

**АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ, ВЛИЯЮЩИХ НА УДАРНУЮ
ВЯЗКОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ X70
ДЛЯ ГАЗОНЕФТЕПРОВОДНЫХ ТРУБ.
СООБЩЕНИЕ 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА В МИКРОЛЕГИРОВАННЫХ
СТАЛЯХ НА ТЕМПЕРАТУРУ НАЧАЛА И ОКОНЧАНИЯ
ПРЕВРАЩЕНИЯ АУСТЕНИТА ПРИ РАЗНОЙ СКОРОСТИ
ОХЛАЖДЕНИЯ**

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

Проведен статистический анализ влияния содержания углерода, скорости охлаждения зоны термического влияния, температуры испытания на ударную вязкость сварных соединений стали X70 для газонефтепроводных труб.

Ключевые слова: ударная вязкость, сварные соединения, скорость охлаждения, дуговая сварка под флюсом, матрица плана, статистическая обработка результатов эксперимента, газонефтяные трубы из стали X70.

**ANALYSIS OF INDICATORS AFFECTING THE IMPACT
STRENGTH OF WELDED JOINTS OF X70 STEEL FOR GAS
AND OIL PIPELINE PIPES. REPORT 1. INVESTIGATION
OF THE EFFECT OF CARBON CONTENT IN LOW-ALLOY
STEELS ON THE TEMPERATURE OF THE BEGINNING
AND END OF THE TRANSFORMATION OF AUSTENITE
INTO WELDED PIPE JOINTS AT DIFFERENT COOLING RATES**

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

A statistical analysis of the influence of carbon content, cooling rate of heat affected zone metal, test temperature on the impact strength of welded joints of X70 steels for gas and oil pipeline pipes was carried out.

Keywords: impact strength, welded joints, cooling rate, submerged arc welding, plan matrix, statistical processing of experimental results, gas and oil pipes made of steel X70.

На каждом этапе совершенствования технологии транспорта нефти и газа, конструктивных проектных решений и методов строительства трубопроводов выдвигались все более высокие требования как к составу материала трубных сталей, так и к трубам, из них изготовленным. Увеличение диаметра труб, протяженности магистралей и давления, толщины стенки труб, освоение месторождений в северных широтах, усовершенствование сварочных технологий вызвали изменения не только к требованиям механических показателей, химическому составу сталей, но и к технологии изготовления труб, а также к методам и средствам контроля качества продукции.

Одной из наиболее сложных задач при изготовлении газонефтяных труб, с точки зрения технологии их сварки, является удовлетворение требованиям нормативных показателей ударной вязкости металла зоны термического влияния (ЗТВ) сварных соединений [1].

Целью работы является исследование вида материала, скорости охлаждения ($v_{\text{охл}}$) металла, ЗТВ сварных соединений труб и температуры испытания (t , °C) на ударную вязкость (KCV, Дж/см²) этих соединений.

Для этого образцы, вырезанные из стали толщиной 25–30 мм поперек направления прокатки (цилиндрической формы диаметром 10 мм или прямоугольной формы сечением 10×10 мм), нагревали со скоростью 40 °C/с. Максимальная температура нагрева образцов при имитации сварочных циклов составляла 1300 °C. Время выдержки при этой температуре составляло 1 с.

Скорость охлаждения металла образцов в диапазоне температур 800–500 °C ($v_{\text{охл } 8/5}$) выбирали исходя из режимов дуговой сварки под флюсом, реально применяемых при изготовлении прямошовных труб большого диаметра. С целью определения пределов измерения этого фактора выполнен расчет $v_{\text{охл } 8/5}$ для типовых режимов пятидуговой сварки наружных швов труб толщиной стенки 22–36 мм при исходной температуре свариваемых кромок в пределах от 20 до 100 °C. В расчетах использовали известную формулу [2], по которой определяли время пребывания металла в указанном диапазоне $t_{8/5}$:

$$t_{8/5} = \frac{\eta^2}{4\pi\lambda\rho c} \left(\frac{U \cdot I}{V} \right)^2 \frac{1}{d^2} \left[\left(\frac{1}{500 - t_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - t_0} \right)^2 \right],$$

где η – тепловой КПД сварки, принятый равным 1 для сварки под флюсом; λ – коэффициент теплопроводности стали, равный $3,8 \cdot 10^{-4}$ КДж/(см·град); ρ – плотность стали, г/см³; c – удельная теплоемкость стали, Дж/(г·град); $\rho c = 0,005$ кДж/(см²·град); d – толщина листа, см; t_0 – исходная температура металла перед сваркой, °C; UI/V – погонная энергия процесса сварки.

