

МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК 621.791

Б.П. Конищев¹, А.А. Родионов², А.С. Митин³

ОЦЕНКА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ТРУБ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ОАО «Выксунский металлургический завод»²,
ООО «Научно-исследовательский институт природных газов
и газовых технологий – ВНИИГАЗ»³

На основе энергетического критерия механики разрушения с привлечением модельных представлений о трещине с тонкой пластической зоной перед вершиной (модель Дагдейла – Леонова – Панасюка) проведен анализ трещиностойкости металла труб магистральных газопроводов. Предложен способ построения эталонных диаграмм разрушения труб магистральных газопроводов на основе обработки результатов натурных испытаний и требований нормативно-технической документации на трубы большого диаметра.

Ключевые слова: газопровод, электросварные прямошовные трубы, дуговая сварка под флюсом, трещиностойкость, ударная вязкость, гидростатическое давление.

Введение

Известно, что трубы для магистральных газопроводов должны соответствовать жестким требованиям нормативно-технической документации к основному металлу и сварным соединениям.

Комплекс необходимых свойств металла труб обеспечивается за счет оптимального сочетания прочностных характеристик, требований к пластичности и трещиностойкости (вязкости) трубных сталей.

Под *трещиностойкостью* металла труб в каждом конкретном случае, в соответствии с современными представлениями [1], будем понимать числовое значение критерия разрушения, определяемого неравенством вида:

$$F(p, L, T, a_i/L, b_k/L) \leq F_c, \quad (1)$$

где p – параметр внешней нагрузки; L – характерный размер трещины; a_i – другие размеры трещины, b_k – размеры элемента конструкции; $F(p, L, T, a_i/L, b_k/L)$ – аналитическое выражение критериальной величины, а F_c – критическое значение этой величины.

На плоскости (p, L) выражение $F(p, L) = F_c$, характеризующее предельное (критическое) состояние равновесия объекта с трещиной, является уравнением линии, которая называется критической диаграммой разрушения (далее – *диаграмма разрушения*). Она отделяет безопасную область (трещина не развивается), в которой $p < p_c$, $L < L_c$, от опасной (трещина распространяется), где $p > p_c$, $L > L_c$.

Этапы процесса разрушения газопровода могут быть представлены следующим образом [2]:

- а. **Зарождение дефектов** - формирование трещины.
- б. **Медленное развитие дефекта** - дефекты под воздействием того или иного фактора (или совокупности факторов) увеличиваются до своих критических размеров.
- в. **Инициирование** - в тот момент, когда воздействующие факторы (нагрузка, температура и др.), а также размер и ориентация дефекта достигнут определенного сочетания, дефект становится неустойчивым и вызывает быстро развивающееся разрушение.
- г. **Распространение** - конструкция находится в процессе разрушения.
- д. **Остановка** - на данном этапе вследствие определенных обстоятельств разрушение приостанавливается.

Представленные далее результаты относятся к изучению процесса разрушения на стадии инициирования трещины при относительно низких скоростях нагружения, обусловленном режимом работы гидравлических прессов на заводах-изготовителях труб (статическая трещиностойкость).

Режим испытаний соответствует характеру нагружения действующих магистральных газопроводов, для которых, в отличие от нефтепроводов, не характерны циклические нагрузки, вызванные особенностями работы насосных станций.

Достаточная трещиностойкость металла на стадии инициирования трещин позволяет предотвратить распространение трещины и, тем самым, обеспечить работоспособность магистрального газопровода.

Условия разрушения газопроводов. Уравнение диаграммы разрушения

Схема границ областей расчета трубопровода с трещиной приведена на рис. 1 [3].

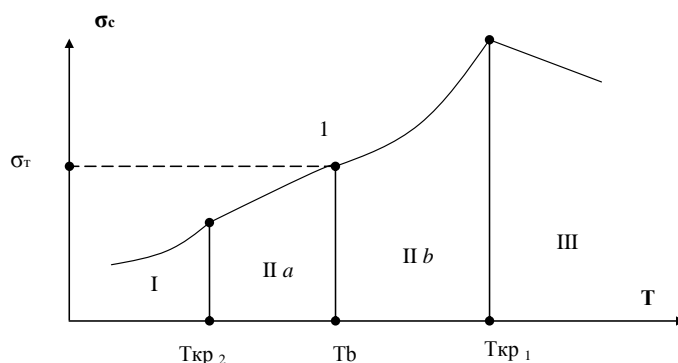


Рис. 1. Границы областей расчета:

