

УДК 622.692

А. Н. КОЗИК, кандидат технических наук, В. В. ВОРОБЬЕВ, кандидат технических наук, ОАО «Гомельтранс-нефть Дружба», С. В. ТОКАРЬ, ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», Н. В. КОВАЛЕНКО, Л. А. СОСНОВСКИЙ, доктор технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

### СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ, КАЧЕСТВА И РИСКА ЭКСПЛУАТАЦИИ КОЛЬЦЕВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НЕФТЕПРОВОДНЫХ ТРУБ

Изложена и апробирована оригинальная методика статистического анализа динамической прочности, качества и риска эксплуатации сварных соединений.

Динамическая прочность сварных соединений имеет громадное значение для машиностроения и строительства. Поэтому исследованиям в этой области посвящено огромное количество работ. Обычно эти работы ведутся на призматических образцах толщиной 5–10 мм и длиной 55 мм, в соответствии с ГОСТ 6996–66. Для постановки и решения специфических задач требуется совершенствование как методов испытаний, так и процедуры обработки и анализа результатов экспериментальных данных. В работе ставится и решается задача создания новой методики оценки динамической прочности и качества сварных соединений с использованием концепции риска как характеристики ожидания эксплуатационных повреждений; в этой связи рассматривается задача об управлении надежностью сварных соединений.

**Методика и основные результаты испытаний.** Образцы вырезаются из нефтепроводной трубы и испытываются на динамическую прочность. Для исключения влияния наплыва сварного шва на результаты испытаний, криволинейные образцы были сошлифованы с наружной и внутренней сторон трубы на 0,5 мм с каждой из сторон, таким образом, что они стали прямолинейными (рисунок 1). Единые размеры всех образцов были получены совместной шлифовкой на плоскошлифовальном станке с магнитной плитой. Рабочие размеры сечения образца составляют  $7 \times 8,3 \text{ мм} = 58,1 \text{ мм}^2 = 0,58 \text{ см}^2$ .

Для имитации дефекта типа «подрез» сделаны надрезы глубиной 0,3; 0,5; 0,7; 1,0 мм на строгальном станке с помощью резца. Типы образцов и схемы их испытаний приведены в таблице 1.

Проведены испытания всех видов образцов; результаты испытаний представлены на рисунках 2–5 и сведены в таблицы 2–7.

Традиционно расчет ударной вязкости ведется по формуле

$$KC = \frac{A}{S} \left( \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2} \text{ или } \frac{\text{кгс} \cdot \text{м}}{\text{см}^2} \right) \quad (1)$$

с учетом площади  $S$  поперечно сечения образца в зоне удара.

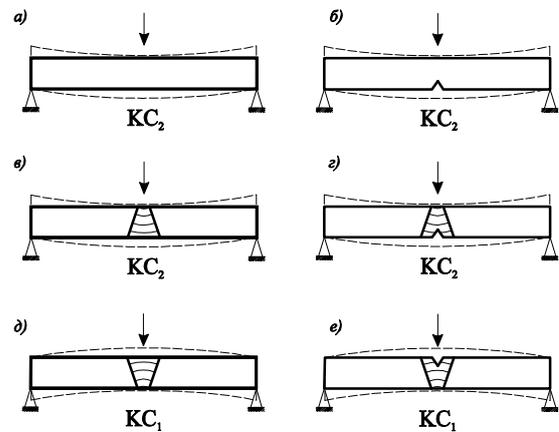


Рисунок 1 – Типы образцов для испытания на динамическую прочность

Таблица 1 – Типы образцов и схемы их испытаний

Схема испытаний	Тип образца	Количество образцов	
Рисунок 1, а	Основной металл без надреза	20	
Рисунок 1, б	Основной металл с надрезом, мм	0,3	5
		0,5	5
		0,7	5
		1,0	5
Рисунок 1, в	Сварное соединение без надреза	53	
Рисунок 1, г	Сварное соединение с надрезом, мм	0,3	30
		0,5	30
		0,7	30
		1,0	30
Рисунок 1, д	Сварное соединение без надреза	54	
Рисунок 1, е	Сварное соединение с надрезом, мм	0,3	30
		0,5	30
		0,7	30
		1,0	30

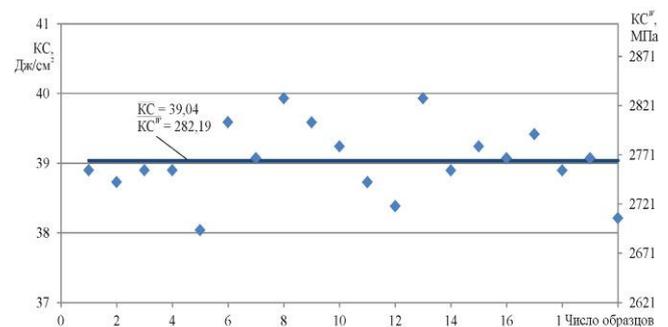


Рисунок 2 – Результаты статистических испытаний на ударную вязкость основного металла

По нашему мнению, использование  $S$  с физической точки зрения неправомерно: ударные испытания ведут не на растяжение, а на изгиб, так что работа разрушения  $A$  фактически не распределена равномерно по сечению. Было принято решение вести анализ не только традиционно [по площади,  $\text{см}^2$ , в соответствии с формулой (1)], но и по моменту сопротивления изгибу [ $W = bh^3/6$  ( $\text{см}^3$ )].

$$KCV^W = \frac{A}{W} \left( \frac{Дж}{\text{см}^3} \text{ или МПа} \right). \quad (2)$$

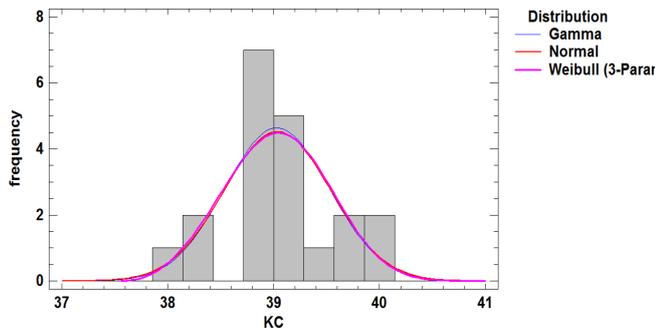


Рисунок 3 – Гистограмма и плотности распределения ударной вязкости КС основного металла

