

Е.С. ГОЛУБЦОВА, д-р техн. наук,  
А.В. ЖЕМОЙТА,  
С.В. ЮРЕВИЧ (БНТУ)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ХРОМА, ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА, ВРЕМЕНИ ВЫДЕРЖКИ НА ШИРИНУ ФЕРРИТНОЙ И НАУГЛЕРОЖЕННОЙ ПРОСЛОЙКИ В ОБРАЗЦАХ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКОЙ**

Одним из применений лазера в машиностроительных технологиях является соединение элементов сваркой. Сущность процесса сварки электронным лучом в вакууме состоит в применении кинетической энергии электронов, быстро движущихся в глубоком вакууме. При использовании электронного луча, обладающего большой плотностью энергии, обнаруживается ярко выраженное направленное тепловое воздействие, при этом фокусировкой электронного луча можно получать пятно нагрева диаметром 0,0002–5 мм, что позволяет за один проход сваривать металлы толщиной от десятых долей миллиметра до 200 мм. В результате можно получить швы, в которых соотношение глубины провара к ширине составляет до 20:1 и более. Как показывают результаты [1], уменьшение протяженности зоны термического влияния снижает вероятность рекристаллизации основного металла в этой зоне.

При изготовлении сварных комбинированных конструкций качество изделий определяется не только отсутствием дефектов после электронно-лучевой сварки (ЭЛС), но и возможностью образования диффузионных прослоек в зоне сварного соединения в процессе термической обработки и дальнейшей эксплуатации при высоких температурах. Данное явление связано с диффузионным перераспределением углерода в процессе выдержки при высоких температурах и приводит к появлению науглероженных и обезуглероженных слоев у линии сплавления, что снижает механические свойства сварных соединений и может являться причиной преждевременного разрушения конструкций [2].

После ЭЛС диффузионные прослойки формируются в основном в процессе реактивной диффузии углерода в области сварного соединения с большим содержанием карбидообразующих элементов. Карбидообразующими в данном случае будут элементы, обладающие большим сродством к углероду, чем железо, и способные образовывать стойкие карбиды. В рассматриваемых сталях карбидообразующим элементом является хром, при этом у линии сплавления со стороны основного металла с меньшим содержанием хрома следует ожидать образование обезуглероженной ферритной прослойки, а в металле шва – слоя с повышенным содержанием карбидов хрома.

В данной статье выполнено исследование влияния содержания хрома и времени выдержки при температурах 550 и 650 °С на ширину ферритной и науглероженной прослойки в образцах из сталей 12ХМ и 12Х13, полученных ЭЛС. Сварку проводили на четырех режимах (табл. 1) с различной фокусировкой электронного пучка и переменным смещением оси пучка от плоскости стыка, обеспечивая при этом одинаковую глубину проплавления. Это позволило получить сварные швы различной ширины. Переменное смещение оси пучка обеспечило в каждом сечении шва различную степень проплавления, а, следовательно, различное содержание карбидообразующих элементов (в данном случае хрома).

Таблица 1 – Режимы сварки

Номер режима сварки	$I$ , мА	$P$ , кВт
1	110	4,4
2	160	6,4
3	220	8,8
4	260	10,4

Примечание: для всех режимов  $V_{св} = 18$  м/ч,  $U = 40$  кВ.

По результатам исследований выбрали образцы с различным содержанием хрома в металле шва для проведения термической обработки, которую осуществляли при 550 и 650 °С, выдерживая при каждой температуре по 9 образцов. Время выдержки каждой группы образцов составляло ст 0 до 100 ч. Непосредственно после сварки и каждого этапа термической обработки исследовали микро-

структуру, при этом определяли ширину образующейся ферритной прослойки и слоя с повышенным содержанием карбидов.

Измерение микротвердости различных зон сварного соединения проводили с использованием прибора ПМТ-3 с нагрузкой на индентор 2Н. Для проведения опытов был использован план  $3 \times 3$  [3] второго порядка, где 3 – три уровня содержания хрома ( $x_1$ ) и три уровня времени выдержки ( $x_2$ ). Вначале исследовали влияние этих факторов на ширину науглероженной прослойки при выдержке при температуре 550 °С ( $y_1$ ) затем при температуре 650 °С ( $y_2$ ). Результаты эксперимента приведены в таблице 2.

Примечание:  $x_1, x_2$  – кодированные уровни факторов (содержание хрома и время выдержки);  $y_1$  – ширина науглероженной прослойки в (мм) при температуре 550 °С;  $y_2$  – то же при температуре 650 °С;  $y_3$  – ширина ферритной прослойки при температуре 650 °С;  $y_4$  – HV.

В первой серии опытов ( $t = 550$  °С) содержание хрома ( $x_1$ ) составило 5,34; 7,69 и 10,7 %, а время выдержки ( $x_2$ ) – 0; 50 и 100 ч. Ошибка воспроизводимости опытов  $S_1 = 0,0022$ .