Скорость охлаждения $v_{\text{охл } 8/5}$ определяли как величину, обратную времени пребывания металла в диапазоне температур 800–500 °C.

Исследовали реакцию на термический цикл многодуговой сварки стали типа К60 (Х70) различных изготовителей, условно обозначенную буквенными индексами А, Б, В, Г (таблица 1).

Таблица 1 – Химический состав исследуемых сталей, мас. %

Условный шифр образца	C	Mn	Si	P	S	Ni	Ti	Mo	Nb	V
А	0,032	1,79	0,27	0,011	0,001	0,21	0,019	< 0,03	0,050	0,032
Б	0,045	1,79	0,23	0,012	0,002	0,21	0,013	< 0,03	0,054	0,038
В	0,080	1,62	0,11	0,014	0,002	0,23	0,012	< 0,03	0,038	< 0,02
Г	0,076	1,53	0,26	0,008	0,002	0,20	0,013	0,11	0,043	0,040

Температуру начала и конца превращения аустенита металла образцов стали исследовали при разной температуре $t_{8/5}$ и скорости охлаждения $v_{\text{охл}}$, °C/с (таблица 2).

Таблица 2 – Температура начала и окончания превращения аустенита при разной скорости охлаждения

Шифр образца	$y_1 = t_n$, °C	$y_2 = t_k$, °C	Δy_1	Δy_2	$\Delta y_1 \Delta y_2$	Δy_1^2	Δy_2^2
1	2	3	4	5	6	7	8
А	664	439	-9	-33	297	1089	81
(0,032 %	671	456	-2	-16	32	256	4
С)	696	499	23	27	621	729	529

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8
Б (0,045 % С)	654	453	-17	-19	323	361	289
	682	485	9	13	117	169	81
	695	509	22	37	814	1369	484
	700	510	27	38	1026	1444	729
	702	512	29	40	1160	1600	841
В (0,08 % С)	650	480	-23	8	-184	64	529
	659	491	-14	19	-266	361	196
	660	492	-13	20	-260	400	169
	707	500	34	28	952	784	1156
Г (0,076 % С)	656	432	-17	-40	680	1600	289
	657	435	-16	-37	592	1369	256
	659	440	-14	-32	448	1024	196
	660	445	-13	-27	351	729	169
	670	450	-3	-22	66	484	9
Σ	11441	8028			6769	14316	6016
Среднее значение	673	472					

Полученные результаты позволяют предположить, что между температурой начала t_n и окончания t_k превращения металла существует корреляционная связь.

Коэффициент корреляции r между этими параметрами, определяемый по формуле

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_1 - \bar{y}_1)(y_2 - \bar{y}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_1 - \bar{y}_1)^2 \sum_{i=1}^n (y_2 - \bar{y}_2)^2}},$$

где n – число опытов (у нас $n = 17$), y_1 и y_2 – значения t_n и t_k ; \bar{y}_1 и \bar{y}_2 – их средние значения, оказался равным 0,73, что больше критического (табличного) значения $r_{кр} = 0,5751$ даже при уровне доверия $\alpha = 0,01$ и $n = 17$. При $\alpha = 0,05$ $r_{кр} = 0,46$ и, следовательно, зависимость между t_n и t_k можно выразить уравнением регрессии

$$t_k = b + b_1 t_n = -281,6 + 1,12 t_n.$$

Коэффициенты этого уравнения определялись по формулам:

$$b_1 = \frac{\sum (y_1 - \bar{y}_1)(y_2 - \bar{y}_2)}{\sum (y_1 - \bar{y}_1)^2};$$

$$b = \bar{y}_2 - b_1 \cdot \bar{y}_1.$$

Кроме того, пользуясь данными таблицы 2, можно установить связь между t_n , t_k и маркой материала (например А и Б), температурой охлаждения $t_{8/5}$ или скоростью охлаждения $v_{охл}$.