σ_c – разрушающее напряжение в брутто-сечении; I – область хрупкого разрушения; II a и II b – области квазихрупкого разрушения при $\sigma_c \leq \sigma_t$ и $\sigma_c > \sigma_t$ соответственно; III – область пластического разрушения. Точка 1 соответствует напряжениям, равным пределу текучести (σ_t)

Из рассмотрения представленной схемы, с учетом условий работы магистрального газопровода [4] (при рабочих напряжениях в области 0,3–0,6 от предела прочности соответственно, 0,4–0,7 от предела текучести трубной стали и температуре эксплуатации в районе минус 20⁰С), следует, что с точки зрения действующих напряжений разрушение может произойти в области I или IIa, то есть в хрупкой или квазихрупкой области. При этом газопровод работает при температурах, соответствующих области разрушения III (при $T > T_{кр1}$), - значения $T_{кр1}$, определяемые по достаточно жесткому критерию 80% вязкой составляющей на образцах DWTT (T_{80}), в зависимости от марки стали – минус 19 – минус 43⁰С [2].

Таким образом, сочетание указанных факторов свидетельствует о возможности протяженного разрушения газопровода в случае появления достаточно длинных сквозных трещин (размеры которых для конкретного сортамента будут обсуждены далее), чтобы осуществилась возможность распространения трещины при относительно низких напряжениях в стенке трубы, при этом вязкая температурная область и высокая пластичность трубной стали требуют учета наличия пластической зоны в вершине трещины.

В работах [3, 5] обоснован и эффективно использован для построения критических и докритических диаграмм разрушения энергетический критерий в интегральной формулировке на базе вариационного принципа в механике разрушения:

$$\delta \int_0^L (2\lambda - \sigma_y v) dx = 0, \quad (2)$$

где δ – оператор варьирования; $\sigma_y = \sigma_y(x)$ – напряжение от заданной внешней нагрузки в теле без трещины, действующее на площадках, расположенных вдоль линии трещины (ось x совпадает с линией трещины), и раскрывающее трещину; $v = v(x, L)$ – перемещение точек берегов трещины; 2λ – поверхностная плотность энергии разрушения.

Уравнение (2) отражает наличие пластической области перед вершиной трещины предположением, что перемещение в вершине трещины $v(x, L)$ отлично от нуля.

Для расчета критической диаграммы разрушения уравнение (2) может использоваться при

$$\delta = \partial (\delta L) / \partial L. \quad (3)$$

Согласно [5, 10], энергетический критерий равновесия для задач теории трещин в идеальном упруго-пластическом теле может быть использован с привлечением модели трещины с тонкой пластической зоной перед ее вершиной на линии продолжения трещины (модель Дагдейла – Леонова – Панасюка), причем пластическая зона может, в общем случае, иметь произвольную форму.

За счет схематической замены пластической зоны дополнительным разрезом, по берегам которого приложены усилия, заменяющие собой действие пластически деформированного материала, проблема сводится к решению упругой задачи, вместо упруго – пластической.

При этом размер пластической зоны не ограничен какими-либо пределами и при достаточно малой длине трещины возможно наступление общей текучести в данном сечении тела, при котором линейный размер зоны стремится к бесконечности.

Критерий равновесия, выражающий собой закон сохранения энергии, при действительном или возможном приращении площади трещины может быть записан в виде:

$$\delta W + \delta \Gamma = \delta A, \quad (4)$$

где δA – механическая работа внешних сил; δW – объемная потенциальная энергия упругой деформации тела; $\delta \Gamma$ – энергия разрушения.

Путем варьирования площади трещины при постоянной внешней нагрузке из уравнения (4) следует уравнение (2), из которого, с учетом вариации (3) окончательно получаем выражение для критической диаграммы разрушения [3]:

$$Gc [1 - \sigma_y^2(L) / \sigma_e^2] - K^2 / E = 0, \quad (5)$$

где Gc – критическое значение потока энергии в вершину трещины (энергетический критерий Гриффитса), МПа*мм/мм²; σ_e – предел прочности, МПа/мм²; K – коэффициент интенсивности напряжений; E – модуль Юнга, МПа/мм².

