

7. Константинов, В.М. Структура и механические свойства углеродистых сталей после циклического нагрева индукционным и переменным током / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко, В.М. Семенченко // Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штампового производств: сб. науч. тр. XII Междунар. науч.-техн. конф., Барнаул / АГТУ ; редкол.: Гурьев А.М. [и др.]. – Барнаул, 2011. – С. 48–51.

8. Ткаченко, Г.А. Термическая обработка для одновременного повышения твердости и ударной вязкости стальных изделий / Г.А. Ткаченко // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2014. – Т. 3. – С. 64–74.

9. Ткаченко, Г.А. Влияние циклического нагрева на рост диффузионного слоя и механические свойства среднеуглеродистой стали / Г.А. Ткаченко // Перспективные материалы и технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Витебск, 29 мая 2013 г. / ИТА НАН Беларуси ; редкол.: В.В. Рубаник [и др.]. – Витебск, 2013. – С. 20–22.

УДК 621.791.053:669.15–194.56

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

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АУСТЕНИТНО- КАРБИДНОГО МЕТАЛЛА ШВА

Изменение механических свойств разных зон сварного соединения связано с неравновесностью их структурного состояния. Послеварочная термическая обработка способствует более стабильному состоянию структуры, сближению с основным металлом, однако при всех режимах отпуска для конструкционных сталей и стабилизирующего отжига для нержавеющей сталей эти свойства полностью не выравниваются: сохраняется большая прочность участков полной перекристаллизации ЗТВ и меньшая участков не-

полной перекристаллизации по сравнению с основным металлом. Показатель пластичности – относительное удлинение остается ниже.

С повышением легирования и прочности сталей вызванное сваркой изменение свойств становится все более значительным, что требует повышения температуры послесварочной термической обработки для приведения структуры и свойств сварного соединения к допустимому уровню.

В работе приведены результаты исследований механических свойств (предела текучести σ_T , МПа и относительного удлинения δ , %) металла сварного шва типа Э-27Х15Н35В3Г2Б2Т после различных режимов термической обработки.

В качестве параметров оптимизации (функции откликов) были выбраны предел текучести ($y_1 = \sigma_T$, МПа) и относительное удлинение ($y_2 = \delta$, %), а в качестве факторов: x_1 – вид сварки ($x_1 = -1$, наплавка на кромку пластины; $x_1 = +1$, многослойный стыковой шов), x_2 – вид термической обработки ($x_2 = -1$, двойная стабилизация: 900 °С, выдержка 10 ч + 700 °С, выдержка 35 ч; $x_2 = +1$, аустенизация и двойная стабилизация: 1100 °С, выдержка 1 ч + 900 °С, выдержка 10 ч + 700 °С, выдержка 35 ч) и x_3 – температура термической обработки t °С (100, 450 и 800 °С).

Для проведения эксперимента был выбран план $2 \times 2 \times 3$, где 2 – два уровня вида сварки и двойной стабилизации, а 3 – три уровня температуры термической обработки. Ошибки воспроизводимости опытов S_1 и S_2 составляли соответственно $S_1 = 14,9$ МПа, $S_2 = 1,27$ %. Опыты проводились в случайном (рандомизированном) порядке во избежание влияния систематических ошибок.

Матрица плана и результаты эксперимента приведены в таблице 1, где x_1, x_2, x_3 – кодированные уровни факторов (± 1 опущена), а $y_1 = \sigma_T$, МПа и $y_2 = \delta$, %.

Статистическую обработку результатов эксперимента проводили по методике [1].

Коэффициенты уравнения регрессии второго порядка b_0, b_i, b_{ij} и b_{ii} рассчитывали по формулам:

$$b_0 = A_0(0Y)_i - A_{03}(33Y); \quad (1)$$

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

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

$$b_{ii} = A_{ii}(33Y) - A_{03}(0Y), \quad (4)$$

где $A_0, A_{03}, A_i, A_{ij}, A_{ii}$ – из таблицы В [1], а $(0Y), (33Y), (iY), (ijY)$ – алгебраические суммы произведений столбца Y_i на соответствующие столбцы факторов x_1, x_2, x_3 (приведены в нижних строках). В нашем случае $A_0 = A_{03} = 0,25$; $A_1 = A_2 = A_{12} = 0,08333$; $A_3 = A_{13} = A_{23} = 0,125$ и $A_{33} = 0,375$.