Для этого составим матрицу плана 2×3 , где 2 – два уровня фактора x_1 : $x_1 = -1$ (образец А); $x_1 = 1$ (образец Б), а 3 – три уровня фактора x_2 : $x_2 = -1$ ($t_{8/5} = 10$); $x_2 = 0$ ($t_{8/5} = 25$); $x_2 = +1$ ($t_{8/5} = 45$) (таблица 3).

Таблица 3 – Матрица плана 2×3 (материал А и Б)

Шифр образца	N образца	x_1	x_2	x_1x_2	x_2^2	$y_1 = t_n$	$y_2 = t_k$
А	1	–	–	+	+	664	439
	2	–	0	0	0	671	456
	3	–	+	–	+	696	500
Б	4	+	–	–	+	656	453
	5	+	0	0	0	682	485
	6	+	+	+	+	695	504
\sum_1		2	71	7	2711	4064	–
\sum_2		47 (1Y)	112 (2Y)	–10 (12Y)	1896 (22Y)	– (0Y)	2837 (0Y)

Обработку результатов этих опытов проводили по методике работы [3].

Коэффициенты уравнения $y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{22}x_2^2$ определяли по формулам:

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

$$b_1 = A_1(1Y); \quad b_2 = A_2(2Y); \quad (2)$$

$$b_{12} = A_{12}(12Y); \quad (3)$$

$$b_{11} = A_{11}(11Y) - A_{01}(0Y); b_{22} = A_{22}(22Y) - A_{02}(0Y), \quad (4)$$

где $A_0, A_{01} \dots A_{22}$ брали из [3], а $(0Y), (1Y) \dots (22Y)$ – суммы произведений столбцов y_i на соответствующие столбцы матрицы $(x_1, x_2, x_1x_2, x_2^2)$ (см. таблицу 3). Для плана 2×3 : $N = 6$; $A_0 = 0,5$; $A_{01} = 0$; $A_{02} = 0,5$; $A_1 = 0,1667$; $A_2 = 0,25$; $A_{12} = 0,25$; $A_{11} = 0$; $A_{22} = 0,75$.

В результате для $y_1 = t_n$ были получены следующие значения коэффициентов уравнения регрессии: $b_0 = 677$; $b_1 = 0,33$; $b_2 = 17,5$; $b_{12} = 1,75$; $b_{22} = 1,25$.

Значимость (отличие от нуля) этих коэффициентов определяли путем сравнения абсолютных значений этих коэффициентов с их доверительным интервалом Δb_i , который определяли по формуле

$$\Delta b_i = t \cdot S_{b_i},$$

где t – табличное значение коэффициента Стьюдента при заданном уровне доверия α (принимаем $t = 1,943$ при $\alpha = 0,1$ и $f = 6$), а S_{b_i} – среднеквадратическая ошибка в определении коэффициента b_i .

Значения S_{b_i} для каждой группы коэффициентов b_i определяли по формулам:

$$S_{b_0} = \sqrt{A_0} \cdot S_y;$$

$$S_{b_i} = \sqrt{A_i} \cdot S_y;$$

$$S_{b_{ij}} = \sqrt{A_{ij}} \cdot S_y;$$

$$S_{b_{ii}} = \sqrt{A_{ii}} \cdot S_y,$$

где S_y – среднеквадратическая ошибка эксперимента. При $S_y = 6,8$ для y_1 $S_{b_0} = 4,8$; $S_{b_1} = 2,78$; $S_{b_2} = S_{b_{12}} = 3,4$; $S_{b_{22}} = 5,9$. Тогда $\Delta b_0 = 9,3$; $\Delta b_1 = 5,4$; $\Delta b_2 = \Delta b_{12} = 6,6$; $\Delta b_{22} = 11,5$.

Следовательно, коэффициенты $b_{12} = 1,75$; $b_{22} = 1,25$ незначимы, так как они меньше соответствующих доверительных интервалов, а количество значащих коэффициентов равно 2. Тогда уравнение примет вид:

$$y_1 = t_n, \text{ } ^\circ\text{C} = 677 + 18x_2. \quad (5)$$

Проверка его адекватности подтвердила эту гипотезу, так как

дисперсия адекватности $S_{ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}{N - n} = \frac{99}{6 - 2} = 24,8$ и критерий

Фишера $F = \frac{24,8}{6,8^2} < 1$, что означает адекватность уравнения (5) при

всех уровнях доверия α .