Следует отметить, что характеристики линейной механики разрушения (Gc и K) в формуле (5) относятся к упругой задаче, полученной, как указывалось ранее, из упруго-пластической посредством привлечения модельных представлений. Таким образом, упруго-пластический характер исходной задачи уже заложен в формуле (5), что при этом не исключает корректное использование коэффициента $K(G)$ в качестве параметров при решении, приведенной к упругой упруго-пластической задаче.

С учетом известного соотношения $Kc^2 = EGc$, а также формулы для расчета напряжений в стенке трубы по безмоментной теории оболочек, $\sigma_y(x) = \sigma_\theta = pD/2h = \text{const}$, уравнение (5) примет вид:

$$1 - (\sigma_\theta/\sigma_{ep})^2 - (K/K_c)^2 = 0. \quad (6)$$

В безразмерном виде, вводя соотношения:

$$\lambda = \sigma_\theta/\sigma_{ep}; \quad \zeta = L/c; \quad K_0 = K/K_c, \quad c = \pi K_c^2 / 8 \sigma_{ep}^2 \quad (7)$$

получим из уравнения (6):

$$1 - \lambda^2 - K_0^2 = 0. \quad (8)$$

Используя предложенную в [7] формулу для определения коэффициента интенсивности напряжений цилиндрической оболочки с продольной сквозной трещиной длиной $2L$, которая находится под действием равномерного внутреннего давления p , в виде:

$$K = \frac{pD}{2h} \sqrt{\pi LM(\alpha)}, \quad (9)$$

где $M(\alpha)$ представлен как:

$$M(\alpha) = \begin{cases} 1 + 0,2454\alpha^2, & 0 \leq \alpha \leq 1,0, \\ 0,6907 + 0,4762\alpha, & 1,0 \leq \alpha \leq 8,0. \end{cases} \quad (10)$$

причем параметр α характеризует относительную длину трещины, для тонкостенных оболочек меняется в интервале $0 \leq \alpha \leq 8,0$ и записывается в виде:

$$\alpha^2 = \frac{2L^2}{Dh} \sqrt{12(1 - \nu^2)}, \quad (11)$$

получим в безразмерной форме ($\nu=1/3$ – коэффициент Пуассона):

$$1 - \lambda^2 - (\pi\lambda)^2 (\zeta/8) M(\zeta, b) = 0. \quad (12)$$

Соответственно в формуле (12):

$$M(\zeta, b) = \begin{cases} 1 + 0,8015(\zeta/b)^2, & 0 \leq \zeta/b \leq 0,5533, \\ 0,6907 + 0,8606(\zeta/b), & 0,5533 \leq \zeta/b \leq 4,4267, \end{cases} \quad (13)$$

где параметр:

$$b = \sqrt{\frac{Dh}{2c}} \quad (14)$$

характеризует геометрию оболочки.

Таким образом, для построения диаграмм разрушения в безразмерном виде, на базе модели упруго-пластического разрушения цилиндрической оболочки с продольной сквозной трещиной, получено уравнение (12), которое с учетом соотношений (7), (13) и (14) позволяет перейти к непосредственному анализу экспериментальных данных, полученных при проведении аттестации труб для магистральных газопроводов.

Объекты исследования. Экспериментальные данные

Объектами исследования являются прямошовные трубы для магистральных газопроводов отечественных и зарубежных заводов-изготовителей. В табл. 1 представлены необходимые характеристики основного металла труб и результаты испытаний.

Испытания труб большого диаметра для магистральных газопроводов с предварительно нанесенным продольным искусственным дефектом до разрушения проводились в условиях завода-изготовителя труб на горизонтальных гидравлических прессах, предназначенных для заводских испытаний.

