

УДК 621.822.6:620.178.16

## ЦИКЛИЧЕСКАЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЕМОЙ СТАЛИ МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА

А. В. БОГДАНОВИЧ, В. М. ВЕСЕЛУХА

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Беларусь

Для изучения усталостного роста трещин испытаны компактные образцы, вырезанные из трубы линейных участков нефтепровода “Дружба”. Для исследования анизотропии трещиностойкости трещину в образцах ориентировали в осевом и окружном направлениях. Построены кинетические диаграммы усталостного и циклического упругопластического разрушения, учитывающие поправку на пластичность. Определены силовые и деформационные характеристики циклической трещиностойкости исследованной стали.

**Ключевые слова:** трещиностойкость, сталь, линейная механика разрушения, диаграмма циклического упругопластического разрушения, утяжка.

На прочность и ресурс труб существенно влияют производственные и эксплуатационные дефекты, которые нередко становятся очагами зарождения усталостных трещин. Для оценки трещиностойкости труб, изготовленных из пластичной стали, использовать подходы нелинейной механики разрушения проблематично из-за несоблюдения условий плоской деформации. Один из вариантов решения проблемы – адаптация формул линейной механики разрушения, в частности для коэффициента интенсивности напряжений (КИН), к нелинейному деформированию с помощью функций поправки на пластичность [1–3]. Ниже проанализированы результаты испытаний на циклическую трещиностойкость образцов из трубной стали на основе нового инженерного подхода.

Компактные образцы толщиной 11 mm вырезали из эксплуатируемой 35 лет трубы (внешний диаметр 820 mm, толщина стенки 11 mm) линейного участка нефтепровода “Дружба” с ориентацией надреза в осевом (тип 1) и окружном (тип 2) направлениях и испытывали на воздухе на универсальной сервогидравлической машине Vi-01-102 фирмы Bangalore Integrated System Solutions Ltd, придерживаясь рекомендаций [4] и используя датчик раскрытия трещины, при коэффициенте асимметрии цикла  $R = 0,1$ , частоте нагружения  $f = 20$  Hz, синусоидальной форме цикла и температуре 17...23°C.

После испытаний измеряли утяжку  $\varphi$  опасного сечения образца (рис. 1). Отношение  $a/B$  умножали и делили на величину  $t_0$ . При этом

$$a/B = (a/B)(t_\varphi/t_0), \quad (1)$$

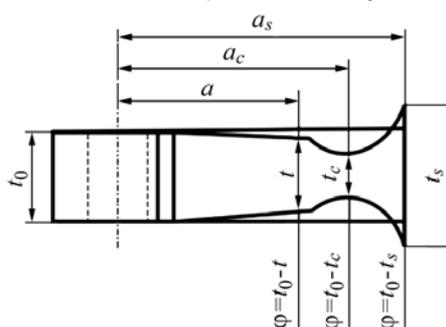


Рис. 1. Схема измерения утяжки компактного образца.

Fig. 1. Scheme of measuring the width reduction of the compact specimen.

где  $a$  – измеренная длина трещины;  $t_0$  – номинальная толщина образца;  $B$  – характерный размер образца – расстояние от оси приложения нагрузки до правой его границы (см. рис. 1: при достижении трещиной этого размера образец разделяется на две части, т. е.  $B = a_s$ ).

Следовательно, поправочная функция в формуле для КИН

$$Y(a/B) = Y[(a/B)(t_\phi/t_0)]. \quad (2)$$

При упругом деформировании это равенство является тождественным. С учетом пластической деформации сечения в функции  $Y$  необходимо принять действительную толщину образца  $t_\phi = t_0 - \phi$ , т. е. записать:

$$Y\left(\frac{a}{B} \frac{t_\phi}{t_0}\right) = Y\left(\frac{F_a}{F_0}\right) = Y(\omega_F), \quad (3)$$

где  $F_0$  – номинальная (до деформации) площадь опасного сечения образца;  $F_a$  – площадь, поврежденная трещиной длиной  $a$  и определенная с учетом пластической деформации сечения. Значит, путем введения соотношения (3) в известную зависимость [4] получаем формулы для вычисления КИН в упругопластической области:

$$K_{I \max}^F = \frac{P_{\max}}{t_0 \sqrt{B}} \omega_F^{1/2} Y(\omega_F), \quad (4)$$

$$Y(\omega_F) = 29,6 - 185,5(\omega_F) + 655,7(\omega_F)^2 - 1017(\omega_F)^3 + 638,9(\omega_F)^4. \quad (5)$$

Таким образом, функция (3) учитывает не только геометрию образца и схему его нагружения, но и интегрально пластическую деформацию в опасном сечении. А в формуле (2) введена, по существу, локальная мера поврежденности образца с трещиной  $\omega_F = F_a/F_0$ , которая имеет не только геометрический, но и физический смысл: однозначно определяет живучесть объекта с трещиной [1]. Подчеркнем, что ее устанавливают с учетом пластической деформации опасного сечения.