Таблица 1 – Матрица плана $2 \times 2 \times 3$ и результаты эксперимента при исследовании механических свойств сварного шва

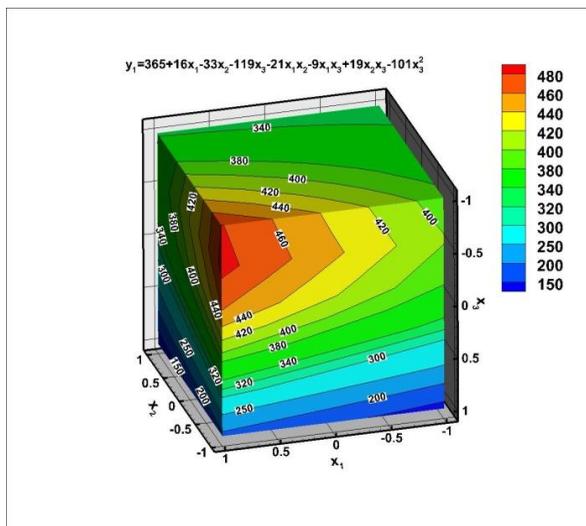
№	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_3^2	$y_1 = \sigma_r$, МПа	$y_2 = \delta$, %
1	–	–	–	+	+	+	+	380	25
2	–	–	0	+	0	0	0	360	25
3	–	–	+	+	–	–	+	140	25
4	–	+	–	–	+	–	+	340	28
5	–	+	0	–	0	0	0	330	24
6	–	+	+	–	–	+	+	140	22
7	+	–	–	–	–	+	+	480	22
8	+	–	0	–	0	0	0	450	24
9	+	–	+	–	+	–	+	170	23
10	+	+	–	+	–	–	+	330	32
11	+	+	0	+	0	0	0	320	30
12	+	+	+	+	+	+	+	130	24
Σ_1	190	–390	–950	–250	–70	150	2110	3570	–
Σ_2	5	15	–14	19	0	–14	202	–	305
Код	(1Y)	(2Y)	(3Y)	(12Y)	(13Y)	(23Y)	(33Y)	(0Y) ₁	(0Y) ₂

В результате получили следующие уравнения:

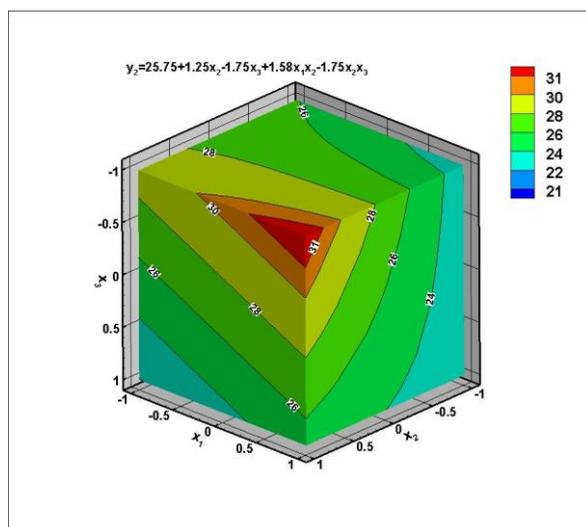
$$y_1 = \sigma_r = 365 + 16x_1 - 33x_2 - 119x_3 - 21x_1x_2 - 9x_1x_3 + 19x_2x_3 - 101x_3^2; \quad (5)$$

$$y_2 = \delta = 25,75 + 0,42x_1 + 1,25x_2 - 1,75x_3 + 1,58x_1x_2 - 1,75x_2x_3 - 0,5x_3^2. \quad (6)$$

Графическое представление уравнений (5), (6) представлено рисунком 1 а, б соответственно.



a



б

Рисунок 1 – Графическое представление моделей (5) и (6)

Значимость коэффициентов этих уравнений проверили путем сравнения их доверительных интервалов Δb_i с абсолютными значе-

ниями коэффициентов уравнения. Доверительные интервалы рассчитывали по формулам:

$$\Delta b_i = tS_y \sqrt{A_0} ; \quad (7)$$

$$\Delta b_i = tS_y \sqrt{A_i} ; \quad (8)$$

$$\Delta b_{ij} = tS_y \sqrt{A_{ij}} ; \quad (9)$$

$$\Delta b_{ii} = tS_y \sqrt{A_{ii}} , \quad (8)$$

где t – табличное значение критерия Стьюдента при выбранном уровне значимости α (обычно $0,1 \div 0,05$) и степени свободы $f = N$. В нашем случае $\alpha = 0,1$; $f = 12$; $t = 1,782$.