Таблица 1

Характеристики основного металла труб и результаты испытаний

Маркировка трубы	Сталь	Механические свойства			Сортамент		Параметры испытаний				K _c , МПа/мм ^{3/2}
		$\sigma_{вр}$, МПа/мм ²	KCV, МПа*м/см ² (T _{кв} , °C)	KCU, МПа*м/см ² (T _{кв} , °C)	D, мм.	h, мм.	2L, мм	t, мм.	P, атм.	σ_0	
V2002I	X70	619	213 (-20)	218 (-60)	1067	26,0	300 (410)	16,0	185	36,11	12153
		623	201 (-20)	231 (-60)	1067	26,0	300 (410)	20,5	130	25,38	
		619	238 (-20)	215 (-60)	1067	26,0	300 (410)	18,5	160	31,23	
V2003 R1	X70	619	254 (-12)	219 (-60)	610	11,8	150 (203)	6,7	175	43,48	9053
		628	302 (-12)	310 (-60)	610	12,4	150 (210)	9,9	115	27,14	
		642	253 (-12)	243 (-60)	610	12,3	150 (205)	7,7	164	39,03	
CH200 3R	К60, 10Г2ФБ Ю	660	106 (-20)	116 (-60)	530	8,3	120 (205)	5,2	115	35,57	7266
		667	113 (-20)	120 (-60)	530	8,4	120 (203)	6,4	68	20,77	
V2003 R2	X80	811	306 (-20)	303 (-60)	1067	20,5	220 (270)	18,0	111	27,81	10529
		788	306 (-20)	303 (-60)	1067	20,5	220 (250)	16,7	130	32,56	
H2004 U	X70	606	146 (-20)	166 (-60)	1420	23,5	385 (480)	20,0	58	16,94	9558
		609	139 (-20)	164 (-60)	1420	24,0	385 (492)	17,6	81	23,15	
		60,7	138 (-20)	162 (-60)	1420	23,9	385 (552)	17,5	79	22,68	
H2004 U2	X80	632	162 (-20)	282 (-60)	1420	25,7	350 (482)	21,3	88	23,43	1226,8
		668	229 (-20)	293 (-60)	1420	25,2	350 (462)	21,9	73	19,84	
		674	184 (-20)	261 (-60)	1420	25,0	350 (462)	19,1	112	30,69	
H2004 U3	К60, 10Г2ФБ	643	172 (-20)	215 (-60)	1420	26,9	350 (467)	21,1	98	24,89	12575
		648	171 (-20)	230 (-60)	1420	26,9	350 (472)	22,5	92	23,36	
V2005 R1	X70	653	169 (-20)	185 (-60)	1420	26,8	350 (410)	21,0	110	28,04	13058
		676	170 (-20)	230 (-60)	1420	26,9	350 (415)	19,0	130	33,01	
		666	204 (-20)	235 (-60)	1420	26,7	350 (408)	20,0	120	30,71	
V2005 R2	X70	635	164 (-20)	202 (-60)	1420	19,1	350 (401)	14,5	65	23,51	12022
		622	174 (-20)	272 (-60)	1420	19,1	350 (400)	13,8	80	28,94	
		637	162 (-20)	178 (-60)	1420	18,9	350 (400)	13,8	70	25,60	
H2005 U	X70	643	143 (-20)	146 (-60)	1420	25,5	400 (580)	20,8	87	23,35	14874
		643	187 (-20)	206 (-60)	1420	25,5	400 (580)	20,7	86	23,09	
M2006 I	X70	659	217 (-20)	-	1219	22,0	305 (380)	17,4	84,8	22,70	12750
		655	215 (-20)	-	219	21,5	305 (360)	16,0	103	28,29	

Способ испытания труб, направленный на определение значений критического коэффициента интенсивности напряжений, K_c , приведенных в табл. 1, составляет предмет заявки на выдачу патента РФ на изобретение № 2005120812/28(023501) «Способ испытания трубы» (Решение о выдаче Патента на изобретение от 31.10.2006 г.) и в настоящей работе не рассматривается.

Приведем необходимые пояснения к табл. 1. В колонке «Сталь» приведены сведения о классе (категории) прочности основного металла труб. В колонке «Механические свойства» указаны: временное сопротивление разрыву ($\sigma_{вр}$) основного металла труб по результатам лабораторных испытаний (ГОСТ 1497 или API 5L, для иностранных производителей) в единицах (МПа/мм²). Также приведены значения ударной вязкости основного металла на образцах Шарпи (KCV) и Менаже (KCU) соответственно, при температурах эксплуатации (в основном минус 20⁰C) и строительства газопроводов (минус 60⁰C).

В графе «Сортамент» указаны наружный диаметр (D , мм) и толщина стенки (h , мм) исследуемых труб.

В колонке «Параметры испытаний» приведена базовая длина исходного надреза (искусственного дефекта), имитирующего сквозную продольную трещину ($2L$, мм), при этом в скобках указана общая длина надреза (рис. 2).

Глубина надреза обозначена как (t , мм.). Разрушающее давление в трубе по показаниям заводского манометра в атмосферах (МПа/см²) обозначено как (P , атм.), а разрушающее напряжение как (σ_0 , МПа/мм²).

