

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
АУСТЕНИТНО-КАРБИДНОГО МЕТАЛЛА ШВА.
СООБЩЕНИЕ 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ
И ОТНОСИТЕЛЬНОГО УДЛИНЕНИЯ СВАРНОГО
АУСТЕНИТНОГО ШВА ТИПА Э-27Х15Н35В3Г2Б2Т ПОСЛЕ
РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

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

В работе представлен статистический анализ исследования механических свойств металла сварного шва типа Э-27Х15Н35В3Г2Б2Т, полученного наплавкой на кромку пластины и в виде многослойного стыкового шва в зависимости от вида термической обработки (двойная стабилизация: 900 °С, выдержка 10 ч + 700 °С, выдержка 35 ч; аустенизация и двойная стабилизация: 1 100 °С, выдержка 1 ч + 900 °С, выдержка 10 ч + 700 °С, выдержка 35 ч) и температуры термической обработки (100, 450 и 800 °С).

Установлено, что проведение двойной стабилизации мало изменяет свойства, например, предел текучести σ_T , многослойного стыкового шва относительно исходного состояния. При этом сохраняется заметная разница в прочности швов разных условий выполнения, снижающаяся с повышением температуры испытания.

Максимальная величина $\sigma_T = 480$ МПа получена для многослойного стыкового шва в условиях двойной стабилизации 900 °С и $T = 100$ °С. Минимальная величина $\sigma_T = 130$ МПа получена при многослойной стыковой сварке: аустенизация и двойная стабилизация 1000 °С и $T = 800$ °С.

Наибольшее влияние на относительное удлинение оказывает температура нагрева, но в меньшей степени, чем на σ_m .

Ключевые слова: наплавка, многослойный стыковой шов, статистический анализ, механические свойства, сварной шов, термическая обработка, аустенизация, стабилизация.

THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF AUSTENITIC CARBIDE SEAM METAL. REPORT 1. INVESTIGATION OF THE YIELD STRENGTH AND ELONGATION OF WELDED AUSTENITIC SEAM TYPE Э-7Х15Н35В3Г2Б2Т AFTER VARIOUS MODES OF HEAT TREATMENT

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

The paper presents a statistical analysis of the study of the mechanical properties of the weld metal type Э-27Х15Н35В3Г2Б2Т, obtained by surfacing on the edge of the plate and in the form of a multilayer butt seam depending on the type of heat treatment (double stabilization: at 900 °C, exposure 10 h + 700 °C, exposure 35 h; austenization and double stabilization: 1 100 °C, exposure time 1 h + 900 °C, exposure time 10 h + 700 °C, exposure time 35 h) and heat treatment temperatures (100, 450 and 800 °C).

It has been found that carrying out double stabilization does not significantly change the properties, for example yield stress σ_T , of a multilayer butt joint relative to the initial state. At the same time, there remains a noticeable difference in the strength of the seams of different conditions, decreasing with increasing test temperature.

The maximum value of $\sigma_T = 480$ MPa was obtained for a multilayer butt joint under conditions of double stabilization of 900 °C and $T = 100$ °C. The minimum value of $\sigma_T = 130$ MPa was obtained with multilayer butt welding: austenization and double stability.

Keywords: surfacing, multilayer butt joint, statistical analysis, mechanical properties, weld, heat treatment, austenization, stabilization.

Термическая обработка является одним из распространенных технологических приемов во многих отраслях промышленности. Она используется на всех стадиях изготовления конструкций: как исходная операция для придания нужных свойств полуфабрикату, на промежуточных стадиях с целью улучшения технологических свойств, а также как окончательная операция для придания материалу изделия необходимого комплекса механических, физических и других свойств.

Изменение механических свойств разных зон сварного соединения связано с неравновесностью их структурного состояния.

Последующая термическая обработка, приводя к более стабильному состоянию структуры, способствует их сближению с основным металлом: тем больше, чем выше исходная нестабильность структуры. При всех режимах отпуска для конструкционных сталей и стабилизирующего отжига для нержавеющих сталей эти свойства полностью не выравниваются [1].

При близких к основному металлу состава шва его прочность при всех режимах отпуска также остается выше основного металла, а пластичность ниже. С повышением легирования и прочности сталей, вызванным сваркой, изменение свойств становится все более значительным и требуется повышать температуру нагрева, чтобы привести их к допустимому уровню.

Эти выводы подтверждают результаты эксперимента по исследованию механических свойств (предела текучести σ_T , МПа и относительного удлинения δ , %) металла сварного шва типа Э-27Х15Н35В3Г2Б2Т после 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 систематических ошибок.

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

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

N	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_3^2	y_1	y_2
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

Статистическую обработку результатов эксперимента проводили по методике [2].