Таким образом, при $S_y = 6,8$ на величину t_n , °C оказывает влияние только x_2 ($v_{охл}$ или $t_{8/5}$).

Однако следует отметить, что при ошибке опыта $S_y = 34$ (5 % от средней величины $\bar{y}_1 = t_n$, °C = 677) и коэффициент $b_2 = 18$ будет также незначимым ($\Delta b_2 = 33 > 18$). На основании этого можно сделать вывод, что при $S_y = 34$ ни марка материала (А и Б), ни $v_{охл}$ (или $t_{8/5}$) не оказывают влияние на t_n (y_1), а все полученные значения t_n , °C не отличаются существенно от средней величины $t_n = 677$ °C.

При обработке данных по $y_2 = t_k$, °C получены следующие значения коэффициентов уравнения: $b_0 = 471$; $b_1 = 7,8$; $b_2 = 28$; $b_{12} = -1,25$; $b_{22} = 3,5$.

Среднее значение $\bar{y}_2 = t_k = 473$ °C. При ошибке опытов $S_{y_2} = 4,73$ (1 % от \bar{y}_2) получены следующие величины Δb_i : $\Delta b_1 = 3,75$; $\Delta b_2 = \Delta b_{12} = 4,6$; $\Delta b_{22} = 8$.

Уравнение регрессии примет вид:

$$y_2 = t_k, \text{ °C} = 471 + 8x_1 + 28x_2.$$

Проверка адекватности этого уравнения подтвердила эту гипотезу, так как $S_{ад}^2 = \frac{207}{6 - 3} = 69$, а $F = \frac{69}{4,73^2} = 3,08$, что меньше табличного $F_{кр} = 5,4$ (при $\alpha = 0,05$; $f_1 = 3$; $f_2 = 5$).

Следовательно, на величину $y_2 = t_k$, °C оба фактора оказывают влияние, но влияние x_2 ($v_{охл}$, $t_{8/5}$) намного больше, чем влияние материала А и Б (x_1).

Все это справедливо при $S_{y_2} = 4,73$. Однако при $S_{y_2} = 23,7$ (5 % от $\bar{y}_2 = 474$ °C) $\Delta b_0 = 32,6$; $\Delta b_1 = 18,8$; $\Delta b_2 = \Delta b_{12} = 23$; $\Delta b_{22} = 39,9$. То есть в этом случае

$$y_2 = t_k, \text{ } ^\circ\text{C} = 471 + 28x_2.$$

Это уравнение также адекватно, т. к. $S_{\text{ад}}^2 = \frac{575}{6-2} = 143,75$,

$$F = \frac{143,75}{23,7^2} = 0,26 < 1 \text{ при всех уровнях доверия } \alpha.$$

Таким образом, в общих случаях наиболее существенным фактором является x_2 ($v_{\text{охл}}$ или $t_{8/5}$). Наибольшая величина $y_2 = t_k, \text{ } ^\circ\text{C}$ будет при $x_2 = +1$ ($t_{8/5} = 45 \text{ } ^\circ\text{C}$, $v_{\text{охл}} = 6,7 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{c}$).

Следует также отметить, что в данном случае для материала А и Б между t_n и t_k существует тесная корреляционная связь, т. к. коэф-

фициент корреляции $r = \frac{2204}{2415} = 0,913 > 0,7$ ($\alpha = 0,05$, $n = 6$), а урав-

нение будет таким:

$$y_1 = -34 + 1,5y_2.$$

Исследование влияния материалов В (0,08 % С) и Г (0,076 % С) и скорости охлаждения (или $t_{8/5}$) на температуру начала ($t_n, \text{ } ^\circ\text{C}$) и окончания ($t_k, \text{ } ^\circ\text{C}$) превращения аустенита проводили по тому же плану $N = 2 \times 3$, где 2 – два уровня материала ($x_1 = -1$, В; $x_1 = +1$, Г), а 3 – три уровня $t_{8/5}$ (45, 50, 55 $^\circ\text{C}$) или $v_{\text{охл}}$ (6,7; 6,0; 5,5) (таблица 4).