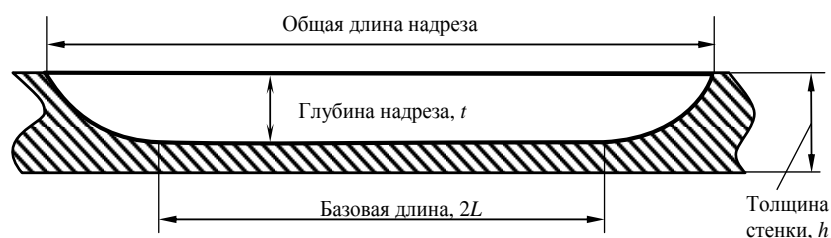


Рис. 2. Схема профиля надреза

В последней графе приведены рассчитанные по результатам испытаний критические значения коэффициента интенсивности напряжений K_c (МПа/мм^{3/2}).

Построение экспериментальных диаграмм разрушения

На рис. 3 представлены образцы экспериментальных диаграмм разрушения, построенных в соответствии с моделью, изложенной ранее, для труб различных диаметров со сравнительной целью. На рис. 3 номерами указаны диаграммы разрушения для труб следующих заводов-изготовителей.

Из рис. 3 следует, что трещиностойкость труб с увеличением диаметра возрастает, в том смысле, что при определенной длине трещины разрушающие напряжения выше для труб большего диаметра, что вполне соответствует теоретическим представлениям, согласно которым цилиндрический сосуд давления можно уподобить плоской пластине (из того же материала, той же толщины и с такой же сквозной трещиной), нагруженной растягивающим напряжением σ , номинально равным окружному напряжению σ_0 , умноженному на коэффициент концентрации напряжений $M(\alpha)$, в нашем случае заключенному в интервале 1,7–2,4. Соответственно с увеличением диаметра труб («разворачиванием» трубы в плоскость), $M(\alpha) \rightarrow 1$ и несущая способность оболочки увеличивается [7].

На рис. 4 показаны различия в решении задачи в упругой постановке (кривая 1), (по формулам (9) – (11)) и полученном в рамках используемой нами модели (12). Как и следовало ожидать, в данном случае (V2005R1, $D=1420$ мм., $h=26,9$ мм., $2L=408,5$ мм.), в области относительно коротких трещин ($L \leq 230$ мм.) наблюдаются существенные расхождения в диаграммах разрушения, обусловленные пластическим характером решения (кривая 2). При этом напряжения в случае учета пластичности металла труб в области малых трещин значительно ниже, сингулярность решения (2) выражена в меньшей степени. С практической точки зрения это означает, что общую длину исходного надреза на трубах диаметром 1420 мм следует выбирать не менее 450 мм с целью корректного определения коэффициента K_c по формулам (9)–(11). В то же время, надрез такой протяженности, соответствующий по форме (рис. 2), на реальной трубе диаметром 1420 мм изготовить довольно сложно. Поэтому, как правило, базовая длина исходного надреза определяется как $D/4$, что с учетом выхода фрезы, приводит к расчетной длине надреза 370–470 мм, что, как показано на рис. 4 т. 1, обеспечивает точность определения разрушающих напряжений в рамках модели (12), кривая 2 относительно фактического значения в районе 3–5%.

Фактически, по мнению авторов, диаграмма разрушения для труб конкретного сортамента сама по себе является объектом стандартизации требований к металлу труб по трещиностойкости. Обладая фактической диаграммой разрушения, путем сравнения ее с эталонной диаграммой, можно сделать вывод о соответствии трубы требованиям по вязкости разрушения. С точки зрения сдаточных характеристик металла труб (ударной вязкости) представляется целесообразным «привязать» конкретные значения KCV (КСУ) к

определенной точке диаграммы, например, к значению коэффициента K_c , определенного по диаграмме разрушения при рабочих напряжениях в стенке металла труб. Далее обсуждается способ построения эталонных диаграмм разрушения и представлены предложения по стандартизации значений ударной вязкости металла труб на основе диаграмм разрушения.