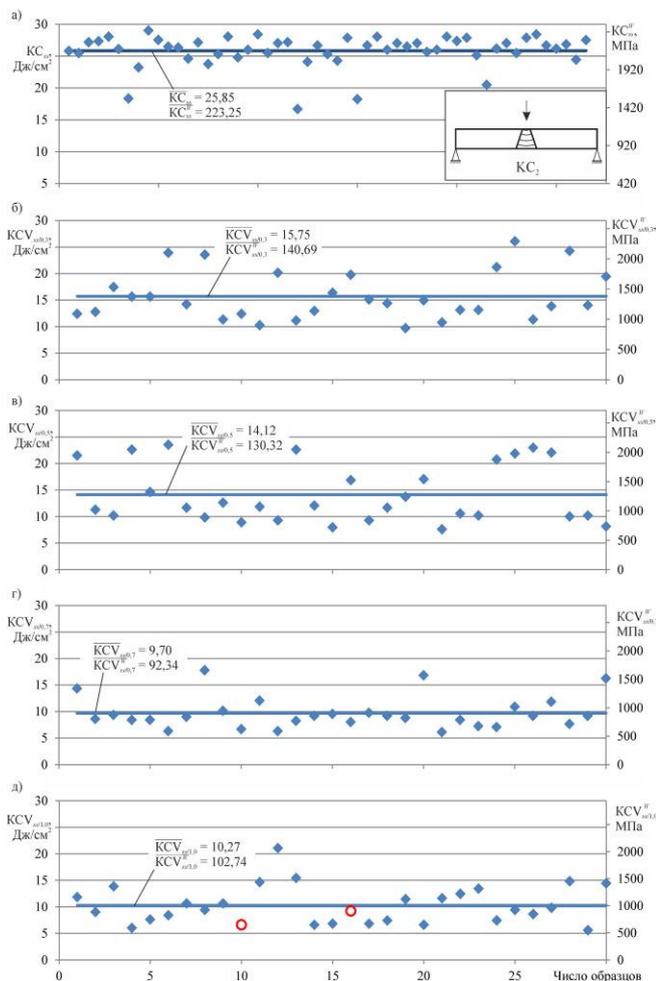


Рисунок 4 – Результаты статистических испытаний сварных соединений на динамическую прочность по схеме КС<sub>2</sub> (а – без надреза, б – надрез 0,3, в – 0,5, г – 0,7, д – 1,0 мм) сварного соединения

Проанализируем результаты статистических испытаний основного металла (см. рисунок 3). Подбор теоретической функции распределения провели в программе STATGRAPHICS [1]. Установлено, что результаты статистических испытаний на ударную вязкость приемлемо описывают гамма-распределение, распределение Вейбулла (трехпараметрическое) и нормальное распределение. Поскольку в литературе обычно используют нормальное распределение как наиболее распространенное [2–4], то дальнейший анализ вели только по нормальному распределению.

Сравнительно изучим далее влияние схемы испытаний на ударную вязкость и динамическую прочность сварных соединений.

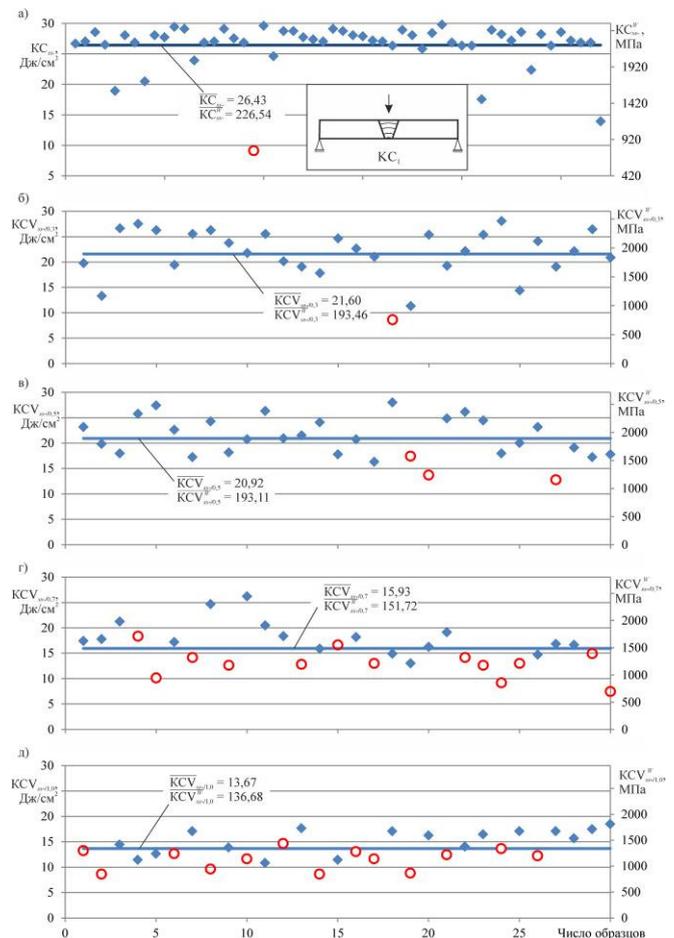


Рисунок 5 – Результаты статистических испытаний сварных соединений на динамическую прочность по схеме КС<sub>1</sub> (а – без надреза, б – надрез 0,3, в – 0,5, г – 0,7, д – 1,0 мм) сварного соединения

Если сварное соединение не имеет надреза, то разница в результатах испытаний по схемам КС<sub>1</sub> и КС<sub>2</sub> составляет 1,4–2,2 % (см. рисунки 4, а; 5, а и таблицы 4 и 7). Это означает, что прочность сварного шва по его высоте (т.е. по толщине стенки трубы) неоднородна: она выше в корне шва по сравнению с его головкой ( $KC_2 < KC_1$ ). Эта разница, однако, сильно возрастает, если сварной шов имеет надрезы и достигает величины 27,3–39,1 % (см. рисунки 4, б–д; 5, б–д и таблицы 4 и 7).

Зависимости динамической прочности от глубины надреза, представленные на рисунке 6, качественно одинаковы как для основного металла, так и для сварных соединений; увеличение глубины надреза ведет к соответствующему снижению динамической прочности. При глубине надреза 0,7–1,0 мм падение прочности достигает более 50 %. Таким образом, опасность нарушений сплошности основного металла либо сварных швов достаточно велика, и ее неучет может привести к нежелательным последствиям, вплоть до инициирования локального разрушения трубы.