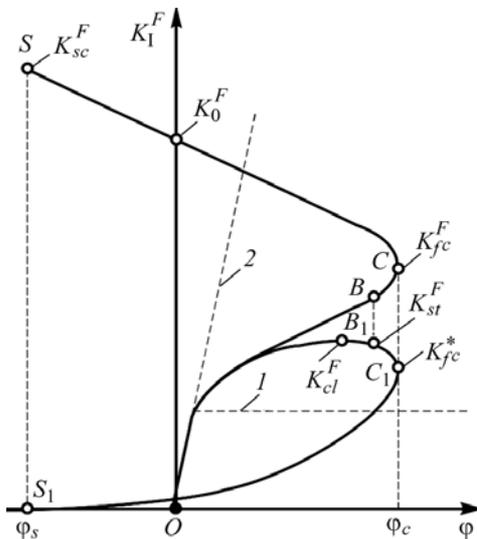


Рис. 2. Диаграмма ЦУПРОТ.

Fig. 2. Cyclic elasto-plastic fracture diagram.

Весь процесс упругопластического деформирования и разрушения предложено [1–3] описывать с помощью диаграммы циклического упругопластического разрушения образца с трещиной (диаграммы ЦУПРОТ), которую строят в координатах КИН  $K_I^F$  – абсолютная  $\phi$  или относительная  $\psi$  утяжки. Поперечную составляющую пластической деформации образца в зоне развития трещины (утяжку) определяют как  $\phi = t_0 - t_\phi$ , а относительную как  $\psi = \phi/t_0$ . При этом КИН  $K_I^F$  вычисляют по формулам линейной механики разрушения, но с поправкой на пластичность исследуемого материала. Например, для расчета КИН компактного образца используют формулы (4) и (5).

Различают два типа диаграммы ЦУПРОТ. Если при расчете величины  $K_I^F$  условно принимают, что максимальная нагрузка в процессе долома (нестабильно-

го роста трещины) остается постоянной (а это возможно, если испытательная машина достаточно жесткая или скорость нагружения высокая), то получают  $D$ -диаграмму  $OBCS$  (рис. 2). Если же учитывают падение нагрузки в ходе долома образца (когда машина имеет относительно невысокую жесткость или скорость нагружения низка), то получают  $Q$ -диаграмму  $OB_1C_1S_1$ .

Диаграмма ЦУПРОТ состоит из двух кривых: циклического упругопластического разрушения (участки  $OBC$  на  $D$ -диаграмме и  $OB_1C_1$  на  $Q$ -диаграмме) и квазистатического (долома) (участки  $CS$  на  $D$ -диаграмме и  $C_1S_1$  на  $Q$ -диаграмме). В соответствующих точках  $C$  и  $C_1$  трещина достигает критического размера  $a_c$ , которому отвечает предельные утяжка  $\varphi_c$  и значение КИН – циклическая вязкость разрушения (параметр  $K_{fc}^F$  на  $D$ -диаграмме и  $K_{fc}^*$  на  $Q$ -диаграмме). В соответствующих точках  $S$  и  $S_1$  образец разделяется на две части, при этом максимально уширяется параметр  $\varphi_s$  его опасного сечения, по которому определяют другое предельное значение КИН – квазистатическую вязкость разрушения (величина  $K_{sc}^F$  на  $D$ -диаграмме; на  $Q$ -диаграмме в этой точке  $K_I^F = 0$ ). После пересечения кривой  $CS$  с осью ординат появляется еще один параметр трещиностойкости  $K_0^F$  (рис. 2). Максимум  $Q$ -диаграммы по оси КИН (точка  $B_1$ ) соответствует началу циклического долома ( $K_{cl}^F$ ), а коэффициент  $K_{st}^F$  – началу квазистатического долома; при этом  $K_{st}^F$  не является характерной точкой  $Q$ -диаграммы, но соответствует началу резкого подъема кривой  $OBC$  (точка  $B$ ) на  $D$ -диаграмме.

В случае “идеально пластического разрушения” кривая циклического упругопластического разрушения трансформируется в прямую  $1$ , а для “идеально хрупкого” ( $\varphi = 0$ ) совпадает с осью ординат. Линия  $2$  разделяет области квазихрупкого и упругопластического разрушений. Таким образом, с помощью диаграммы ЦУПРОТ возможен анализ вязкохрупкого перехода, например, при изменении размеров образца или температуры испытания (рис. 3 и 4; таблица).