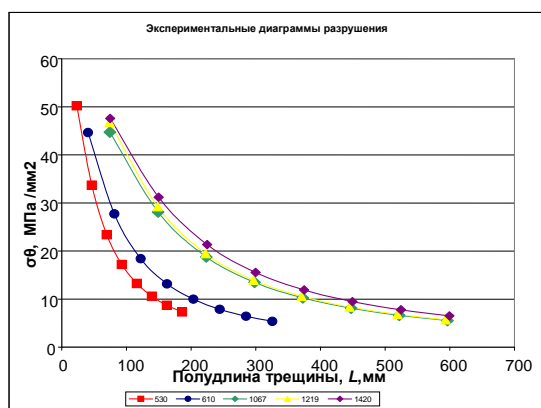


Рис. 3. Диаграммы разрушения:
 530 - труба CH2003R ($D=530\text{мм}$); 610 - труба V2003R ($D=610\text{мм}$); 1067 - труба V2002I ($D=1067\text{мм}$); 1219 - труба M2006I ($D=1219\text{мм}$); 1420 - труба H2005U ($D=1420\text{мм}$)

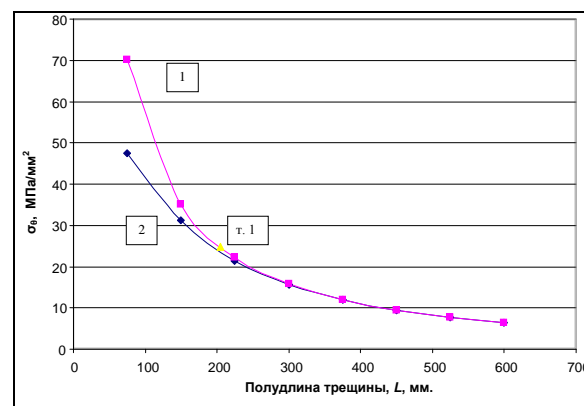


Рис. 4. Сравнительные диаграммы упругого и упруго-пластического решения:
 1 - решение задачи в упругой постановке (по формулам (9)–(11)); 2 - решение задачи в рамках модели (12)

Построение эталонных диаграмм разрушения

По мнению авторов, принципиальной разницы между способами построения фактической и эталонной диаграммы разрушения быть не должно.

Очевидно, требования к трубам большого диаметра, заложенные в нормативной документации (например, в [4]) определяют некую «идеальную» трубу с конкретными значениями диаметра, толщины стенки, прочностных и вязких базовых показателей.

Единственное ее отличие от реальной заключается в том факте, что стендовые испытания этих труб не могут быть проведены в силу «абстрактности» объекта и невозможности получить на практике трубу именно с такими характеристиками.

Но если испытания провести нельзя, то можно попытаться их смоделировать, причем на базе фактического экспериментального материала, а затем, считая трубу испытанной, использовать «модельную» диаграмму в качестве эталонной.

Напомним, что в рамках модели (7)–(12) в качестве исходных данных, необходимых для построения диаграммы разрушения, заложены $\sigma_{вр}$, D , h , K_c – соответственно предел прочности трубной стали на образцах, диаметр трубы, толщина стенки и критический коэффициент интенсивности напряжений.

Первые три характеристики определяются исходя из соответствующих технико-экономических условий и прочностных расчетов.

Попробуем определить коэффициент K_c путем проведения модельного эксперимента. Для этого вернемся к формулам (9)–(11). Очевидно, единственным неизвестным параметром, необходимым для определения коэффициента K_c , является разрушающее давление в трубе с надрезом, определяемое в процессе эксперимента.

В мировой практике [8] уже с 70-х годов прошлого века в употребление вошла очень полезная формула по определению разрушающего давления в трубе с продольным дефектом определенной длины и глубины. То, что эта формула актуальна и по сей день подтверждают не только результаты наших исследований, но и весьма авторитетные современные источники [9].

Она может быть записана в виде:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_{вр} \frac{1 - \frac{t}{h}}{1 - \frac{t}{Mh}}, \quad (15)$$

где сохранены все обозначения, введенные ранее, при этом под M понимают коэффициент концентрации напряжений (M (α), Фолиас - фактор), который различными авторами записывается по-разному.

На рис. 5 точками представлен массив экспериментальных данных, полученных при испытаниях 27 труб большого диаметра. По оси X отложены расчетные значения разрушающего давления, полученные с использованием формулы (15), где Фолиас – фактор использовался в виде:

$$M = \sqrt{1 + 2,64 \frac{L^2}{Dh}}, \quad (16)$$

который отвечает минимальному разбросу значений.