В результате получили следующие доверительные интервалы:

для σ_7 : $\Delta b_0 = 13,25$; $\Delta b_1 = \Delta b_2 = \Delta b_{12} = 7,66$; $\Delta b_3 = \Delta b_{13} = \Delta b_{23} = 9,37$ и $\Delta b_{33} = 16,23$, т. е. все коэффициенты уравнения (5) значимы ($\Delta b_i < b_i$);

для δ : $\Delta b_0 = 1,13$; $\Delta b_1 = \Delta b_2 = \Delta b_{12} = 0,654$; $\Delta b_3 = \Delta b_{13} = \Delta b_{23} = 0,8$ и $\Delta b_{33} = 1,385$, т.е. коэффициенты $b_1 = 0,417$; $b_{13} = 0$ и $b_{33} = -0,5$ незначимы. Исходя из этого, уравнение (6) будет выглядеть следующим образом:

$$y_2 = \delta = 25,75 + 1,25x_2 - 1,75x_3 + 1,58x_1x_2 - 1,75x_2x_3. \quad (6a)$$

Адекватность уравнений (5) и (6a) проверяли по критерию Фишера $F = S_{ay}^2 / S_y^2$, где S_{ay}^2 – дисперсия адекватности, образующаяся в результате разницы расчетных величин y_1 и y_2 (по соответствующим уравнениям) и экспериментальных значений этих параметров ($\Delta y_i = y_{ib} - \hat{y}_{ip}$), а S_y^2 – дисперсия параметра оптимизации.

Дисперсия адекватности определялась по формуле:

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{n=1}^N \Delta y_n^2}{N - m}, \quad (11)$$

где m – число значимых коэффициентов уравнения, включая b_0 .

В нашем случае $S_{ад1}^2 = \frac{1164}{12-8} = 291$, $S_{ад2}^2 = \frac{10,4163}{12-5} = 1,488$.

Таким образом, $F_1 = \frac{291}{221} = 1,3 < F_{кр} = 3,5$ ($\alpha = 0,05$, $f_1 = 4$, $f_2 = 11$),

а $F_2 = \frac{1,488}{1,69} = 0,88 < 1 < F_{кр} = 3,1$ ($\alpha = 0,05$, $f_1 = 7$, $f_2 = 11$), т.е. оба

уравнения адекватно описывают факторное пространство.

Анализ уравнения (5) показывает, что наибольшее влияние на предел текучести ($y_1 = \sigma_T$) оказывает температура термической обработки (x_3): чем она больше, тем меньше значение предела текучести y_1 . Влияние других факторов (x_1 и x_2) значительно меньше.

Максимальная величина $y_1 = \sigma_T = 480$ МПа получена при $x_1 = +1$ (многослойный стыковой шов); $x_2 = -1$ (двойная стабилизация 900 °С) и $x_3 = -1$ ($t = 100$ °С) (см. опыт № 7). Минимальная величина $y_1 = \sigma_T = 130$ МПа получена при $x_1 = +1$; $x_2 = +1$ и $x_3 = +1$, т.е. при многослойном стыковом шве, аустенизации и двойной стабилизации 1000 °С и $t = 800$ °С. Однако следует отметить, что проведение двойной стабилизации ($x_2 = \pm 1$) металла шва мало изменяет его свойства относительно исходного состояния, что можно объяснить значительно меньшей величиной коэффициентов b_1 и b_2 по сравнению с b_3 и b_{33} . Сохраняется заметная разница в прочности швов разных условий выполнения, снижающаяся с повышением температуры испытания. Она связана со стабильностью развитой субструктуры металла стыкового шва за счет высокотемпературного наклепа при сварке.