Таблица 4 – Матрица плана 2×3 (материал А и Б)

N	x_1	x_2	$x_1 x_2$	x_2^2	$y_1 = t_n$	$y_2 = t_k$
1	–	–	+	+	650	480
2	–	0	0	0	659	491
3	–	+	–	+	660	492
4	+	–	–	+	657	435
5	+	0	0	0	659	440
6	+	+	+	+	660	445
\sum_1	7	13	–7	2627	3945	–
\sum_2	–143	22	–2	1852	–	2783

Коэффициенты уравнения рассчитывали по формулам (1)–(4). В результате получили: $b_0 = 659$; $b_1 = 1,17$; $b_2 = 3,25$; $b_{12} = -1,75$; $b_{22} = -2,25$ для $y_1 = t_n$.

При ошибке опытов $S_{y_1} = 6,6$ ($S_{y_1}^2 = 43,56$) (1 % от средней величины $\bar{y}_1 = 658$) $\Delta b_0 = 9,1$; $\Delta b_1 = 5,24$; $\Delta b_2 = \Delta b_{12} = 6,4$; $\Delta b_{22} = 11,1$.

Следовательно, b_1 ; b_2 ; b_{12} и b_{22} незначимы даже при столь малой ошибке $S_{y_1} = 6,6$. Уравнение будет таким

$$y_1 = t_n = 659.$$

Это уравнение адекватно при всех уровнях доверия α , т. к. $S_{ад}^2 = \frac{87}{6-1} = 17,4$, а $F = \frac{17,4}{43,6} < 1$.

Следовательно, ни марка материала (x_1), ни скорость охлаждения (x_2) в этих интервалах варьирования не влияют на $y_1 = t_n$.

Для $y_2 = t_k$ коэффициенты оказались равными $b_0 = 466$; $b_1 = -24$; $b_2 = 5,5$; $b_{12} = -0,5$; $b_{22} = -2,5$, а при $S_{y_2} = 23,2$ (5 %), $S_{y_2}^2 = 538,24$ их доверительные интервалы Δb_i : $\Delta b_0 = 32$; $\Delta b_1 = 18,4$; $\Delta b_2 = \Delta b_{12} = 22,5$; $\Delta b_{22} = 39$.

Можно сделать вывод, что значимы только коэффициенты b_0 и b_1 . Уравнение примет вид

$$y_2 = t_k = 466 - 24x_1.$$

Полученное уравнение адекватно, т. к. $S_{ад}^2 = \frac{155}{6-2} = 38,8$, а $F = \frac{38,8}{538,24} < 1$ при $F_{кр} = 4,4$ для $\alpha = 0,05$, $f_1 = 5$, $f_2 = 5$.

Следовательно, при $S_{y_2} = 23,2$ на величину t_k оказывает влияние только материал x_1 (В, Г).

Список литературы

1. ОТГ–23–040, –КТН–314–09. Трубы нефтепроводные большого диаметра. Общие технические требования, 2009. – 34 с.

2. **Uwer D.** Kennzeichnung von Sweißtemperaturzyklen hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften von Sweißverbindungen / D. Uwer, I. Degenkolbe // Stahl und Eisen 97. – 1977. – No. 24. – P. 1201–1208.

3. **Вознесенский, В. А.** Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. – М.: Статистика, 1974. – 192 с.

References

1. **ОТТ–23–040, –КТН–314–09.** *Truby nefteprovodnye bolshogo diametra. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [Oil pipelines of large diameter. General technical requirements], 2009. – 34 p.

2. **Uwer D.** Kennzeichnung von Sweißtemperaturzyklen hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften von Sweißverbindungen / D. Uwer, I. Degenkolbe // Stahl und Eisen 97. – 1977. – No. 24. – P. 1201–1208.

3. **Voznesenskij, V. A.** *Statisticheskie metody planirovaniya ehksperimenta v tekhnikoehkonomicheskikh issledovaniyakh* [Statistical methods of experiment planning in technical and economic calculations] / V. A. Voznesenskij. – Moscow: Statistika Publ., 1974. – 192 p.

Поступила 28.09.2022

Received 28.09.2022