

**АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ, ВЛИЯЮЩИХ НА УДАРНУЮ
ВЯЗКОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ X70
ДЛЯ ГАЗОНЕФТЕПРОВОДНЫХ ТРУБ.
СООБЩЕНИЕ 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ
ОХЛАЖДЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ ИСПЫТАНИЯ
НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБ
ИЗ МИКРОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ С РАЗЛИЧНЫМ
СОДЕРЖАНИЕМ УГЛЕРОДА**

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

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

***Ключевые слова:** ударная вязкость, сварные соединения, температура испытания, матрица плана, дисперсия параметров оптимизации, план эксперимента, трехфакторные эксперименты.*

**ANALYSIS OF INDICATORS AFFECTING THE IMPACT
STRENGTH OF WELDED JOINTS OF X70 STEEL FOR GAS
AND OIL PIPELINE PIPES.
REPORT 2. INVESTIGATION OF THE EFFECT OF COOLING
RATE AND TEMPERATURE OF TESTING ON IMPACT
TOUGHNESS OF WELDED JOINTS OF PIPES
FROM MICROALLOYED STEELS WITH DIFFERENT
CARBON CONTENT**

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

Statistical analysis of the influence of cooling rate, of the heat affected zone metall, test temperature on the impact strength of welded joints of X70 steels for gas and pipelines was carried out.

Keywords: impact strength, welded joints, test temperature, design matrix, dispersion of optimization parameters, experimental design, threefactor experiment.

Результаты испытаний на ударный изгиб образцов размером 10×10 мм с острым надрезом, имитирующим участок крупного зерна зоны термического влияния (ЗТВ) сварных соединений труб, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Матрица плана 3×3 и результаты испытаний на ударный изгиб образцов материала А (0,032 % С)

N	x_1	x_2	x_1x_2	x_1^2	x_2^2	y_1	y_2	y_3	\bar{y}	S_u^2
1	-	-	+	+	+	38,9	46,7	48,2	44,6	24,93
2	-	0	0	+	0	29,2	45,8	54,2	43,1	161,86
3	-	+	-	+	+	119,5	125,8	132,4	125,9	41,61
4	0	-	0	0	+	41,5	60,4	61,2	54,4	124,32
5	0	0	0	0	0	39,5	62,8	77,3	59,9	363,67
6	0	+	0	0	+	120,4	134,5	178,7	144,5	925,22
7	+	-	-	+	+	41,7	59,9	60,1	53,9	111,64
8	+	0	0	+	0	49	62,9	79,5	63,8	235,64
9	+	+	+	+	+	122,4	135,9	187,6	148,4	1184,36
Σ	52,5	265,9	13,2	479,7	571,7	-	-	-	738,5	2841,3

В этой таблице x_1 – кодированные уровни скорости охлаждения $v_{\text{охл}}$ ($x_1 = -1, 6,7$ °C/c; $x_1 = 0, 12$ °C/c; $x_1 = +1, 30$ °C/c); x_2 – кодированные уровни температуры испытаний t , °C ($x_2 = -1, -30$ °C; $x_2 = 0, -20$ °C; $x_1 = +1, -10$ °C), $y_1; y_2; y_3$ – ударная вязкость материала образцов KCV, Дж/см² параллельных испытаний в каждой строке; \bar{y} – среднее значение ударной вязкости в опыте.

Значение дисперсий S_u^2 для каждого i -го опыта находили по формуле:

$$S_{u_i}^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2}{n-1},$$

где $n = 3$ – количество измеренных значений; y_j – значение КСВ; \bar{y} – среднее значение в этой строке.

Дисперсию параметра оптимизации (общую дисперсию) находят по формуле

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_{u_i}^2}{N},$$

где N – общее число опытов (строк). В конкретном случае $N = 9$. Тогда

$$S_y^2 = \frac{3170,78}{9} = 352,31; (S_y = 18,8).$$

Однородность дисперсий S_u^2 определяли с помощью критерия Кохрена по формуле

$$J = \frac{S_{u_{\max}}^2}{\sum_{i=1}^N S_{u_i}^2} = \frac{1184,36}{3170,8} = 0,37.$$

При $\alpha = 0,05$; $f_1 = n - 1 = 2$; $f_2 = N = 9$; $J_{кр} = 0,477$. Следовательно, дисперсии однородны.