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

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

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

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

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

где A_0 , A_{03} , A_i , A_{ij} и A_{ii} брали из таблицы [2], а $(0Y)$, $(33Y)$, (iY) , (ijY) – алгебраические суммы произведений столбца y_i на соответствующие столбцы факторов x_1 , x_2 и 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 $A_{33} = 0,375$ и, соответственно, уравнения регрессии имеют вид:

$$y_1 = \sigma_{\delta}, \% = 365 + 16\delta_1 - 33\delta_2 - 113\delta_3 - 21\delta_1\delta_2 - 9\delta_1\delta_3 + 19\delta_2\delta_3 - 101\delta_3^2; \quad (5)$$

$$\delta_2 = \delta, \% = 25,75 + 0,42\delta_1 + 1,25\delta_2 - 1,75\delta_3 + 1,58\delta_1\delta_2 - 1,75\delta_2\delta_3 - 0,5\delta_3^2. \quad (6)$$

Значимость коэффициентов этих уравнений проверяли путем сравнения их доверительных интервалов с абсолютными значениями коэффициентов уравнения. Доверительные интервалы рассчитывали по формулам:

$$\Delta b_0 = tS_y \sqrt{A_0}; \quad (7)$$

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

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

$$\Delta b_{ii} = tS_y \sqrt{A_{ii}}, \quad (10)$$

где t – табличные значения критерия Стьюдента при выбранном уровне значимости α (обычно в интервале от 0,05 до 0,1) и степени свободы $f = N$. В нашем случае $\alpha = 0,1$; $f = 12$; $t = 1,782$.

В результате получили следующие доверительные интервалы коэффициентов уравнений:

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

для δ : $\Delta b_0 = 1,13$; $\Delta b_1 = \Delta b_2 = \Delta b_{12} = 0,654$; $\Delta b_3 = \Delta b_{13} = \Delta b_{23} = 0,8$; $\Delta b_{33} = 1,385$, т.е. коэффициенты b_1 и b_{33} незначимы и уравнение (6) примет вид:

$$y_2 = \delta, \% = 25,75 + 1,25x_2 - 1,75x_3 + 1,58x_1x_2 - 1,75x_2x_3. \quad (11)$$

Адекватность уравнений (5) и (11) проверяли по критерию Фишера $F = S_{\hat{a}\hat{a}}^2 / S_{\hat{o}}^2$, где $S_{\hat{a}\hat{a}}^2$ – дисперсия адекватности, образующаяся

в результате разницы расчетных величин y_1 и y_2 (по соответствующим уравнениям) и экспериментальных значений этих параметров ($\Delta \hat{o}_i = y_i - \hat{y}_{ip}$), S_y^2 – дисперсия параметра оптимизации.

Дисперсия адекватности определяется по формуле:

$$S_{\hat{a}\hat{a}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N \Delta y_u^2}{N - m}, \quad (12)$$

где m – число значимых коэффициентов уравнения, включая b_0 .

В нашем случае $S_{\hat{a}\hat{a}1}^2 = \frac{1164}{12-8} = 291$, $S_{\hat{a}\hat{a}2}^2 = \frac{10,4168}{12-5} = 1,488$.

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

а $F_2 = \frac{1,488}{1,69} < 1 < F_{\hat{e}\hat{o}} = 3,1$ ($\alpha = 0,05$; $f_1 = 7$; $f_2 = 11$), то есть оба урав-

нения 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 выше, тем меньше 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 N 7). Минимальная величина $y_1 = \sigma_T = 130$ МПа получена при $x_1 = +1$; $x_2 = +1$ и $x_3 = +1$, то есть при многослойной стыковой сварке, аустенизации и двойной стабилизации 1000 °С и $T = 800$ °С.

Однако следует отметить, что проведение двойной стабилизации ($\delta_2 = \pm 1$) 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. Переходя 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 ($> 2,5$ раза) снижается, а пластичность повышается.

Анализ уравнения (11) также показывает, что наибольшее влияние на относительное удлинения ($\gamma_2 = \delta$, %) 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 $x_3 = -1$, то есть в многослойном стыковом шве при аустенизации и двойной стабилизации 1100°C при $T = 100^\circ\text{C}$.

Список литературы

1. Земзин, В. Н. Термическая обработка и свойства сварных соединений / В. Н. Земзин, Р. З. Шрон. – Л. : Машиностроение, 1978. – 367 с.

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

References

1. Zemzin, V.N. *Termicheskaya obrabotka i svoystva svarnykh soyedineniy* [Heat treatment and properties of welded joints] / V. N. Zemzin, R. Z. Shron. – L. : Mashinostroenie Publ., 1978. – 367 p.

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

Поступила 16.09.2025

Received 16.09.2025