Таблица 2 – Сводка результатов испытаний на ударную вязкость по схеме КС<sub>2</sub>

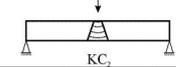
Схема испытаний						
Тип образца	Обозначение	Динам. прочн. КС, Дж/см <sup>2</sup>	Средн. ариф. КС, Дж/см <sup>2</sup>	Станд. откл. S <sub>КС</sub> , Дж/см <sup>2</sup>	Дисперсия D <sub>КС</sub> , (Дж/см <sup>2</sup> ) <sup>2</sup>	
Основной металл без надреза	КС	38,04–39,93	39,04	0,50	0,25	
Основной металл с надрезом, мм	0,3	KCV <sub>0,3</sub>	27,87–28,77	28,23	0,36	0,13
	0,5	KCV <sub>0,5</sub>	25,76–28,92	27,62	1,16	1,36
	0,7	KCV <sub>0,7</sub>	22,57–27,54	25,59	2,35	5,53
	1,0	KCV <sub>1,0</sub>	22,49–23,49	23,17	0,39	0,15
Сварное соединение без надреза	КС <sub>ss</sub>	16,70–29,03	25,85	2,52	6,35	
Сварное соединение с надрезом, мм	0,3	KCV <sub>ss/0,3</sub>	9,71–26,07	15,71	4,57	20,88
	0,5	KCV <sub>ss/0,5</sub>	7,60–23,54	14,12	5,46	29,86
	0,7	KCV <sub>ss/0,7</sub>	6,12–17,79	9,70	3,04	9,24
	1,0	KCV <sub>ss/1,0</sub>	5,62–21,08	10,27	3,58	12,83

Таблица 3 – Сводка результатов испытаний на ударную вязкость по схеме КС<sub>1</sub>

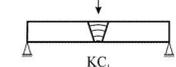
Схема испытаний						
Тип образца	Обозначение	Динам. прочн. КС, Дж/см <sup>2</sup>	Средн. ариф. КС, Дж/см <sup>2</sup>	Станд. откл. S <sub>КС</sub> , Дж/см <sup>2</sup>	Дисперсия D <sub>КС</sub> , (Дж/см <sup>2</sup> ) <sup>2</sup>	
Сварное соединение без надреза	КС <sub>ss-</sub>	9,12–29,78	26,43	3,83	14,69	
Сварное соединение с надрезом, мм	0,3	KCV <sub>ss-/0,3</sub>	8,63–28,05	21,60	4,87	23,71
	0,5	KCV <sub>ss-/0,5</sub>	12,79–27,99	20,92	4,00	15,97
	0,7	KCV <sub>ss-/0,7</sub>	7,46–26,20	15,93	4,09	16,71
	1,0	KCV <sub>ss-/1,0</sub>	8,63–18,47	13,67	2,89	8,36

Таблица 4 – Сравнение результатов испытаний на ударную вязкость

Тип образца	Схема КС <sub>2</sub> , КС <sub>ss</sub> , Дж/см <sup>2</sup>	Схема КС <sub>1</sub> , КС <sub>ss-</sub> , Дж/см <sup>2</sup>	Разница, %
Сварное соединение без надреза	25,85	26,43	2,2
Сварное соединение с надрезом, мм	0,3	15,71	27,3
	0,5	14,12	32,5
	0,7	9,70	39,1
	1,0	10,27	24,9

Изменение характера повреждения основного металла и сварных соединений в зависимости от глубины надреза можно проанализировать по данным таблицы 8. Общая закономерность состоит в том, что увеличение глубины подреза ведет к повышению количества (доли) образцов с трещинами, при этом обнаруживается все больше образцов, разрушенных на две части, если испытания вели по схеме КС<sub>1</sub>. Таким образом, экспери-

ментально установлено, что схема испытания КС<sub>2</sub> позволяет установить наименьшую динамическую прочность (см. рисунок 6), тогда как схема КС<sub>1</sub> дает возможность выявить опасность разрушения образцов на 2 части.

Таблица 5 – Сводка результатов испытаний на динамическую прочность по схеме КС<sub>2</sub>

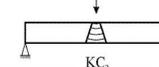
Схема испытаний						
Тип образца	Обозначение	Динам. прочн. КС <sup>W</sup> , МПа	Средн. ариф. КС <sup>W</sup> , МПа	Станд. откл. S <sub>КС<sup>W</sup></sub> , МПа	Дисперсия D <sub>КС<sup>W</sup></sub> , МПа <sup>2</sup>	
Основной металл без надреза	КС <sup>W</sup>	2 695–2 829	2 765	36	1 277	
Основной металл с надрезом, мм	0,3	KCV <sub>0,3</sub> <sup>W</sup>	2 446–2 525	2 478	32	996
	0,5	KCV <sub>0,5</sub> <sup>W</sup>	2 331–2 616	2 498	105	11 106
	0,7	KCV <sub>0,7</sub> <sup>W</sup>	2 106–2 570	2 388	219	48 171
	1,0	KCV <sub>1,0</sub> <sup>W</sup>	2 204–2 302	2 271	38	1 472
Сварное соединение без надреза	КС <sub>ss</sub> <sup>W</sup>	1 402–2 586	2 188	219	47 941	
Сварное соединение с надрезом, мм	0,3	KCV <sub>ss/0,3</sub> <sup>W</sup>	852–2 288	1 379	401	160 796
	0,5	KCV <sub>ss/0,5</sub> <sup>W</sup>	687–2 129	1 277	494	244 335
	0,7	KCV <sub>ss/0,7</sub> <sup>W</sup>	571–1 660	905	284	80 508
	1,0	KCV <sub>ss/1,0</sub> <sup>W</sup>	551–2 066	1 007	351	123 202

Таблица 6 – Сводка результатов испытаний на динамическую прочность по схеме КС<sub>1</sub>

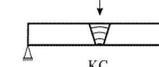
Схема испытаний						
Тип образца	Обозначение	Динам. прочн. КС <sup>W</sup> , МПа	Средн. ариф. КС <sup>W</sup> , МПа	Станд. откл. S <sub>КС<sup>W</sup></sub> , МПа	Дисперсия D <sub>КС<sup>W</sup></sub> , МПа <sup>2</sup>	
Сварное соединение без надреза	КС <sub>ss-</sub> <sup>W</sup>	766–2 501	2 220	322	103 660	
Сварное соединение с надрезом, мм	0,3	KCV <sub>ss-/0,3</sub> <sup>W</sup>	758–2 462	1 896	427	182 649
	0,5	KCV <sub>ss-/0,5</sub> <sup>W</sup>	1 157–2 532	1 893	362	130 722
	0,7	KCV <sub>ss-/0,7</sub> <sup>W</sup>	696–2 445	1 487	382	145 589
	1,0	KCV <sub>ss-/1,0</sub> <sup>W</sup>	846–1 810	1 339	283	80 333

Таблица 7 – Сравнение результатов испытаний на динамическую прочность

Тип образца	Схема КС <sub>2</sub> , КС <sub>ss</sub> <sup>W</sup> , МПа	Схема КС <sub>1</sub> , КС <sub>ss-</sub> <sup>W</sup> , МПа	Разница, %	
Сварное соединение без надреза	2 188	2 220	1,4	
Сварное соединение с надрезом, мм	0,3	1 379	1 896	27,3
	0,5	1 277	1 893	32,5
	0,7	905	1 487	39,1
	1,0	1 007	1 339	24,8

Анализ влияния глубины надреза на изменение характеристик динамической прочности имеет практическое значение, поскольку позволяет оценить потерю прочности с уменьшением толщины стенки трубы.