В связи с несоблюдением условия плоской деформации в таблице приведены условные значения циклической вязкости разрушения стали  $K_Q$ . Но при вычислении КИН с учетом поправки на пластичность материала можно определять предельное значение КИН  $K_{fc}^F$  по диаграмме ЦУПРОТ. Для трещины, ориентированной в окружном направлении, среднее значение  $K_{fc}^F = 79,6 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ , что на 35,7% выше условного  $K_Q = 51,2 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ .

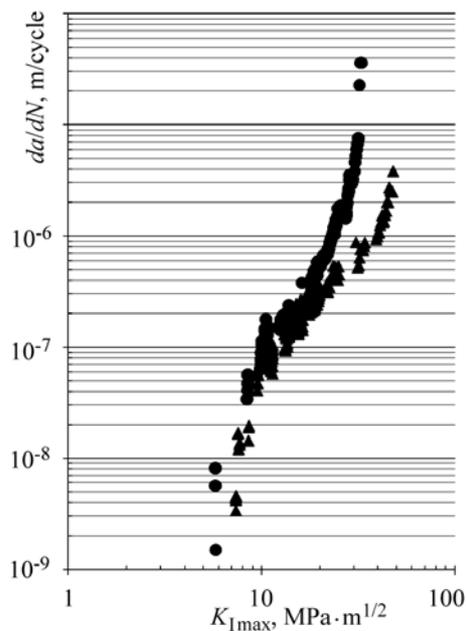


Рис. 3. Кинетическая диаграмма усталостного разрушения компактных образцов типа 1 (▲) и 2 (●).

Fig. 3. Kinetic fatigue fracture diagram for the specimens of type 1 (▲) and 2 (●).

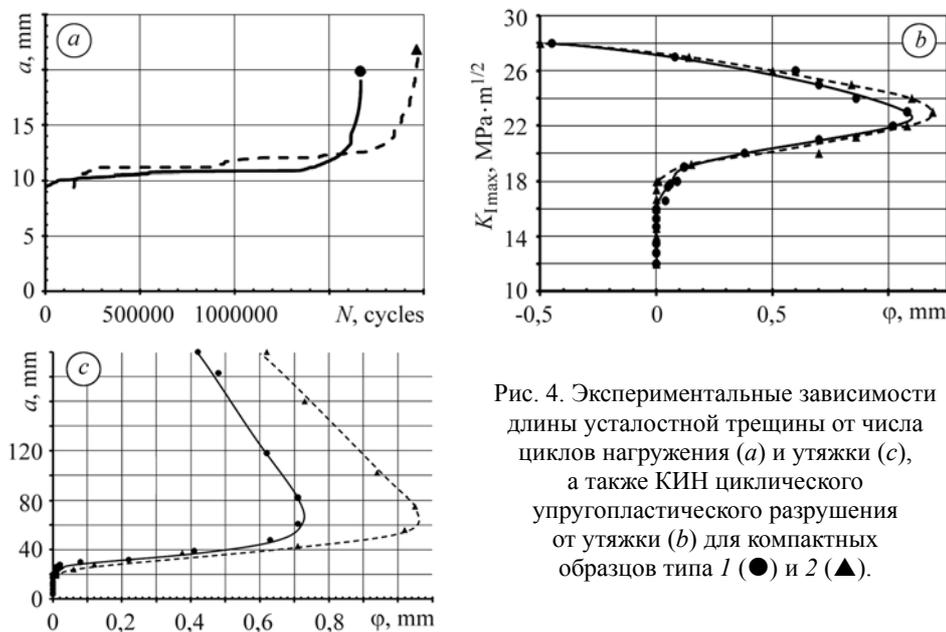


Fig. 4. Experimental dependences of fatigue crack length,  $a$ , on a number of loading cycles,  $N$ , width reduction (c) and SIF of cyclic elasto-plastic fracture on the width reduction (b) for compact specimens of type 1 (●) and 2 (▲).