Расчет коэффициентов уравнения $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2$ проводили по формулам

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

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

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

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

где $A_0, A_{01}, \dots, A_{22}$ брали из [1], а $(0Y), (1Y), \dots, (22Y)$ – суммы произведений столбцов y_i на соответствующие столбцы матрицы $(x_1, x_2, x_1x_2, x_1^2, x_2^2)$ (см. таблицу 1).

Для плана 3×3 $A_0 = 0,55556$; $A_{01} = A_{02} = 0,33333$; $A_1 = A_2 = 0,167$; $A_{12} = 0,25$; $A_{11} = A_{22} = 0,5$.

В результате получили следующие значения коэффициентов уравнения: $b_0 = 59,8$; $b_1 = 8,7$; $b_2 = 44,3$; $b_{12} = 3,3$; $b_{11} = -6,3$; $b_{22} = 39,7$.

Значимость этих коэффициентов определяли путем сравнения их абсолютных значений с их доверительными интервалами Δb_i при ошибке опытов $S_y = 4,1$ (5 % от среднего значения 82). Интервалы Δb_i рассчитывали по формуле

$$\Delta b_i = t \cdot S_{b_i}, \quad (5)$$

где t – табличное значение коэффициента Стьюдента при заданном уровне доверия α (в нашем случае $t = 1,86$ при $\alpha = 0,1$; $f = 8$), а S_{b_i} – среднеквадратическая ошибка в определении коэффициента b_i .

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

$$S_{b_0} = \sqrt{A_0} \cdot S_y; \quad (6)$$

$$S_{b_i} = \sqrt{A_i} \cdot S_y; \quad (7)$$

$$S_{b_{ij}} = \sqrt{A_{ij}} \cdot S_y; \quad (8)$$

$$S_{b_{ii}} = \sqrt{A_{ii}} \cdot S_y, \quad (9)$$

где S_y – ошибка эксперимента. Они оказались равны: $\Delta b_0 = 5,68$; $\Delta b_1 = \Delta b_2 = 3,1$; $\Delta b_{12} = 3,81$; $\Delta b_{11} = \Delta b_{22} = 5,4$, т.е. $b_{12} = 3,3 < 3,81$ незначим. Тогда уравнение регрессии будет таким:

$$y = KCV_A = 60 + 8,7x_1 + 44x_2 - 6,3x_1^2 + 39,7x_2^2.$$

Проверка адекватности уравнения подтвердила эту гипотезу, поскольку $S_{ад}^2 = \frac{54,14}{9-5} = 13,53$, а $F = \frac{13,53}{16,81} = 0,8 < F_{кр} = 3,8$ при $\alpha = 0,05$; $f_1 = 4$; $f_2 = 8$. Следовательно, наибольшее влияние на величину KCV

оказывает температура испытания (x_2): чем она ниже, тем меньше ударная вязкость.

На рисунке 1 отображена зависимость KCV материала А от скорости охлаждения и температуры испытания.

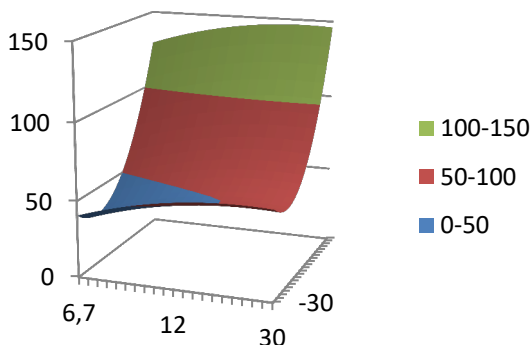


Рисунок 1 – Зависимость KCV материала А от скорости охлаждения и температуры испытания

При исследовании влияния тех же факторов и при тех же уровнях материала В (0,08 % С) использовался тот же план эксперимента 3×3 .