Некоторые закономерности рассеяния результатов ударных испытаний устанавливаются по рисункам 6–8 (численные данные см. в таблицах 2 и 3). Если средняя прочность основного металла значительно выше, чем сварных соединений (см. рисунок 6), то среднеквадратическое отклонение (СКО), для основного металла, напротив, существенно меньше, чем для сварного соединения (см. рисунки 7 и 8). При этом обнаружено, что СКО уменьшается (до ~40% в условиях опытов) с ростом глу-

бины надреза от 0,3 до 1,0 мм, тогда как СКО для основного металла слабо зависит от глубины надреза. Заметим еще, что разница СКО для образцов со сварными соединениями, испытанных по схемам КС<sub>1</sub> и КС<sub>2</sub>, несколько растет с глубиной надреза.

Таблица 8 – Характер повреждения

Тип образца	Характер повреждения, шт					
	деформация в зоне шва	деформ. в окрестности	макротрещина по высоте сварного шва		разрушение	
			<1/2	≥1/2		
Сварное соединение с наплавом сварного шва	1	6	8	2	0	
КС <sub>2</sub>	Основной металл без надреза	20	0	0	0	
	Основной металл с надрезом, мм	0,3	3	2	0	0
		0,5	1	0	4	0
		0,7	3	1	1	0
		1,0	0	0	0	5
	Сварное соединение без надреза	40	4	6	3	0
	Сварное соединение с надрезом, мм	0,3	0	0	6	24
0,5		0	0	5	25	
0,7		0	0	0	30	
1,0		0	0	1	27	
КС <sub>1</sub>	Сварное соединение без надреза	38	3	8	4	1
	Сварное соединене с надрезом, мм	0,3	2	4	9	14
		0,5	1	1	9	16
		0,7	0	0	3	14
		1,0	0	0	0	17
		1,0	0	0	0	13

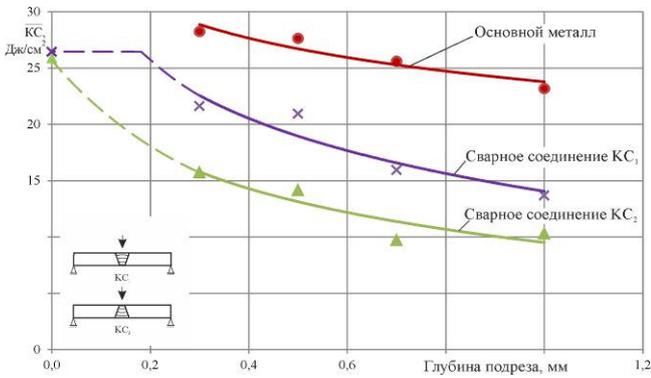


Рисунок 6 – Влияние глубины надреза на динамическую прочность по средним арифметическим значениям

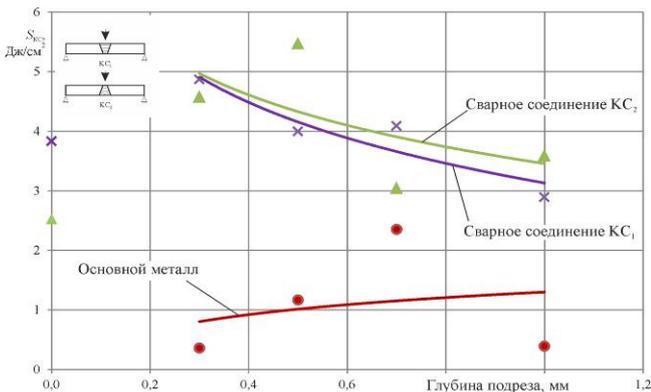


Рисунок 7 – Влияние глубины надреза на динамическую прочность по стандартному отклонению (СКО)

**Задача оценки и управления качеством (риском эксплуатации) сварных соединений.** Статистический показатель качества  $\Pi(x)$  является вероятностью  $P(x \geq x^*)$  того, что значения  $x$  изучаемой характеристики превысят ее нормативное значение  $x^*$ , определяемое соответствующим нормативным документом (стандартом, техническими условиями и т.п.).

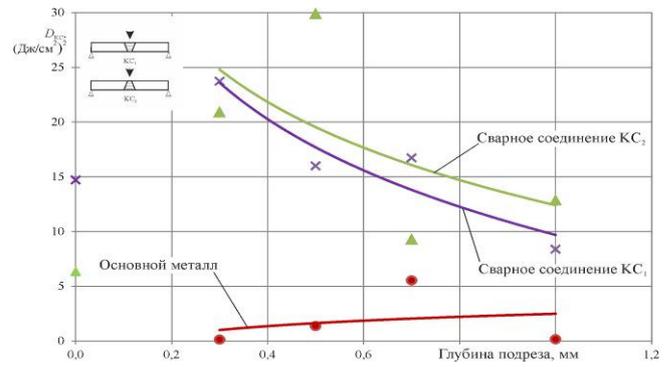


Рисунок 8 – Влияние глубины надреза на динамическую прочность по дисперсии

Поскольку все характеристики механических свойств являются случайными величинами [5], а их распределения  $P(x)$  с приемлемой для практических целей погрешностью можно описать нормальным законом [5], вводится две оценки статистического показателя качества:

а) показатель качества оценочный (теоретический) (рисунок 9, а), называемый просто статистическим показателем качества (СПК),

$$\Pi(x) = P(x \geq x^*), \quad (3)$$

$$\Pi(x) = \int_{x^*}^{\infty} p(x) dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S_{\bar{x}}} \int_{x^*}^{\infty} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{x}}{S_{\bar{x}}}\right)^2\right] dx; \quad (3a)$$

б) показатель качества по испытаниям (ПКИ) (рисунок 9, б)

$$\Pi_u(x) = P(x^* \leq x \leq \max x); \quad (4)$$

$$\Pi_u(x) = \int_{x^*}^{\max x} p(x) dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S_{\bar{x}}} \int_{x^*}^{\max x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{x}}{S_{\bar{x}}}\right)^2\right] dx, \quad (4a)$$

где  $\max x$  – максимальное значение в вариационном ряду

$$\min x = x_1, x_2, \dots, x_n = \max x \quad (5)$$

из  $n$  результатов статистических испытаний.

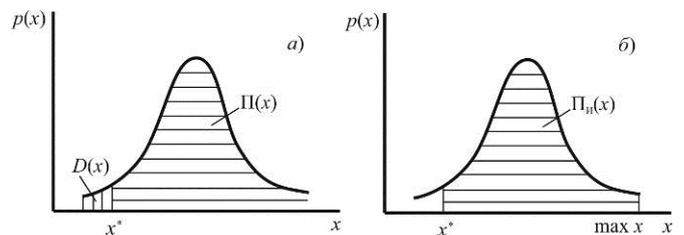


Рисунок 9 – К определению статистических показателей качества материалов по механическим свойствам

В формулах (3) и (4):  $p(x)$  – плотность распределения,  $\bar{x}$  – среднее значение,  $S_{\bar{x}}$  – среднее квадратическое отклонение.

