л.С. ШУМАНСКАЯ (БНТУ)

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ И ЕЕ КОМБИНАЦИИ СО СВАРКОЙ ТИГ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ СИСТЕМЫ Fe-Cr-Mn-Si. Сообщение 2. ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ МЕТАЛЛА, СОСТАВА ЗАЩИТНОГО ГАЗА НА СКОРОСТЬ СВАРКИ, ВЕЛИЧИНУ ПОГОННОЙ ЭНЕРГИИ И ШИРИНУ СВАРНЫХ ШВОВ

В следующей серии экспериментов исследовали влияние толщины металла ($x_i = -1$ (3 мм) и $x_i = +1$ (6 мм)) при $P = 4,4$ кВт и состава защитного газа ($x_2 = -1$ (CO₂); $x_2 = 0$ (Ar) и $x_2 = +1$ (Ar + 17 % CO₂ + 4 % O₂)) на скорость сварки $y_1 = v_{\text{св}}$, м/ч, величину по-