При переходе к более высоким температурам положение коренным образом меняется: нагрев при этих температурах снижает эффект высокотемпературного наклепа и приводит к получению равновесной структуры шва по сравнению с исходным состоянием. В этом случае прочность швов значительно снижается ($> 2,5$ раза), а пластичность повышается.

Анализ уравнения (6а) также показывает, что наибольшее влияние на относительное удлинение ($y_2 = \delta$, %) оказывает температура нагрева x_3 , но в меньшей степени, чем на σ_T . Максимальная величина $\delta = 32$ % получена при $x_1 = +1$; $x_2 = +1$ и $x_3 = -1$, т.е. в многослой-

ном стыковом шве при аустенизации и двойной стабилизации 1000 °С и $t = 100$ °С.

Для оценки влияния исходной прочности температуры отпуска на прочность сварных соединений стали 12Х1МФ был проведен двухфакторный эксперимент типа 2×3 , где 2 – два уровня состояния соединения (до и после сварки), а 3 – температура отпуска (670, 700 и 730 °С). В качестве параметров оптимизации были выбраны предел текучести ($y_1 = \sigma_T$, МПа) и предел прочности ($y_3 = \sigma_B$, МПа).

Ошибки воспроизводимости опытов соответственно составили 29 и 35 МПа (примерно 5 % от средней величины обоих параметров).

План эксперимента и его результаты представлены в таблице 2, где x_1 и x_2 – кодированные уровни состояния соединения и температуры отпуска. Испытывались сварные образцы диаметром 10 мм из стали 12Х1МФ.

Таблица 2 – Матрица плана 2×3

N	x_1	x_2	x_1x_2	x_2^2	$y_1 = \sigma_T$	$y_3 = \sigma_B$	$y_4 = \sigma_B$ основного соединения
1	–	–	+	+	770	881	400
2	–	0	0	0	593	690	600
3	–	+	–	+	457	586	812
4	+	–	–	+	700	813	381
5	+	0	0	0	553	663	575
6	+	+	+	+	417	553	738
Σ_1	–150	–596	30	2344	3490	–	–
Σ_3	–128	–550	40	2833	–	4186	–
Σ_4	–118	269	–55	2331	–	–	3506

После статистической обработки результатов эксперимента по указанной выше методике и проверки значимости коэффициентов уравнения получены адекватные уравнения ($F_1 = \frac{325,3}{292} < 1$ и

$$F_1 = \frac{1592}{35^2} = 1,3 < 5,9)$$

$$y_1 = \sigma_T = 573 - 25x_1 - 149x_2; \quad (12)$$

$$y_3 = \sigma_B = 677 - 21x_1 - 138x_2 \quad (13)$$

Анализ этих уравнений показывает, что наибольшее влияние на обе прочностные характеристики оказывает температура отпуска, чем она выше, тем ниже предел текучести и прочности. Минимальные величины $y_1 = \sigma_T = 770$ МПа и $y_3 = \sigma_B = 881$ МПа получены при $x_1 = -1$ и $x_2 = -1$, т.е. до сварки и температуре отпуска 670 °С.

С повышением прочности заготовок степень разупрочнения сварных соединений растёт. Отпуск после сварки снижает прочность сварных соединений тем больше, чем выше исходная прочность заготовки (до сварки) и температура отпуска.

Подобие уравнений (12) и (13) указывает на тесную связь между σ_T и σ_B . Действительно, расчет коэффициента парной корреляции τ_{13} между этими параметрами, подтверждает эту гипотезу:

$$\tau_{13} = \frac{\sum_1^N \Delta y_1 \Delta y_3}{\sqrt{\sum_1^N \Delta y_1^2 \sum_1^N \Delta y_3^2}} = 0,9964 > \tau_{кр} = 0,917 \quad (\alpha = 0,01; f = 4). \quad (14)$$

В уравнении (14) – $\Delta y_1 = (y_1 - \bar{y}_1)$ и $\Delta y_3 = (y_3 - \bar{y}_3)$ – разности параметров между текущим и средним их значениями. Исходя из этого, зависимость между $y_3 = \sigma_B$ и $y_1 = \sigma_T$ может быть записана в виде

$$y_3 = \sigma_B, \text{ МПа} = 155,082 + 0,933\sigma_T. \quad (15)$$

Коэффициенты $a = 155,082$ и $b = 0,922$ определяли по формулам:

$$b = \frac{\sum_1^N \Delta y_1 \Delta y_3}{\sum_1^N \Delta y_1^2}, \quad (16)$$

$$a = \bar{y}_3 - b\bar{y}_1, \quad (17)$$

где \bar{y}_1 и \bar{y}_3 – средние величины σ_T и σ_B .