Результаты эксперимента приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Матрица плана 3×3 и результаты испытаний материала В

N	x_1	x_2	x_1x_2	x_1^2	x_2^2	y_1	y_2	y_3	\bar{y}	S_u^2
1	-	-	+	+	+	22,4	25,8	29,4	25,9	12,26
2	-	0	0	+	0	22,2	31,6	35,2	29,7	45,06
3	-	+	-	+	+	51,5	55,8	60,4	55,9	19,81
4	0	-	0	0	+	30,8	30,9	35,2	32,3	6,31
5	0	0	0	0	0	30,7	33,9	50,1	38,2	108,18
6	0	+	0	0	+	51,0	61,3	70,1	60,8	91,4
7	+	-	-	+	+	25,4	22,8	31,6	26,6	20,44
8	+	0	0	+	0	40,1	41,5	50	43,9	28,71
9	+	+	+	+	+	57,4	57,7	64,3	59,8	15,21
Σ	18,8	91,7	3,2	241,8	261,3	-	-	-	373,1	347,36

Здесь $S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_{u_i}^2}{N} = \frac{347,36}{9} = 38,6$ ($S_y = 6,21$); $\bar{y} = \frac{373,1}{9} = 41,46 \approx 41,5$.

Проверка однородности строчных дисперсий подтвердила эту гипотезу, т. к. критерий Кохрена $J = \frac{108,18}{347,36} = 0,31 < 0,477$ при $\alpha = 0,05$; $f_1 = 2$; $f_2 = 9$.

Обращает на себя внимание, что дисперсия и S_y материала В намного меньше, чем у материала А.

После расчетов коэффициентов уравнения по формулам (1)–(4) получили их следующие значения: $b_0 = 39,6$; $b_1 = 3,1$; $b_2 = 15,2$; $b_{12} = 0,8$; $b_{11} = -3,5$; $b_{22} = 6,3$. Доверительные интервалы Δb_i (при $S_y = 2,1$), рассчитанные по формулам (5)–(9), соответственно равны: $\Delta b_0 = 2,91$; $\Delta b_1 = \Delta b_2 = 1,6$; $\Delta b_{12} = 1,93$; $\Delta b_{11} = \Delta b_{22} = 2,76$. Следовательно, только $b_{12} = 0,8 < 1,93$ незначим. Уравнение будет таким:

$$y = KCV_B = 39,6 + 3,1x_1 + 15,2x_2 - 3,5x_1^2 + 6,3x_2^2. \quad (10)$$

Проверка адекватности этого уравнения подтвердила эту гипотезу, поскольку дисперсия адекватности $S_{ад}^2 = \frac{56,93}{9-5} = 14,23$, а критерий $F = \frac{14,23}{2,1^2} = 3,2 = F_{кр} = 3,2$ при $\alpha = 0,05$; $f_1 = 4$ и $f_2 = 8$.

Из (10) видно, что наибольшее влияние на ударную вязкость материала В оказывает x_2 (температура испытания), влияние скорости охлаждения намного меньше. Максимальная величина ударной вязкости $60,8 \text{ Дж/см}^2$ будет при $x_1 = 0$ ($v_{охл} = 12$) и $x_2 = +1$ ($t = -10^\circ \text{C}$).

На рисунке 2 представлена зависимость KCV материала В от скорости охлаждения и температуры испытания.

При исследовании влияния скорости охлаждения (x_1) и температуры испытания (x_2) на ударную вязкость материала Г (0,076 % С) использовали план эксперимента 2×3 , где 2 – два уровня скорости охлаждения ($x_1 = -1$ ($6,7^\circ \text{C/с}$); $x_1 = +1$ (12°C/с)), а 3 – три уровня температуры испытания (-30 ; -20 ; -10°C).