#### Характеристики циклической трещиностойкости трубной стали

Параметры	Обозначение	Тип образца	
		1	2
$K_{I \max}^?$ MPa $\sqrt{m}$	$K_{th}$	$\frac{6,5 \dots 8,0}{7,25}$	$\frac{5,5 \dots 6,5}{6,0}$
	$K_Q$	$\frac{48,0 \dots 54,4}{51,2}$	$\frac{25,1 \dots 33,0}{29,05}$
$K_{I \max}^F$ , MPa $\sqrt{m}$	$K_{th}^F$	$\frac{6,5 \dots 8,0}{7,25}$	$\frac{5,5 \dots 6,5}{6,0}$
	$K_{fc}^F$	$\frac{72,0 \dots 87,2}{79,6}$	$\frac{51,0 \dots 70,2}{60,6}$
Скорость роста трещины, m/cycle	$\left(\frac{da}{dn}\right)_{fc}$	$\frac{(0,38 \dots 1,37) \cdot 10^{-9}}{8,75 \cdot 10^{-10}}$	$\frac{(0,44 \dots 3,61) \cdot 10^{-9}}{2,03 \cdot 10^{-9}}$
Длина трещины $a$ , mm	$a_{fc}$	23	$\frac{22,0 \dots 23,0}{22,5}$
Утяжка образца $\phi$ , mm	$\phi_c$	$\frac{1,06 \dots 1,18}{1,12}$	$\frac{0,55 \dots 0,75}{0,65}$
	$\phi_s$	$\frac{-0,50 \dots -0,45}{-0,475}$	$\frac{-0,46 \dots -0,35}{-0,405}$

Аналогично для трещины, ориентированной в осевом направлении трубы,  $K_{fc}^F = 60,6 \text{ MPa}\sqrt{m}$ , а  $K_Q = 29,05 \text{ MPa}\sqrt{m}$  (52,1%). Отметим, что значения  $K_{fc}^F$  и  $K_Q$  выше для образцов типа 2, т. е. сопротивление росту трещины существеннее в

окружном направлении, нежели в осевом. Об этом свидетельствует и критическая скорость  $\left(\frac{da}{dn}\right)_{fc}$  роста трещины в момент циклического долома образца: для образцов типа 1 она выше, чем для образцов типа 2, на ~57% (см. таблицу). Хотя при этом критическая длина трещины  $a_{fc}$  в обоих образцах практически одинакова (22,5 и 23 мм соответственно).

Важной характеристикой трещиностойкости материала является пороговое значение КИН  $K_{th}$ , которое указывает на опасность распространения малых трещин. Выявлено, что значения  $K_{th}$  для образцов типа 1 и 2 отличаются в среднем на 6 и 7,25 МПа $\sqrt{м}$  (см. таблицу), но это также свидетельствует о более высоком сопротивлении росту малых трещин трубной стали в окружном направлении (на ~17%).

Установлено, что предельная утяжка  $\phi_c$  и предельное уширение  $\phi_s$  имеют большие значения для образцов типа 2, чем для образцов типа 1: в среднем предельная утяжка – на ~42%, а предельное уширение – на ~14,7%. Этот факт, свидетельствующий о более высоких пластических характеристиках трубы после длительной эксплуатации в окружном направлении, подтверждает известную закономерность увеличения сопротивления развитию трещин с ростом пластичности ряда сталей и снижения трещиностойкости при их охрупчивании.

*РЕЗЮМЕ.* На циклічну тріщиностійкість випробувано компактні зразки, вирізані з труби лінійних ділянок нафтопроводу “Дружба”. Для вивчення анізотропії тріщиностійкості тріщину в зразках орієнтували в осьовому і коловому напрямках. Побудовано кінетичні діаграми втомного і циклічного пружно-пластичного руйнування, які враховують поправку на пластичність. Визначено силові і деформаційні характеристики циклічної тріщиностійкості досліджуваної сталі.

*SUMMARY.* The fatigue crack growth resistance tests of specimens cut out of the linear sections of the oil pipeline “Druzhba” were carried out using a universal servo hydraulic testing machine under such conditions: room temperature, frequency of 20 Hz and stress ratio  $R = 0.1$ . A crack in the specimen is oriented in the axial and circumferential directions for investigation of the anisotropy properties. Fatigue crack growth diagram and the cyclic elasto-plastic fracture curves are plotted with account of correction for plasticity. The force and deformation characteristics of the fatigue crack growth resistance of investigated steel after long-term operation are given.

1. Сосновский Л. А., Богданович А. В., Бордовский А. М. Живучесть линейных частей нефтепровода. – Гомель: НПО “Трибофатика”, 2004. – 112 с.
2. Сосновский Л. А., Богданович А. В. Анализ циклической упругопластической диаграммы образца с трещиной. Сообщ. 1 // Проблемы прочности. – 1995. – № 5–6. – С. 39–51; Сообщ. 2. – С. 52–61.
3. Sosnovskiy L. A., Bogdanovich A. V., and Sherbakov S. S. Cyclic elasto-plastic fracture diagram for a specimen with a crack // Papers on the 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Fracture, July 12–17, 2009. – Ottawa, Canada. – 2009. – CD Files. – 7 p.
4. ASME 647–00 Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates.

Получено 28.11.2010