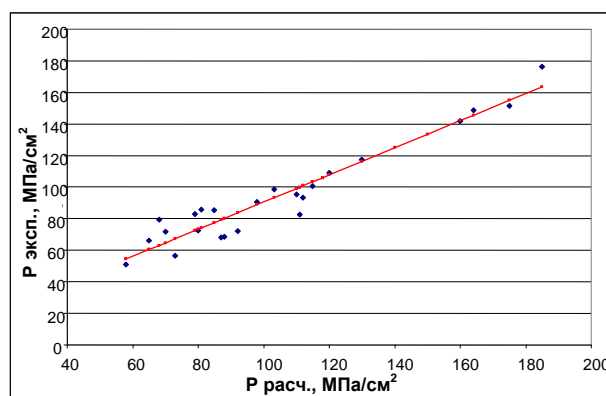


Рис. 5. Корреляционная зависимость разрушающего давления

При этом прямая линия на рис. 5 представляет результат статистической обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов по 27 точкам. Сомнений в линейном характере зависимости у авторов не возникало.

Таким образом, получена корреляционная зависимость, отражающая взаимосвязь величины разрушающего давления, рассчитанного с помощью формулы (15), с результатами, полученными при натурных испытаниях.

Проведем построение эталонной диаграммы разрушения труб для магистральных газопроводов размером 1420x25,8 мм из стали класса прочности $K60$ на рабочее давление до 100атм включительно.

Исходные данные и расчет разрушающего давления ($P_{расч}$) приведены в табл. 2, расчетные параметры для построения диаграмм представлены в табл. 3.

Эталонная диаграмма разрушения трубы $\text{Ø}1420 \times 25,8$ мм на рабочее давление 100 атм. приведена на рис. 6.

На рис. 7 для сравнения представлена эталонная диаграмма (рис. 6) и диаграмма разрушения реальной (двухшовной) трубы Н2005U, из которого следует, что трещиностойкость заводской трубы (кривая 2) несколько выше уровня, предусмотренного требованиями нормативно-технической документации (кривая 1).

Таблица 2

Исходные данные и расчет разрушающего давления ($P_{расч.}$)

Параметры модельного эксперимента									
Параметры трубы:			Испытания:		Расчет:			Давления, МПа/см ²	
$\sigma_{вр.}$, МПа/мм ²	D , мм.	h , мм.	Прив L , мм.	Надрез(t), мм.	M -фактор	t/h	σ_0 , МПа/мм ²	$P_{расч.}$, МПа/см ²	$P_{раб.}$, МПа/см ²
600	1420	25,8	350	19,35	1,7907668	0,75	258,0934	973,2255	1000

Таблица 3

Расчетные параметры для построения диаграмм

c , мм	Kc , МПа/мм ^{3/2}	b
164,52242	1229,429	0,8226478

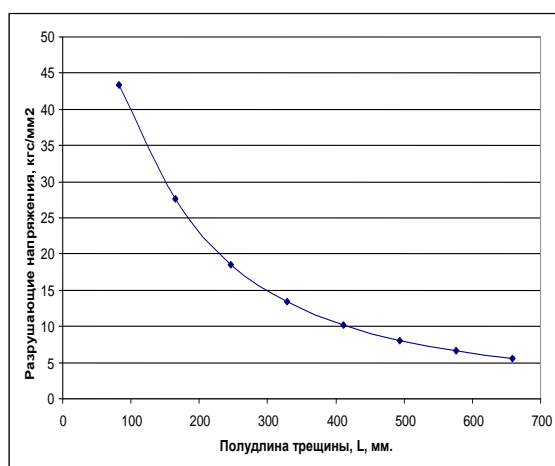


Рис. 6. Эталонная диаграмма трубы для магистрального газопровода с рабочим давлением 100 атм

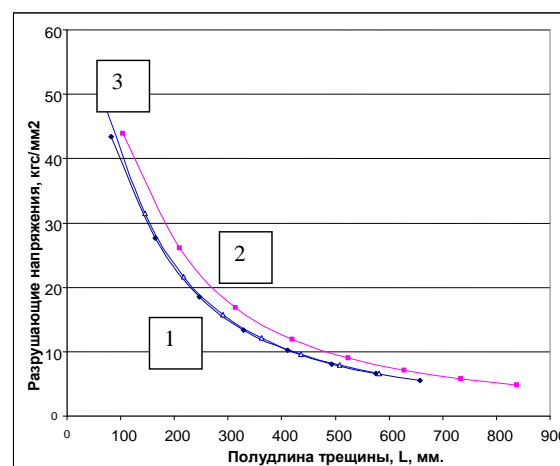


Рис. 7. Трещиностойкость 100 атмосферных труб относительно эталонной диаграммы разрушения