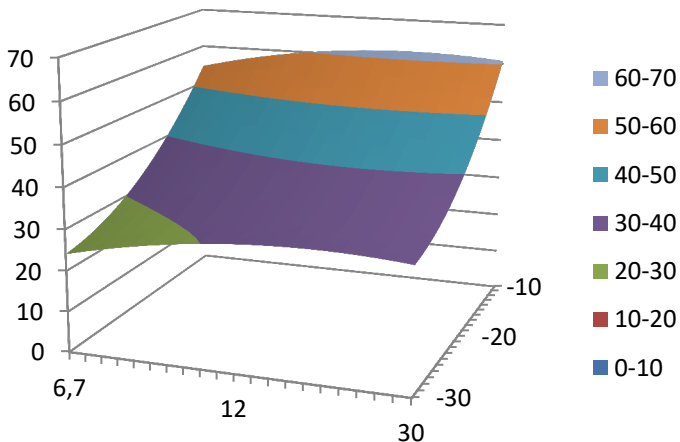


Рисунок 2 – Зависимость KCV материала В от скорости охлаждения и температуры испытания

Матрица плана эксперимента и результаты испытаний приведены в таблице 3, где x_1 и x_2 – кодированные уровни $v_{\text{охл}}$ и температуры испытания. В каждой строке матрицы проводили три параллельных опыта ($n = 3$).

Таблица 3 – Матрица плана 2×3 и результаты испытаний материала Г (0,076 % С) на ударную вязкость

N	x_1	x_2	x_1x_2	x_1^2	x_2^2	y_1	y_2	y_3	\bar{y}	S_u^2
1	-	-	+	+	+	31,4	34,5	35,8	33,9	5,11
2	-	0	0	+	0	33,7	35,3	38,5	35,8	5,98
3	-	+	-	+	+	58,5	68,3	70,6	65,8	41,29
4	+	-	-	+	+	40,2	41,4	42,9	41,5	1,83
5	+	0	0	+	0	42,4	49,8	52,9	48,4	29,11
6	+	+	+	+	+	85,1	87,4	95,7	89,4	31,09
Σ	43,8	79,8	16	314,8	230,6	-	-	-	314,8	114,4

Дисперсия эксперимента $S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_{u_i}^2}{N} = \frac{114,36}{6} = 19,66$; $S_y = 4,37$;
 $\bar{y} = \frac{314,8}{6} = 52,47$.

Однородность строчных дисперсий проверяли с помощью критерия Кохрена $J = \frac{S_{u_{\max}}^2}{\sum_{i=1}^N S_{u_i}^2} = \frac{41,29}{114,36} = 0,36$, что меньше $J_{кр} = 0,616$ при

$\alpha = 0,05$; $f_1 = 2$; $f_2 = 6$. Следовательно, дисперсии однородны.

Расчет коэффициентов уравнения $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2$ производили по тем же формулам (1)–(4). Для плана 2×3 $A_0 = 0,5$; $A_{01} = 0$; $A_{02} = 0,5$; $A_1 = 0,167$; $A_2 = 0,25$; $A_{12} = 0,25$; $A_{11} = 0$; $A_{22} = 0,75$.

В результате получили: $b_0 = 42,1$; $b_1 = 7,3$; $b_2 = 20$; $b_{12} = 4$; $b_{11} = 0$; $b_{22} = 15,1$. Доверительные интервалы (при $t = 1,943$ и ошибке опытов $S_y = 2,63$) равны: $\Delta b_0 = 3,75$; $\Delta b_1 = 2,17$; $\Delta b_2 = \Delta b_{12} = 2,65$; $\Delta b_{22} = 4,6$.

Следовательно, все коэффициенты уравнения значимы, т. к. $b_i > \Delta b_i$, а уравнение регрессии будет таким:

$$y = KCV_{\Gamma} = 42,1 + 7,3x_1 + 20x_2 + 4x_1x_2 + 15,1x_2^2.$$

Это уравнение адекватно, т. к. $S_{ад}^2 = \frac{\sum_{u=1}^5 (y_u - \bar{y}_u)^2}{N - m} = 3,13$, а

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} = \frac{3,13}{6,88} = 0,46 < F_{кр} = 6,6 \text{ при } \alpha = 0,05; f_1 = 1; f_2 = 5.$$

Анализ этого уравнения показывает, что наибольшее влияние на величину ударной вязкости оказывает температура испытания (x_2), влияние $v_{охл}$, как и для материалов А и В, гораздо меньше. Максимальная величина $y = KCV = 89,4$ будет при $x_1 = +1$ ($v_{охл} = 12$ °С/с) и $x_2 = +1$ ($t = -10$ °С).

