

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
АУСТЕНИТНО-КАРБИДНОГО МЕТАЛЛА ШВА.
СООБЩЕНИЕ 2. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТПУСКА
НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВАРНОГО
СОЕДИНЕНИЯ**

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

В работе выполнен статистический анализ влияния различных температур отпуска на прочностные характеристики сварных соединений стали 12Х1МФ. Установлено, что наибольшее влияние на характеристики предела прочности и текучести оказывает температура отпуска. Отпуск после сварки снижает прочность сварных соединений тем больше, чем выше исходная прочность заготовок (до сварки) и температуры отпуска.

С ростом прочности стали и неизбежным повышением температуры отпуска полученного из нее сварного изделия существенно изменяются свойства основного металла. Это показано на примере стали 20Х2НМФА, где прочность после проведения отпуска зависит от исходной прочности заготовок.

Ключевые слова: статистический анализ, прочностные характеристики сварных соединений стали 12Х1МФ, температура отпуска.

**THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE MECHANICAL
PROPERTIES OF AUSTENITIC-CARBIDE WELD METAL.
MESSAGE 2. INFLUENCE OF TEMPERING TEMPERATURE
ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF A WELDED
JOINT**

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

The paper provides a statistical analysis of the effect of different tempering temperatures on the strength characteristics of welded joints of 12Х1МФ steel. It has been established that the tempering temperature has the greatest influence on the characteristics of tensile strength and yield strength. Tempering after welding

reduces the strength of welded joints the more the higher the initial strength of the workpieces (before welding) and the tempering temperature. With an increase in the strength of steel and an inevitable increase in the tempering temperature of the welded product obtained from it, the properties of the base metal change significantly. This is shown by the example of 20X2HMΦA steel, where the strength after tempering depends on the initial strength of the workpieces.

Keywords: statistical analysis, strength characteristics of welded joints of 2X1MΦ steel, tempering temperature.

Для оценки влияния температуры отпуска на прочность сварных соединений стали 12X1MΦ 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 °C). Испытывались образцы диаметром 10 мм.

В качестве параметров оптимизации были выбраны предел текучести ($y_1 = \sigma_T$, МПа) и предел прочности ($y_2 = \sigma_B$, МПа).

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

План эксперимента и его результаты представлены в таблице 1, где x_1 и x_2 – кодированные уровни состояния соединения и температуры отпуска.

Таблица 1 – Матрица плана 2×3

N	x_1	x_2	$x_1 x_2$	δ_2^2	$y_1 = \sigma_T$	$y_2 = \sigma_B$	$y_3 = \sigma_B$ 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_2	–128	–550	40	2833	–	4186	–
Σ_3	–118	264	–55	2331	–	–	3506

После статистической обработки результатов эксперимента по указанной выше методике и проверки значимости коэффициентов уравнения получены адекватные уравнения $F_1 = 325,3 / 29^2 < 1$

и $F_2 = 1592 / 35^2 = 1,3 < 5,9$:

$$y_1 = 573 - 25x_1 - 149x_2; \quad (1)$$

$$y_2 = 617 - 21x_1 - 138x_2. \quad (2)$$

Анализ этих уравнений показывает, что наибольшее влияние на обе прочностные характеристики оказывает температура отпуска: чем она выше, тем ниже предел текучести и прочности. Максимальные величины $y_1 = \sigma_T = 770$ МПа и $y_2 = \sigma_B = 881$ МПа получены при $x_1 = -1$ и $x_2 = -1$, то есть до сварки и температуре отпуска 670°C .

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

Подобие уравнений (1) и (2) указывает на тесную связь между σ_T и σ_B . Действительно, расчет коэффициента парной корреляции r_{12} между этими параметрами, подтверждает эту гипотезу.

$$r_{12} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta y_1 \cdot \Delta y_2}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \Delta y_1^2 \cdot \sum_{i=1}^N \Delta y_2^2}} = 0,9964 > r_{кр} = 0,917 \quad (\alpha = 0,01; f = 4). \quad (3)$$

В уравнении (3) $\Delta y_1 = (y_1 - \bar{y}_1)$; $\Delta y_2 = (y_2 - \bar{y}_2)$ – разности параметров между текущим и средним значениями.

Зависимость между $y_2 = \sigma_B$ и $y_1 = \sigma_T$ может быть записана в виде:

$$y_2 = 155,082 + 0,933y_1. \quad (4)$$

Коэффициенты $a = 155,082$ и $b = 0,933$ определяли по формулам:

$$b = \frac{\sum_1^N \Delta y_1 \cdot \Delta y_2}{\sum_1^N \Delta y_1^2}; \quad (5)$$

$$a = \bar{y}_2 - b\bar{y}_1. \quad (6)$$

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 ($y_3 = \sigma_b$, МПа).

Результаты эксперимента приведены в таблице 1 в столбце y_3 . После обработки результатов эксперимента получено адекватное уравнение ($F_p = 1,46 < 5,2$; $\alpha = 0,05$; $f_1 = 4$; $f_2 = 5$):

$$y_3 = 588 - 20x_1 + 192x_2. \quad (7)$$

Анализ этого уравнения показывает, что прочность основного металла (x_2) оказывает наибольшее влияние на прочность сварного соединения (y_3): чем она больше, тем выше y_4 .

С ростом прочности стали и неизбежным повышением температуры отпуска полученного из нее сварного изделия, существенно изменяются свойства основного металла. Подтверждением этому являются результаты эксперимента, проведенного при сварке соединения из стали 20Х2НФА 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) [1].

В качестве параметра оптимизации ($y_4 = \sigma_t$, МПа) взят предел текучести стали 20Х2НМФА при отпуске.

Ошибка воспроизводимости опытов составила $S_y = 29$ МПа. Матрица плана 3×3 и результаты эксперимента приведены в таблице 2.

Таблица 2 – 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	$y_4 = \sigma_T$, 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	3577	5294

После статистической обработки результатов эксперимента по указанной выше методике, проверки значимости коэффициентов уравнения и его адекватности получено уравнение, адекватно описывающее факторное пространство ($F = \frac{629}{841} < 1$):

$$y_4 = \sigma_T, \text{ МПа} = 578 - 33x_1 + 53x_2. \quad (8)$$

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 $y_4 = \sigma_T$ все же меньше, чем исходный предел текучести стали (x_2). Прочность стали 20Х2НМФА после проведения отпуска зависит от исходной прочности заготовок. При исходной прочности (σ_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. – Л.: Машиностроение, 1978. – 367 с.

References

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

Поступила 16.09.2025

Received 16.09.2025