1 - эталонная диаграмма; 2 - труба Н2005U; 3 - труба I2005R

Также на рис. 7 представлена диаграмма разрушения одношовной трубы I2005R на рабочее давление 100 атм. (кривая 3). Как следует из рис. 7, трещиностойкость трубы I2005R уступает трубе Н2005R (двухшовной), но находится на границе допустимых требований. По всей видимости, это обусловлено различием качества листового проката.

Выводы

1. На основе энергетического критерия механики разрушения с привлечением модельных представлений о трещине с тонкой пластической зоной перед вершиной (модель Дагдейла – Леонова – Панасюка) проведен анализ трещиностойкости металла труб магистральных газопроводов.

2. Для труб большого диаметра (530–1420 мм) построены критические диаграммы разрушения на основе результатов натурных испытаний труб с искусственным дефектом до разрушения, проведенных авторами в 2002–2008 гг.

3. Предложен способ построения эталонных диаграмм разрушения труб магистральных газопроводов на основе обработки результатов натурных испытаний и требований нормативно-технической документации на трубы большого диаметра.

Библиографический список

1. **Пестриков, В.М.** Механика разрушения твердых тел: курс лекций / В.М. Пестриков, Е.М.Морозов. – СПб.: Профессия, 2002.
2. **Красовский, А.Я.** Трещиностойкость сталей магистральных трубопроводов / А.Я.Красовский, В.Н.Красико. – АН УССР. Ин-т проблем прочности. – Киев: Наукова думка, 1990.
3. **Сапунов, В.Т.** Прочность поврежденных трубопроводов. Течь и разрушение трубопроводов с трещинами: учеб. пособие / В.Т.Сапунов. – М.: КомКнига, 2005.
4. Инструкция по применению стальных труб в газовой и нефтяной промышленности (Р 51-31323949-58-2000), утвержденная ОАО «ГАЗПРОМ». – М., 2000.
5. **Партон, В.З.** Механика упруго-пластического разрушения / В.З. Партон, Е.М. Морозов. – М.: Наука, 1974.
6. **Панасюк, В.В.** Распределение напряжений около трещин в пластинках и оболочках / В.В.Панасюк, М.П.Саврук, А.П.Дацышин. – Киев: Наукова думка, 1976.
7. **Хан, Г.** Критерии распространения трещин в цилиндрических сосудах давления // Новые методы оценки сопротивления металлов хрупкому разрушению: сб. статей / под ред. акад. Ю.Н. Работнова / Г.Хан, М.Саррат, А.Розенфилд. – М.: Мир, 1972.
8. **Даффи, А.** О поведении дефектов в сосудах давления // Новые методы оценки сопротивления металлов хрупкому разрушению: сб. статей / под ред. акад. Ю.Н. Работнова / А.Даффи, Р.Эйбер, У. Макси. – М.: Мир, 1972.
9. **Demofonti, G.** Fracture behavior of X100 gaz pipeline by full – scale tests / G. Demofonti, G. Manucci and others // Proceedings of the international Pipe Dreamer's Conference held on 7–8 November, 2002 in Yokohama, Japan.
10. **Матвиенко, Ю.Г.** Модели и критерии механики разрушения / Ю.Г.Матвиенко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.

*Дата поступления
в редакцию 30.03.2010*

B.P. Konishchev, A.A. Rodionov, A.S. Mitin

GAS PIPELINE PIPES CRACK RESISTANCE ASSESSMENT

Analysis of pipe metal fracture strength at gas pipelines was performed on the basis of fracture mechanics energy criteria with taking into consideration certain crack model images that have thin lamellar zone in front of the top (Dagdale – Leonov – Panasjuk model). A way of pipe destruction reference plotting at gas pipelines was offered on the basis of the environmental test results and the requirements of norms and specifications for a large diameter pipe.

Key words: pipeline, electric-longitudinal welded pipes, submerged arc welding, crack resistance, impact hardness, hydrostatic pressure.