Изменение прочности сварного соединения стали 12Х1МФ в зависимости от прочности основного металла (σ_B , МПа) изучали по тому же плану эксперимента 2×3, где 2 – два уровня места измерения (основной металл, сварное соединение), а 3 – три уровня предела прочности основного металла (400, 600 и 800 МПа).

В качестве параметра оптимизации была выбрана прочность σ_B сварного соединения ($y_4 = \sigma_B$, МПа).

Результаты эксперимента приведены в таблице 2 в столбце y_4 . После обработки результатов эксперимента получено адекватное уравнение ($F_p = 1,46 < 5,2$; $\alpha = 0,05, f_1 = 4, f_2 = 5$):

$$y_4 = \sigma_B, \text{ МПа} = 588 - 20x_1 + 192x_2. \quad (18)$$

Анализ этого уравнения показывает, что прочность основного металла (x_2) оказывает наибольшее влияние на прочность сварного соединения (y_4): чем она больше, тем выше значение y_4 .

С ростом прочности стали и неизбежным повышением температуры отпуска сварного из нее соединения существенно изменяются свойства основного металла. Подтверждением этому являются результаты эксперимента, проведенного при сварке соединения стали 20Х2НМФА по плану 3×3, где 3 – три уровня параметра H_p (19; 19,5; 20) и три уровня исходной величины предела текучести (566, 654 и 742 МПа).

В качестве параметра оптимизации ($y_5 = \sigma_T, \text{ МПа}$) взят предел текучести стали 20Х2НМФА при отпуске.

Ошибка воспроизводимости опытов составила $S_y = 29 \text{ МПа}$.

Матрица плана 3×3 и результаты эксперимента приведены в таблице 3.

Таблица 3 — Матрица плана 3×3 и результаты эксперимента при отпуске стали 20Х2НМФА

N	x_1	x_2	x_1x_2	x_1^2	x_2^2	$y_T, \text{ МПа}$
1	–	–	+	+	+	555
2	–	0	0	+	0	600
3	–	+	–	+	+	700
4	0	–	0	0	+	550
5	0	0	0	0	0	574
6	0	+	0	0	+	656
7	+	–	–	+	+	524
8	+	0	0	+	0	543
9	+	+	+	+	+	592
Σ	–196	319	–77	3514	3557	$5294/180 = 29$

После статистической обработки результатов эксперимента по указанной выше методике, проверки значимости коэффициентов

уравнения и его адекватности получено уравнение, адекватно описывающее факторное пространство ($F_p = \frac{629}{811} < 1$)

$$y = \sigma_T, \text{ МПа} = 578 - 33x_1 + 53x_2. \quad (19)$$

Фактор $H_p(x_1)$ характеризует степень изменения свойств малоуглеродистых и низколегированных марганцовистых сталей различного способа выплавки. С ростом H_p снижается прочность стали, но влияние его на $y = \sigma_T$ все же меньше, чем исходный предел текучести стали (x_2). Прочность стали 20Х2НМФА после проведения отпуска зависит от исходной прочности заготовок. При исходном значении $\sigma_T = 743$ МПа она снижается до 524 МПа.

Список литературы

1. **Земзин, В.Н.** Термическая обработка и свойства сварных соединений / В.Н. Земзин, Р.З. Шрон. – М.: Машиностроение, 1978. – 368 с.
2. **Вознесенский В.А.** Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В.А. Вознесенский. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 264 с.

УДК 621.791.053–024.78:621.785

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

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ, КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛОТЫ, ТОЛЩИНЫ СВАРИВАЕМОГО ЛИСТА И ТЕМПЕРАТУРЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПОДОГРЕВА НА ПЛОЩАДЬ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ СВАРНОГО ШВА

В работе приведены результаты исследований влияния четырех факторов (скорости охлаждения, погонной энергии, толщины листа