Отклонение ПКИ от СПК является погрешностью ПКИ по отношению к СПК, выраженной в процентах и рассчитываемой по формуле

$$\Delta_{\Pi}(x) = \frac{\Pi(x) - \Pi_u(x)}{\Pi(x)} \cdot 100\%. \quad (6)$$

Статистический показатель брака  $D(x)$  является вероятностью  $P(x < x^*)$  того, что значения  $x$  изучаемой характеристики выйдут за ее нижнюю границу  $x^*$ , установленную соответствующим нормативным документом (рисунок 9, а):

$$D(x) = P(x < x^*) = \int_{-\infty}^{x^*} p(x) dx = 1 - \Pi(x). \quad (7)$$

Риск – ожидание брака (у изготовителя и/или потребителя). Показатель риска  $\rho(x)$  является отношением показателя брака  $D(x)$  к показателю качества  $\Pi(x)$  по данной характеристике  $x$ :

$$\rho(x) = \frac{D(x)}{\Pi(x)}. \quad (8)$$

Величину показателя риска анализируют в интервале  $0 \leq \rho(x) \leq 1$ .

Нижнее значение риска  $\rho(x) = 0$  соответствует случаю, когда показатель брака  $D(x) = 0$ ; его верхнее значение  $\rho(x) = 1$  в формуле (9) ограничено условием, что показатели качества и брака окажутся равными  $D(x) = \Pi(x) = 0,5$ . Значение

$$\rho_k(x) = 1 \quad (10)$$

называется критическим значением риска.

Чем меньше показатель риска  $[\rho(x) \Rightarrow 0]$ , тем выше качество материала; напротив, рост показателя риска  $[\rho(x) \rightarrow 1]$  означает соответствующее ухудшение качества или, что то же, увеличение доли брака. Эти закономерности отражаются формулами, по которым риск можно вычислить либо только через показатель качества

$$\rho(x) = \frac{1}{\Pi(x)} - 1 = k_Q - 1, k_Q = \frac{1}{\Pi(x)}, \quad (11)$$

либо только через показатель брака

$$\rho(x) = \frac{1}{\frac{1}{D(x)} - 1} = \frac{1}{k_p - 1}, k_p = \frac{1}{D(x)}. \quad (12)$$

Примем для примера, что допустимый риск  $[\rho(x)]$  соответствует 5%-ному браку, т.е.  $D(x) = 0,05$ ; в таком случае, согласно (12), имеем  $\Pi(x) = 0,95$ , и, следовательно,

$$[\rho(x)] = \frac{0,05}{0,95} = 0,0526. \quad (13)$$

Согласованная в формуле (7) зависимость  $\Pi(x)$  и  $D(x)$  от  $\rho(x)$  называется оперативной характеристикой риска. На рисунке 10 вертикальным пунктиром указано допустимое значение риска (13), а горизонтальными линиями – соответствующие ему значения показателей  $\Pi(x)$  и  $D(x)$  [6, 7].

В зависимости от экономической и иной ответственности объектов, которая устанавливается на основании технико-экономических расчетов, в соответствии с СТБ 1234 вводится три категории их качества (таблица 9). Каждая категория определяется соответствующими нормативными значениями взаимосвязанных статистических показателей качества, брака и риска.

Заметим, что зависимости (11) и (12) между показателями риска и качества можно представить и иначе:

$$\Pi(x) = \frac{1}{1 + \rho(x)}; \quad (14)$$

$$D(x) = \frac{1}{1 + \frac{1}{\rho(x)}}. \quad (15)$$

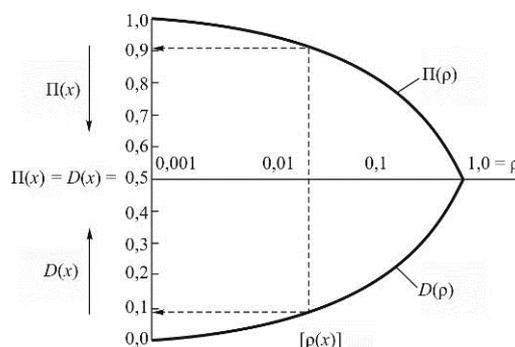


Рисунок 10 – Оперативная характеристика риска по качеству материалов

Таблица 9 – Нормированные значения статистических показателей качества, брака и риска

Категории	$\Pi(x)$ , не менее	$D(x)$ , не более	$[\rho(x)]$
Высшая	0,995	0,005	0,0050
Первая	0,990	0,010	0,0101
Вторая	0,950	0,050	0,0526

Применительно к проблеме оценки ударной вязкости сварных соединений нефтепроводных труб примем  $x = KC$  и  $\rho(x) = \rho(KC)$ , где  $KC$  – ударная вязкость образцов, содержащих сварное соединение. Исследования базируются на формулах (3), (7) и (8). Тогда представляется возможным по результатам статистических испытаний установить корреляцию показателя риска эксплуатации  $\rho(KC)$  с данными дефектоскопии, например, ультразвуковой и/или магнитной. Тем самым решается практически важная задача управления качеством сварных соединений с целью минимизации или даже предотвращения опасных эксплуатационных повреждений труб в течение определенного срока.

**Пример количественной оценки статистических показателей качества сварных соединений и риска их эксплуатации.** Ниже даны статистический анализ качества сварных соединений и риска их эксплуатации по результатам лабораторных испытаний. На рисунках 11 и 12 даны гистограммы и плотности нормального распределения ударной вязкости сварных соединений в связи с глубиной надреза.

Чтобы рассчитать показатели качества  $\Pi(KC_{ss})$  и его нарушения  $D(KC_{ss})$ , а также показатель риска  $\rho(KC_{ss})$ , необходимо иметь нормированное значение  $KC_{norm}$ , установленное таким документом. Поскольку для данных условий испытания такого нормативного документа нет, было условно принято (для дальнейших расчетов) два его значения  $KC_{ss}^{norm} = 7$  и  $10$  Дж/см<sup>2</sup>. Эти значения указаны вертикальными пунктирными линиями на рисунках 11 и 12 соответственно для схемы испытаний  $KC_1$  и  $KC_2$ . Результаты расчетов сведены в табли-

цу 10. На рисунках 13 и 14 даны графические зависимости  $\rho(KC_{ss})$  от уровня ударной вязкости  $KC_{ss}$  в связи с глубиной надреза. Закономерность естественная: чем выше ударная вязкость  $KC_{ss}$ , тем меньше риск эксплуатации сварных соединений – независимо от того, какое значение принято для величин  $KC_{norm}$ . А если учесть конкретные значения  $KC_{norm}$ , то можно установить: чем выше норма  $KC_{norm}$ , тем больше риск.