Рисунок 3 иллюстрирует зависимость KCV материала Г от скорости охлаждения и температуры испытания.

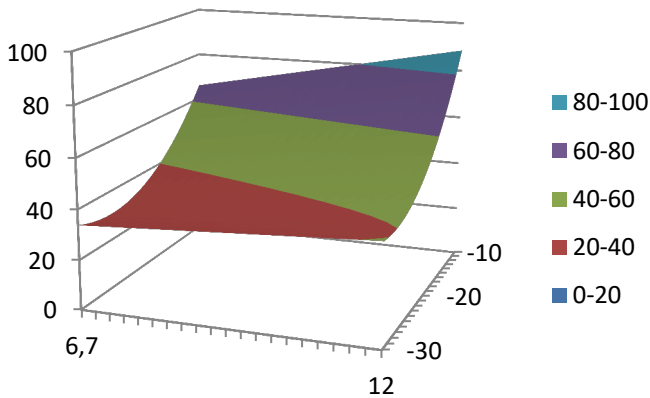


Рисунок 3 – Зависимость KCV материала Г от скорости охлаждения и температуры испытания

Проведенные исследования показывают, что у материала А ударная вязкость выше, чем у материалов В и Г ($82 > 41,5$ и $52,47$), однако и дисперсия опытов здесь значительно больше, чем у материалов В и Г. Вероятно, это вызвано различием структуры этих материалов.

Для выявления роли марки материала, скорость охлаждения и температуры испытаний были проведены трехфакторные эксперименты по плану $2 \times 3 \times 3 = N = 18$.

Значения коэффициентов уравнения $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2$ находили по формулам:

$$b_0 = A_0(0Y) - A_{01}(11Y) - A_{02}(22Y) - A_{03}(33Y); \quad (11)$$

$$b_1 = A_1(1Y); b_2 = A_2(2Y); b_3 = A_3(3Y); \quad (12)$$

$$b_{12} = A_{12}(12Y); b_{13} = A_{13}(13Y); b_{23} = A_{23}(23Y); \quad (13)$$

$$b_{11} = A_{11}(11Y) - A_{01}(0Y);$$

$$b_{22} = A_{22}(22Y) - A_{02}(0Y); b_{33} = A_{33}(33Y) - A_{03}(0Y). \quad (14)$$

Для данного плана $A_0 = 0,277778$; $A_{01} = 0$; $A_{02} = A_{03} = 0,167$; $A_1 = 0,5556$; $A_2 = A_3 = 0,08333$; $A_{12} = A_{13} = 0,08333$; $A_{23} = 0,125$; $A_{11} = 0$; $A_{22} = A_{33} = 0,25$.

Сначала рассмотрим результаты эксперимента $2 \times 3 \times 3$, где 2 – два уровня материала ($x_1 = -1, A$; $x_1 = +1, B$), а 3 – три уровня скорости охлаждения ($x_2 = -1, v_{\text{охл}} = 6,7 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{c}$; $x_2 = 0, v_{\text{охл}} = 12 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{c}$; $x_2 = +1, v_{\text{охл}} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{c}$) и три уровня температуры испытаний ($x_3 = -1, t = -30 \text{ } ^\circ\text{C}$; $x_3 = 0, t = -20 \text{ } ^\circ\text{C}$; $x_3 = +1, t = -10 \text{ } ^\circ\text{C}$).

Матрица плана и результаты испытаний приведены в таблице 4, где y – ударная вязкость KCV. В каждой строке матрицы плана приведены средние значения (\bar{y}) трех параллельных опытов ($n = 3$).