Расчет коэффициентов уравнения проводился по формулам [3]:

$$b_0 = A_0(0Y) - A_{01}(11Y) - A_{02}(22Y); \quad (1)$$

$$b_i = A_i(iY); \quad (2)$$

$$b_{ij} = A_{ij}(ijY); \quad (3)$$

$$b_{ii} = A_{ii}(iiY) - A_0(0Y), \quad (4)$$

где коэффициенты  $A_0, A_{0i}, A_i, A_{ij}, A_{ii}$  взяты из таблиц [3]. Для плана  $3 \times 3$  они соответственно составили:

$$A_0 = 0,55556; A_{0i} = A_{02} = 0,33333; A_1 = A_2 = 0,16667; A_{12} = 0,25; \\ A_{11} = A_{22} = 0,50,$$

где  $(0Y); (iY); (ijY); (iiY)$  – алгебраические суммы произведений столбца  $Y_i$  на столбцы матриц (приведены в нижней части табл. 2 –  $\Sigma_1$ ).

В результате получено уравнение, устанавливающее количественную связь между шириной науглероженной прослойки ( $y_1$ ) и исследуемыми факторами в виде:

$$y_1 = 0,044 - 0,018x_1 + 0,04x_2 - 0,019x_1x_2 + 0,007x_1^2 - 0,007x_2^2. \quad (5)$$

Проверку значимости коэффициентов проводили, сравнивая величину доверительного интервала коэффициента  $\Delta b_i$ , с абсолютным значением коэффициента  $b_i$ . Если  $\Delta b_i > b_i$ , то  $b_i$  незначим.

Доверительный интервал  $\Delta b_i$  определили для каждой группы коэффициентов по формулам:

$$\Delta b_0 = t \cdot S_3 \cdot \sqrt{A_0}; \quad (6)$$

$$\Delta b_i = t \cdot S_3 \cdot \sqrt{A_i}; \quad (7)$$

$$\Delta b_{ij} = t \cdot S_3 \cdot \sqrt{A_{ij}}; \quad (8)$$

$$\Delta b_{ii} = t \cdot S_3 \cdot \sqrt{A_{ii}}, \quad (9)$$

где  $t$  – коэффициент Стьюдента,  $S_3$  – ошибка опыта.

В нашем случае:  $t = 2,262$  для  $N = 9$ :

$$\Delta b_0 = 2,262 \cdot 0,00212 \sqrt{0,55556} = 0,00358 < 0,043.$$

$$\Delta b_1 = \Delta b_2 = 2,262 \cdot 0,00212 \sqrt{0,16667} = 0,00196 < 0,018 \text{ и } 0,04.$$

$$\Delta b_{12} = 2,262 \cdot 0,00212 \sqrt{0,25} = 0,0024 < 0,019.$$

$$\Delta b_{11} = \Delta b_{22} = 2,262 \cdot 0,00212 \sqrt{0,50} = 0,00339 < 0,008.$$

Таблица 2 – Матрица плана 3×3 и ширины науглероженной и ферритной прослойки

№	$x_1$	$x_2$	$x_1x_2$	$x_1^2$	$x_2^2$	$y_1, \text{мм}$	$y_2, \text{мм}$	$y_3, \text{мм}$	$y_4=\text{HV}$
1	-	-	+	+	+	0,002	0,00	0,40	135
2	-	0	0	+	0	0,068	0,20	0,74	138
3	-	+	-	+	+	0,120	0,28	0,91	140
4	0	-	0	0	+	0,003	0,00	0,40	213
5	0	0	0	0	0	0,044	0,25	0,66	250
6	0	+	0	0	+	0,077	0,29	0,97	269
7	+	-	-	+	+	0,004	0,00	0,51	250
8	+	0	0	+	0	0,033	0,16	0,80	288
9	+	+	+	+	+	0,046	0,21	1,00	338
$\Sigma_1$	-0,107	0,04	-0,019	0,269	0,238	0,397	-	-	-
$\Sigma_2$	-0,11	0,78	-0,07	0,85	0,78	-	1,39	-	-
$\Sigma_3$	0,26	1,57	-0,02	4,36	4,19	-	-	6,39	-
$\Sigma_4$	463	149	83	1289	1345	-	-	-	2021

Следовательно, все коэффициенты уравнения (5) значимы.