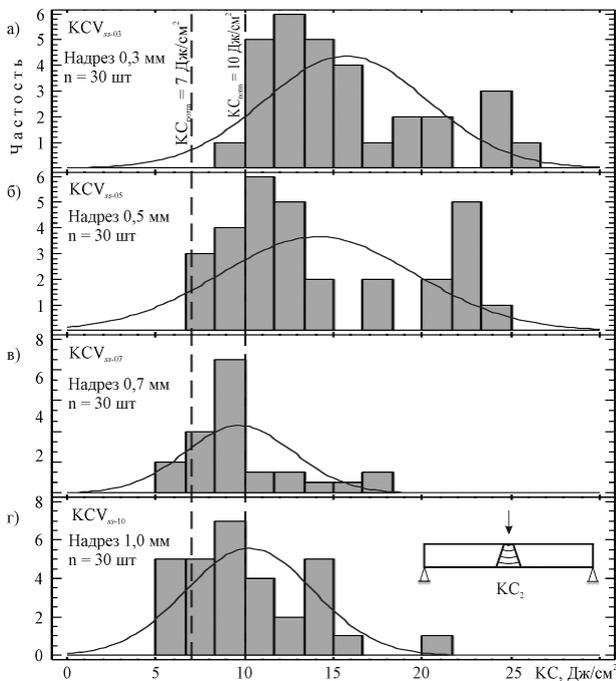


Рисунок 11 – Гистограммы и плотности нормального распределения ударной вязкости сварных соединений, испытанных по схеме  $KC_2$

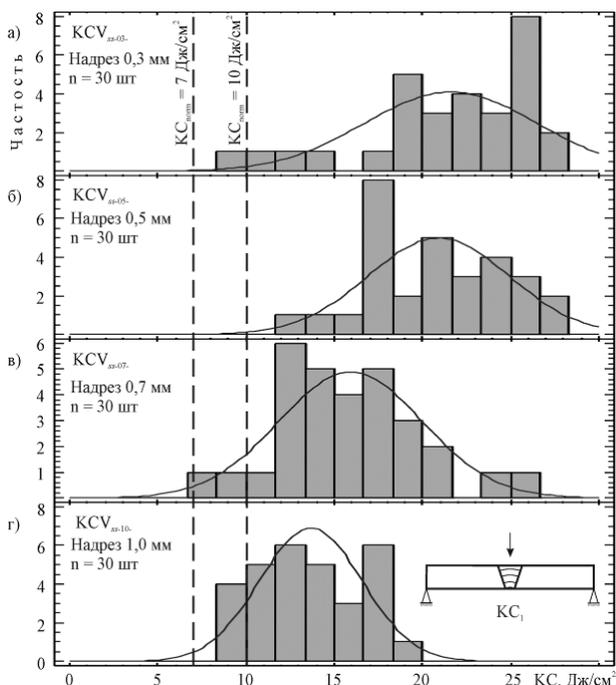


Рисунок 12 – Гистограммы и плотности нормального распределения ударной вязкости сварных соединений, испытанных по схеме  $KC_1$

Таблица 10 – Оценка статистических показателей качества и риска по результатам статистических показателей

Тип образца	$KC_{norm} = 7$			$KC_{norm} = 10$		
	$D(KC_{ss})$	$\Pi(KC_{ss})$	$\rho(KC_{ss})$	$D(KC_{ss})$	$\Pi(KC_{ss})$	$\rho(KC_{ss})$
Сварное соединение, испытанное по схеме $KC_2$ с надрезом, мм	0,3	0,0280	0,9720	0,0288	0,1053	0,8947
	0,5	0,0914	0,9086	0,1006	0,2206	0,7794
	0,7	0,1869	0,8131	0,2299	0,5391	0,4609
	1,0	0,1782	0,8218	0,2168	0,4673	0,5327
Сварное соединение, испытанное по схеме $KC_1$ с надрезом, мм	0,3	0,0013	0,9987	0,0014	0,0086	0,9914
	0,5	0,0002	0,9998	0,0002	0,0031	0,9969
	0,7	0,0144	0,9856	0,0146	0,0734	0,9266
	1,0	0,0106	0,9894	0,0107	0,1023	0,8977

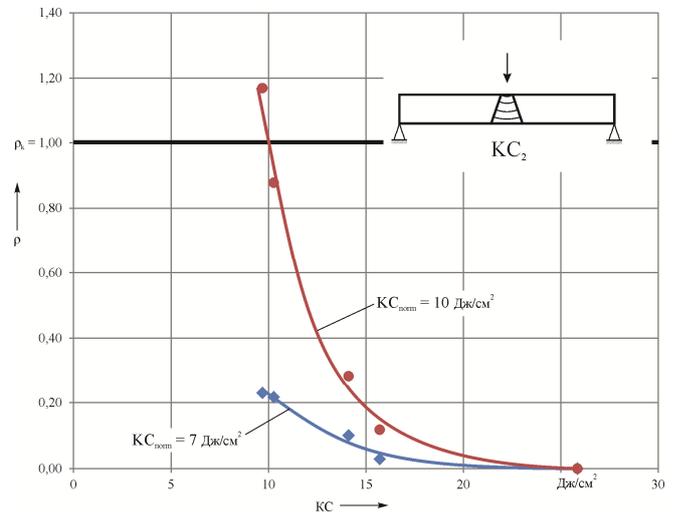


Рисунок 13 – График зависимости показателя риска от ударной вязкости, испытанной по схеме  $KC_2$

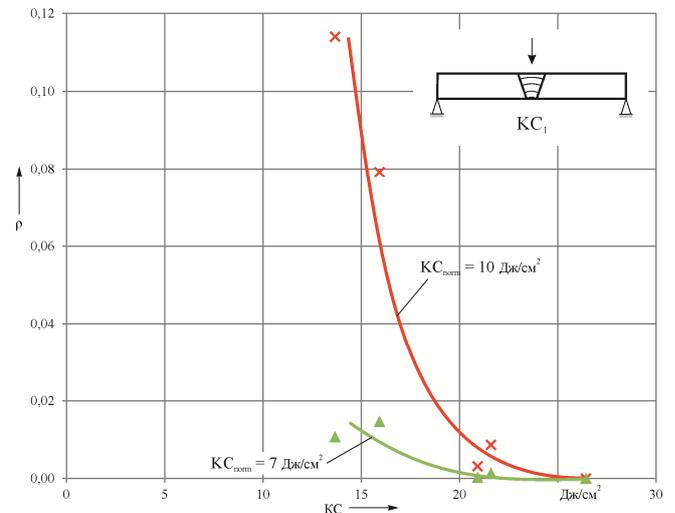


Рисунок 14 – График зависимости показателя риска от ударной вязкости, испытанной по схеме  $KC_1$

Представим теперь полученные данные в виде оперативных характеристик риска (ОХР) (рисунки 15 и 16).