Таблица 4 – Матрица плана $2 \times 3 \times 3$ и результаты испытаний образцов материалов А и В

N	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_2^2	x_3^2	$y = \text{KCV}$
1	-	-	-	+	+	+	+	+	44,6
2	-	-	0	+	0	0	+	0	43,1
3	-	-	+	+	0	-	+	+	125,9
4	-	0	-	0	+	0	0	+	54,4
5	-	0	0	0	0	0	0	0	59,9
6	-	0	+	0	-	0	0	+	144,5
7	-	+	-	-	+	-	+	+	53,9
8	-	+	0	-	0	0	+	0	63,8
9	-	+	+	+	-	+	+	+	148,4
10	+	-	-	-	-	+	+	+	25,9
11	+	-	0	-	0	0	+	0	29,7
12	+	-	+	-	+	-	+	+	55,9
13	+	0	-	0	-	0	0	+	32,3
14	+	0	0	0	0	0	0	0	38,2
15	+	0	+	0	+	0	0	+	60,8
16	+	+	-	+	-	-	+	+	26,6
17	+	+	0	+	0	0	+	0	43,9
18	+	+	+	+	+	+	+	+	59,8
Σ	-364,5	71,3	357,6	-33,7	-174,2	16,4	721,5	833	1111,6

Здесь $y_{\text{ср}} = 61,76$; $S_y = 6,18$; $S_y^2 = 38,19$.

Расчет коэффициентов уравнения проводили по формулам (11)–(14), а их доверительных интервалов Δb_i по формулам (5)–(9) при $t = 1,74$ ($\alpha = 0,1, f = 17$).

В результате были получены следующие значения коэффициентов уравнения: $b_0 = 49,69$ ($\Delta b_0 = 5,66$); $b_1 = -20,30$ ($\Delta b_1 = 2,53$); $b_2 = 5,94$ ($\Delta b_2 = 3,10$); $b_3 = 29,80$ ($\Delta b_3 = 3,10$); $b_{12} = -2,81$ ($\Delta b_{12} = 3,10$); $b_{13} = -14,52$ ($\Delta b_{13} = 3,10$); $b_{23} = 2,05$ ($\Delta b_{23} = 3,80$); $b_{22} = -4,89$ ($\Delta b_{22} = 5,37$); $b_{33} = 22,98$ ($\Delta b_{33} = 5,37$). Следовательно, b_{12} , b_{23} и b_{22} неизвестны, а уравнение будет иметь вид:

$$y = 49,7 - 20,3x_1 + 5,9x_2 + 29,8x_3 - 14,5x_1x_3 + 23x_3^2. \quad (15)$$

Проверка адекватности этого уравнения показала, что дисперсия адекватности $S_{ад}^2 = \frac{1200,2}{18-6} = 100$, а критерий Фишера

$$F = \frac{100}{38,14} = 2,62.$$

Критическое значение $F = 3,9$ при $\alpha = 0,001$, $f_1 = 12$; $f_2 = 36$.

Отметим, что число степеней свободы f для дисперсии адекватности равно $(N - m)$, где $N = 18$, а $m = 6$ (число значимых коэффициентов). Для дисперсии параметра оптимизации (S_y^2) $f_2 = N(n - 1) = 18(3 - 1) = 36$.

Анализ уравнения (15) показывает, что наибольшее влияние на ударную вязкость оказывает температура испытания (x_3), но и влияние материала (x_1) также велико.

Влияние $v_{охл}$ (x_2) намного ниже. Максимальная величина $y_{max} = 148,4$ будет при $x_1 = -1$ (А); $x_2 = +1$ ($v_{охл} = 12$ °С/с) и $x_3 = +1$ ($t = -10$ °С), а минимальная $y_{min} = 25,9$ при $x_1 = +1$ (В); $x_2 = -1$ ($v_{охл} = 6,7$ °С/с) и $x_3 = -1$ ($t = -30$ °С).

Рассмотрим результаты еще одного эксперимента, который проводили по тому же плану $2 \times 3 \times 3$, но в качестве фактора x_1 примем скорость охлаждения $v_{охл}$ ($x_1 = -1$, $6,7$ °С/с; $x_1 = +1$, 12 °С/с), в качестве фактора x_2 – материал ($x_2 = -1$, А; $x_2 = 0$, Г; $x_2 = +1$, В; С = $0,031$ %, $0,076$ % и $0,08$ % соответственно), а в качестве фактора x_3 – температуру испытания, t °С (-30 ; -20 и -10). Параметром оптимизации будет ударная вязкость $y = KCV$.