Проверку адекватности уравнения (5) проводили по известной схеме: подставили кодированные уровни  $x_1$  и  $x_2$  в уравнение (5), получали для каждой  $u$ -ой строки матрицы расчетное значение параметра оптимизации  $y_u$ , затем находили разность между расчетным и экспериментальным значениями в каждой строке  $\Delta y_u = y_u - y_3$ , возводили эту разность в квадрат ( $\Delta y_u^2$ ) и находили сумму этих квадратов  $\sum_{u=1}^N \Delta y_u^2$ , по которой определяли дисперсию адекватности  $S_{ад}^2$ , характеризующей рассеяние, вызванное экспериментальных и расчетных величин параметра оптимизации, по формуле:

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

где  $N$  – число опытов (строк) в матрице,  $m$  – число значимых коэффициентов уравнения (5), включая  $b_0$ .

$$\text{В нашем случае } S_{ад}^2 = \frac{2,90 \cdot 10^{-5}}{9 - 6} = 9,67 \cdot 10^{-6}.$$

Адекватность уравнения определяем с помощью критерия Фишера  $F$  по формуле

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} = \frac{9,67 \cdot 10^{-6}}{0,00218^2} = 2,034 < F_p = 4,1, \quad (11)$$

где  $S_y^2$  – дисперсия параметра оптимизации, т. е.  $S_3^2$ .

Табличное значение  $F_{кр} = 4,1$  (при  $\alpha=0,05$ ,  $f_1=3$  и  $f_2=8$ ) больше  $F_p = 2,034$ , т. е. модель адекватна.

После обработки результатов опытов второй, третьей и четвертой серии получим адекватные уравнения:

$$y_2 = 0,229 - 0,018x_1 + 0,130x_2 - 0,018x_1x_2 - \\ - 0,038 x_1^2 - 0,073 x_2^2. \quad (12)$$

При  $t = 650$  °С,  $S_3 = 0,00772$ , содержания хрома 7,75; 9,44 и 11,12 %, и выдержке 0,50 и 100 ч:

$$y_3 = 0,70 + 0,04x_1 + 0,26x_2. \quad (13)$$

Ширина ферритной прослойки при содержании хрома 4,8; 7,8 и 11,1 %,  $t = 650$  °С, выдержке 20, 60 и 100 ч:

$$y_4 = HV = 245 + 72x_1 + 25x_2 + 21x_1x_2 - 29 x_1^2, \quad (14)$$

где  $x_1$  – место шва;  $x_2$  – содержание хрома (4,7 и 10 %).

Выполненный анализ уравнения (5) показывает, что наибольшее влияние на ширину науглероженной прослойки ( $y_1$ ) оказывает время выдержки ( $x_2$ ): чем оно выше, тем больше ширина прослойки. Максимальная величина этого параметра  $y_1 = 0,125$  мм будет при  $x_1 = -1$ ; и  $x_2 = +1$ , т. е. при содержании хрома 5,34 % и времени выдержки 0. Выдержка образцов при 550 °С уже в течение 10 ч привела к формированию слоя с повышенным содержанием карбидов в металле шва, однако начало образования ферритной прослойки со стороны стали 12ХМ отмечено только в образцах с высоким содержанием хрома после выдержки в течение 100 ч.

Анализ уравнения (12) ( $t = 650$  °С) показывает, что при содержании хрома 7,75, 9,44 и 11,2 % и выдержке 0,50 и 100 ч наибольшее влияние на ширину науглероженной прослойки ( $y_2$ ) также оказывает время выдержки ( $x_2$ ). Влияние содержания хрома ( $x_1$ ) в этих пределах намного ниже, чем времени выдержки. Максимальная ширина такой

прослойки  $y_2 = 0,29$  мм будет при  $x_1 = 0$ ; и  $x_2 = +1$ , т. е. при содержании хрома 9,44% и 100 ч выдержки, минимальная ширина прослойки ( $y_2 \approx 0$ ) – при  $x_2 = 0$  ч. Обращает на себя внимание, что увеличение температуры выдержки с 550 до 650 °С при прочих равных условиях приводит к существенному росту ширины науглероженной прослойки. Увеличение ширины прослойки связано с исчерпанием карбидообразующего элемента у линии сплавления и образованием карбидов в более удаленных слоях металла шва.

Интенсивное образование ферритных прослоек происходит на образцах, которые выдерживали при 650 °С. Из уравнения (13) видно, что и здесь наибольшее влияние оказывает время выдержки ( $x_2$ ), влияние содержания хрома ( $x_1$ ) примерно в 4 раза меньше, чем время выдержки. При увеличении времени выдержки ширина ферритной прослойки и слоя карбидов увеличивается, а скорость роста ширины прослойки уменьшается.

Твердость, как это следует из уравнения (14), в первую очередь зависит от зоны ее измерения. Влияние места измерения ( $x_1$ ) более чем в 3 раза превышает влияние содержания хрома ( $x_2$ ). Максимальная твердость 338 HV получена при  $x_1 = +1$ ; и  $x_2 = +1$  т. е. в науглероженном слое с повышенным содержанием карбидов (10% Cr).

## Литература

1. Николаев, Г. А. Сварка в машиностроении: справочник / Г. А. Николаев. – М.: Машиностроение, 1978. – Т 1. – 501 с.
2. Готальский, Ю. Н. Сварка разнородных сталей / Ю. Н. Готальский. – Киев: Техніка, 1981. – 184 с.
3. Вознесенский, В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. – М.: Статистика, 1974. – 192 с.