Если анализировать ОХР по результатам испытаний по схемам ( $KC_1$  и  $KC_2$ ) (см. рисунки 15 и 16), то заключения будут различаться в зависимости от принятого нормативного значения  $KC_{norm}$ . А именно для схемы испытаний  $KC_2$ : при  $KC_{norm} = 7$  Дж/см<sup>2</sup> (см. рисунок 15, а) высшая и I категории качества не достигаются вовсе, II категории соответствуют только образцы с надрезом глубиной 0,3 мм, а образцы с глубиной надреза 0,5, 0,7 и 1,0 мм выходят за рамки установленного качества. А общее заключение таково: риск эксплуатации тем выше,

чем больше глубина подреза. Конечно, эта закономерность качественно понятна и без испытаний. Но результаты статистических испытаний дают необходимую практике количественную оценку риска.

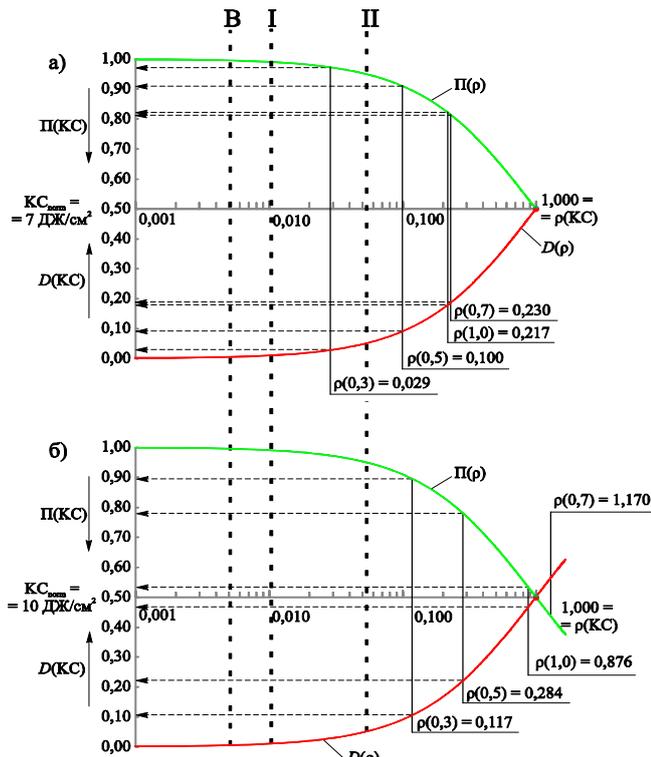


Рисунок 15 – Оперативная характеристика риска для сварных соединений, испытанных по схеме  $KC_2$ : а –  $K_{Snorm} = 7$  Дж/см², б –  $K_{Snorm} = 10$  Дж/см² (В – высшая, I – первая, II – вторая категории качества)

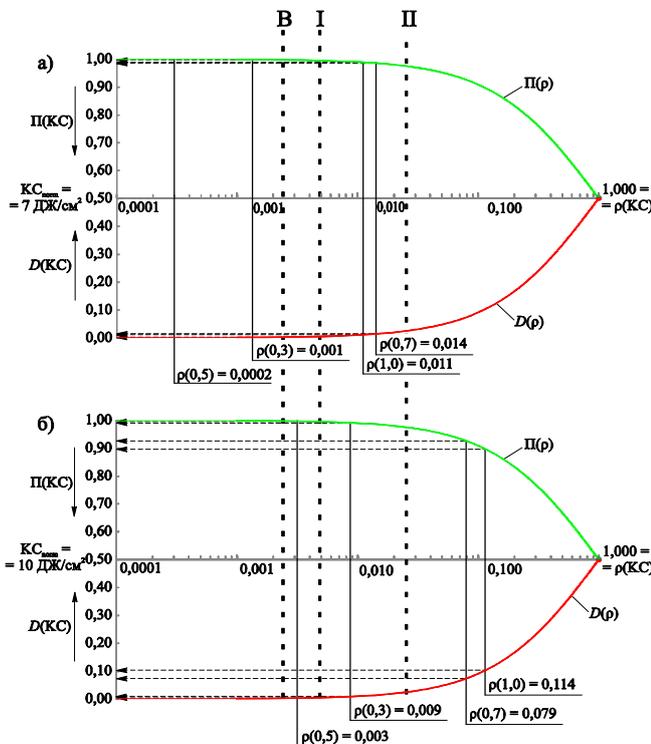


Рисунок 16 – Оперативная характеристика риска для сварных соединений, испытанных по схеме  $KC_1$ : а –  $K_{Snorm} = 7$  Дж/см², б –  $K_{Snorm} = 10$  Дж/см² (В – высшая, I – первая, II – вторая категории качества)

Если же анализ вести по  $K_{Snorm} = 10$  Дж/см² (см. рисунок 15, б), то выводы будут другими: все результаты испытаний не достигают минимально требуемого качества (II категория). Таким образом, может быть поставлена задача управления риском эксплуатации сварных соединений.

Для схемы испытаний  $KC_1$ : при  $K_{Snorm} = 7$  Дж/см² (см. рисунок 16, а) высшей категории качества соответствуют образцы с надрезом 0,3 и 0,5 мм, а образцы с надрезом 0,7 и 1,0 мм соответствуют II категории качества.

Совершенно другая картина для  $K_{Snorm} = 10$  Дж/см² (см. рисунок 16, б) высшая категория качества не достигается ни одним типом образцов, I категории соответствуют образцы с надрезом 0,5 мм, а II категории – образцы с глубиной надреза 0,3 мм, а образцы с глубиной надреза 0,5; 0,7 и 1,0 мм выходят за рамки установленного качества.

На рисунке 17 даны гистограммы и плотности нормального распределения ударной вязкости сварных соединений, испытанных по двум схемам ( $KC_1$  и  $KC_2$ ) без надрезов. Нормированное значение  $K_{Snorm}$ , возьмем аналогично описанным выше образцам, равным 7 и 10 Дж/см².