Матрица плана и результаты испытаний приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Матрица плана $2 \times 3 \times 3$ и результаты испытаний на ударную вязкость материалов А, В, Г при низких температурах

N	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_2^2	x_3^2	$y = KCV$
1	–	–	–	+	+	+	+	+	44,6
2	–	–	0	+	0	0	+	0	43,1
3	–	–	+	+	–	–	+	+	126,0
4	–	0	–	0	–	0	0	+	34
5	–	0	0	0	0	0	0	0	36
6	–	0	+	0	+	0	0	+	66
7	–	+	–	–	+	–	+	+	26
8	–	+	0	–	0	0	+	0	30
9	–	+	+	–	–	+	+	+	56
10	+	–	–	–	–	+	+	+	54
11	+	–	0	–	0	0	+	0	60
12	+	–	+	–	+	–	+	+	145
13	+	0	–	0	–	0	0	+	42
14	+	0	0	0	0	0	0	0	48
15	+	0	+	0	+	0	0	+	89
16	+	+	–	+	–	–	+	+	32
17	+	+	0	+	0	0	+	0	38
18	+	+	+	+	+	+	+	+	61
Σ	107	–230	310	–26	24	–113	716	776	1031

Коэффициенты уравнения рассчитывали по тем же формулам (11)–(14); $t = 1,74$ ($\alpha = 0,1$; $f = 18$).

В результате получили следующие величины этих коэффициентов: $b_0 = 37,2$; $b_1 = 6$; $b_2 = -19,2$; $b_3 = 25,8$; $b_{12} = -2,2$; $b_{13} = 2$; $b_{23} = -14,2$; $b_{22} = 6,8$; $b_{33} = 21,8$.

Доверительные интервалы для этих коэффициентов Δb_i при ошибке опытов $S_y = 5,73$ ($S_y^2 = 32,8$) оказались равными: $\Delta b_0 = 5,25$; $\Delta b_1 = 2,35$; $\Delta b_2 = \Delta b_3 = 2,9$; $\Delta b_{12} = \Delta b_{13} = 2,9$; $\Delta b_{23} = 3,5$; $\Delta b_{22} = 5$; $\Delta b_{33} = 3,5$. Следовательно, b_{12} и b_{13} незначимы. Уравнение будет таким:

$$y = 37,2 + 6x_1 - 19,2x_2 + 25,8x_3 - 14,2x_2x_3 + 6,8x_2^2 + 21,8x_3^2. \quad (16)$$

Дисперсия адекватности $S_{\text{аа}}^2 = \frac{1124,65}{18-7} = 93,77$, а критерий

$F = \frac{93,7}{32,8} = 2,86$, что меньше $F_{\text{кр}} = 5,1$ при $\alpha = 0,001$, $f_1 = 11$ и $f_2 = 18$.

Анализ уравнения (16) показывает, что наибольшее влияние на ударную вязкость оказывает x_3 (температура испытания), влияние x_2 (материал) меньше, а влияние скорости охлаждения (x_1) совсем невелико.

Максимальная величина ударной вязкости $y_{\max} = 145$ будет при $x_1 = +1$ ($v_{\text{охл}} = 12$); $x_2 = -1$ (материал А) и $x_3 = +1$ (температура испытания -10 °С), а минимальная величина $y_{\min} = 26$ будет при $x_1 = -1$ ($v_{\text{охл}} = 6,7$); $x_2 = +1$ (материал В) и $x_3 = -1$ (температура испытания -30 °С).

Еще раз следует подчеркнуть, что для этих материалов, особенно для А, характерен большой разброс значений ударной вязкости KCV. Об этом свидетельствует большая дисперсия S_y^2 , особенно при отрицательных температурах минус 10 °С (см. таблицы 3, 4, 5).

Список литературы

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

References

1. Voznesenskij, V. A. *Statisticheskie metody planirovaniya ehksperimenta v tekhnicoehkonomicheskikh 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