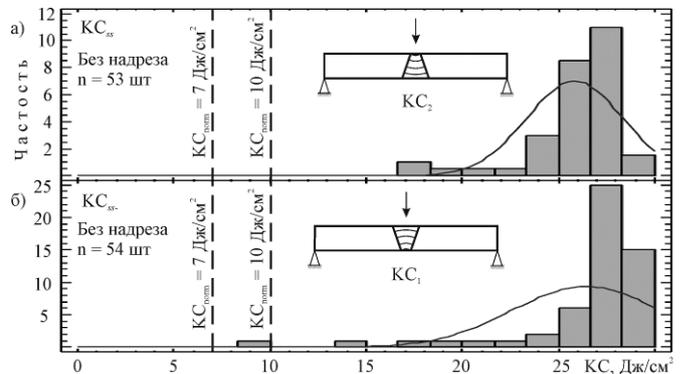


Рисунок 17 – Гистограммы и плотности нормального распределения ударной вязкости сварных соединений

Результаты расчетов сведены в таблицу 11.

Таблица 11 – Оценка статистических показателей качества и риска по результатам статистических показателей

Тип образца	$K_{Snorm} = 7$ Дж/см²			$K_{Snorm} = 10$ Дж/см²		
	$D(KC_{ss})$	$P(KC_{ss})$	$\rho(KC_{ss})$	$D(KC_{ss})$	$P(KC_{ss})$	$\rho(KC_{ss})$
Сварное соединение, испытанное по схеме $KC_2$ без надреза	$3,69 \cdot 10^{-14}$	1	$3,69 \cdot 10^{-14}$	$1,58 \cdot 10^{-10}$	1	$1,58 \cdot 10^{-10}$
Сварное соединение, испытанное по схеме $KC_1$ без надреза	$2,00 \cdot 10^{-7}$	1	$2,00 \cdot 10^{-7}$	$9,10 \cdot 10^{-6}$	1	$9,10 \cdot 10^{-6}$

Из таблицы видно, что все значения риска  $\rho(KC_{ss}) \approx 0$ , что соответствует высшей категории качества.

Далее ставится принципиально новая задача о поиске связей между ударной прочностью  $K_C$  и каким-либо параметром УЗВ контроля.

**Основные выводы.** Разработана и впервые экспериментально реализована методика статистических испытаний сварных соединений при динамическом нагружении (ударном изгибе), которая имеет четыре особенности:

1 В результате испытаний дается оценка двух статистических показателей:  $P(KC_{ss})$  – параметр качества сварных соединений по критерию ударной вязкости  $K_{C_{ss}}$ , определяемый как вероятность превышения слу-

чайной величиной  $K_{C_{ss}}$  нормативного значения  $K_{C_{norm}}$ , и  $D(K_{C_{ss}})$  – параметр нарушения качества сварных соединений, определяемый как вероятность выхода случайных значений  $K_{C_{ss}}$  за принятую нижнюю границу  $K_{C_{norm}}$ . Ясно, что эти два параметра исчерпывающим образом характеризуют динамическую прочность сварных соединений в вероятностном аспекте.

2 Статистические испытания на ударный изгиб производятся по двум схемам:  $K_{C_1}$ , когда растягивающие напряжения возбуждаются в корне шва, расположенном на внутренней поверхности трубы, и  $K_{C_2}$ , когда растягивающие напряжения возбуждаются, наоборот, в головке шва, расположенной на наружной поверхности трубы. Это позволяет выявить и количественно проанализировать неравнопрочность сварных соединений по толщине трубы, что имеет важное практическое значение при расчетах ее прочности и долговечности (надежности).

3 Для имитации технологических подрезов сварных соединений и количественной оценки их опасности предложено наносить на поверхности головки шва искусственные надрезы глубиной 0,3; 0,5; 0,7 и 1,0 мм, которые соответствуют подрезам, реально обнаруженным в кольцевых сварных соединениях труб нефтепровода.

4 Дополнительно к традиционной оценке ударной вязкости  $K_C$ , определяемой делением работы  $A$  (Дж) разрушения (или деформации) на площадь  $S$  (см<sup>2</sup>) сечения образца, предложено вычислять новую характеристику динамической прочности  $K_{C_w}$ , определяемую делением работы  $A$  (Дж) на момент сопротивления изгибу  $W$  (см<sup>3</sup>). Такое предложение имеет два достоинства. Во-первых, характеристика ударной прочности  $K_{C_w}$  выражается в классических единицах (МПа), тогда как для характеристики ударной вязкости  $K_C$  используют специальную (или специфическую) единицу кгс·м/см<sup>2</sup> (или Дж/см<sup>2</sup>). Во-вторых, согласно традиционному подходу принимается, что работа разрушения (деформации) равномерно распределена по сечению испытуемого на изгиб образца, что не соответствует

действительности, тогда как, согласно предложенному подходу, указанная работа распределена по высоте сечения образца неравномерно – в полном соответствии с классической теорией изгиба. Это означает, что по высоте сечения образца, как в реальности, одновременно обнаруживается как зона растяжения, так и зона сжатия.

Конечно, сделанное предложение «нарушает» более чем столетнюю традицию, и поэтому его использование вызовет, с одной стороны, несомненное «отторжение» практичными специалистами. Но, с другой стороны, физически обоснованное определение новой характеристики  $K_{C_w}$ , в конце концов, не может не быть принято – поначалу, если не взамен, то наряду с условной характеристикой  $K_C$ .

#### Список литературы

1 Шевченко, Д. Н. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособие для студентов электротехн. спец. / Д. Н. Шевченко. – Гомель : БелГУТ, 2005. – 321 с.

2 Степнов, М. Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний / М. Н. Степнов. – М. : Машиностроение, 1972. – 232 с.

3 Степнов, М. Н. Статистические методы обработки результатов статистических испытаний : справ. / М. Н. Степнов. – М. : Машиностроение, 1985. – 231 с.

4 Сопротивление материалов деформированию и разрушению : справ. пособ. : в 2 ч. / В. Т. Трощенко [и др.]; под ред. В. Т. Трощенко. – Киев : Наукова думка, 1993. – Ч. 1. – 288 с.; Ч. 2. – 701 с.

5 Сосновский, Л. А. Рассеяние свойств. Сопротивление материалов деформированию и разрушению : под общ. ред. В. Т. Трощенко. В 2 ч. Ч. 2 / Л. А. Сосновский. – Киев : Наукова думка, 1994. – С. 3–96.

6 Сосновский, Л. А. L-Риск (механотермодинамика необратимых повреждений) / Л. А. Сосновский. – Гомель : БелГУТ, 2004. – 317 с.

7 Надежность. Риск. Качество : [моногр.] / Л. А. Сосновский [и др.]; науч. ред. Л. А. Сосновский. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 358 с.

Получено 12.04.2016

**A. N. Kozik, V. V. Vorobyov, S. V. Tokar, N. V. Kovalenko, L. A. Sosnovskiy.** Statistical analysis of dynamic strength, quality and operating risk circumferential weld oil pipes.

Presented and approved the original methodology of statistical analysis of dynamic strength, quality and risk of exploitation is of welded joints.