

Закономерности роста трещин в пластичной легированной стали с учетом анизотропии свойств и времени эксплуатации*

В. М. Веселуха^а, А. В. Богданович^а, А. Н. Козик^б, В. В. Воробьев^б

^а Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь

^б ОАО “Гомельтранснефть Дружба”, Гомель, Беларусь

Обсуждаются результаты испытаний на трещиностойкость образцов из пластичной стали, вырезанных из трубы линейного участка нефтепровода. Для изучения анизотропии свойств трещину в образце ориентировали в осевом и окружном направлении трубы. Приведены характеристики циклической трещиностойкости исследуемой стали после длительной эксплуатации.

Ключевые слова: циклическая трещиностойкость, нефтепровод, длительная эксплуатация.

Существенное влияние на прочность и ресурс труб оказывают дефекты технологического и эксплуатационного характера, которые нередко становятся очагами усталостных трещин. Оценивать трещиностойкость труб, изготовленных из пластичной стали, с использованием подходов нелинейной механики разрушения затруднительно из-за несоблюдения условий плоской деформации. Один из вариантов решения данной проблемы состоит в экстраполяции формул линейной механики разрушения для коэффициента интенсивности напряжений (КИН) на существенно нелинейную стадию деформирования с помощью функций поправки на пластичность. Ниже анализируются результаты испытаний на циклическую трещиностойкость образцов из стали трубопровода на основе нового инженерного подхода.

Для экспериментальной оценки характеристик циклической трещиностойкости материала труб линейного участка нефтепровода проводили испытания компактных образцов на универсальной сервогидравлической машине Vi-01-102 при внецентренном растяжении в условиях комнатной температуры с частотой 20 Гц и синусоидальной форме цикла при температуре 17...23°C. Для изучения анизотропии трещину в образцах ориентировали в двух направлениях: осевом и окружном. Образцы для испытаний вырезали из трубы линейного участка нефтепровода “Дружба” в исходном состоянии (из аварийного запаса, хранившегося более 30 лет на открытом воздухе) и после длительной эксплуатации с ориентацией надреза и усталостной трещины в осевом и окружном направлении (рис. 1).

Компактный образец с зафиксированным датчиком раскрытия вершины трещины устанавливали в захватах сервогидравлической испытательной машины. Затем предварительно выращивали начальную трещину от надреза [1]. Схема испытания компактного образца приведена на рис. 2,а.

После испытаний проводили измерение утяжки φ (рис. 2,б) опасного сечения образца, а величину КИН с учетом поправки на пластичность определяли по следующей формуле [2, 3]:

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

$$Y(\omega_F) = 29,6 - 185,5(\omega_F) + 655,7(\omega_F)^2 - 101,7(\omega_F)^3 + 638,9(\omega_F)^4; \quad (2)$$

* Доклад на Международной научно-технической конференции “Усталость и термоусталость материалов и элементов конструкций” (Киев, 2013).

$$\omega_F = F_l / F_0, \quad (3)$$

где P_{\max} – максимальная нагрузка цикла; l – измеренная длина трещины; t_0, B – размеры опасного сечения образца (рис. 2,а); $Y(\omega_F)$ – поправочная функция, учитывающая геометрию образца, схему его нагружения и интегрально величину пластической деформации в опасном сечении; F_0 – номинальная (до деформации) площадь опасного сечения образца; F_l – площадь, поврежденная трещиной длиной l и определенная с учетом пластической деформации сечения.

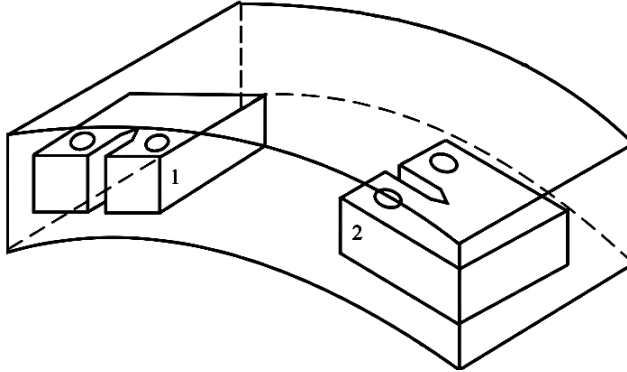


Рис. 1. Схема вырезки компактных образцов с ориентацией трещины в осевом (1) и окружном (2) направлении.

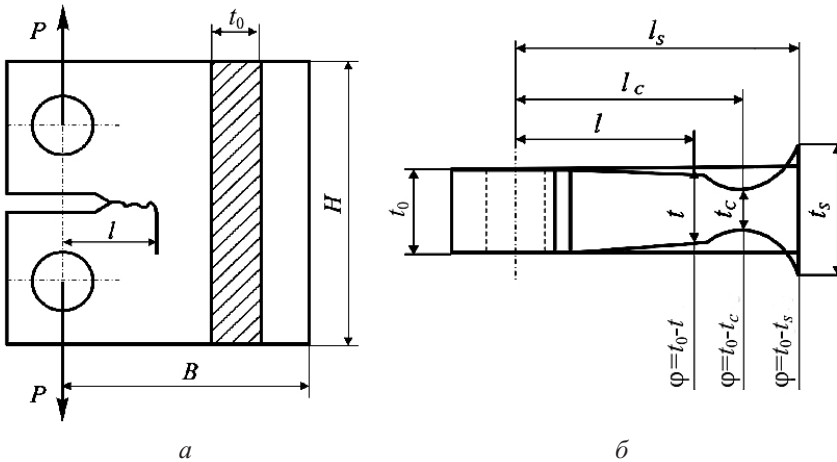


Рис. 2. Схемы испытания компактного образца (а) и измерения утяжки его опасного сечения (б).

Ранее [2, 3] процесс упругопластического деформирования и разрушения предлагалось описывать с помощью диаграммы циклического упругопластического разрушения образца с трещиной (ЦУПРОТ). Эту диаграмму строят (рис. 3) в координатах КИН K_I^F – абсолютная φ , или относительная ψ утяжка. Поперечную составляющую пластической деформации образца в зоне развития трещины (утяжку) определяют как разность номинального t_0 и текущего t_φ значений толщины образца, т.е. $\varphi = t_0 - t$ (рис. 2,б); ее относительная величина $\psi = \varphi / t_0$. При этом КИН K_I^F вычисляют по формулам линейной механики разрушения, но с поправкой на пластичность исследуемого материала.

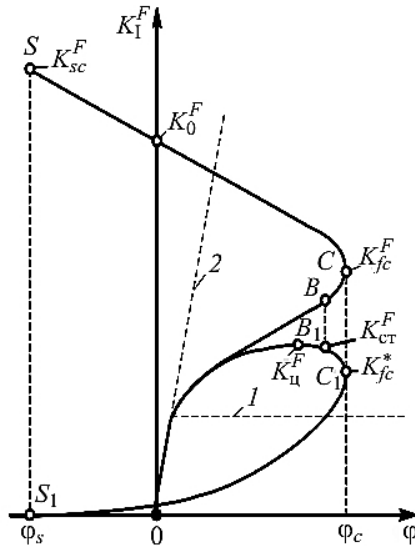


Рис. 3. Диаграмма ЦУПРОТ.

Различают два типа диаграммы ЦУПРОТ [2, 3]. Если при расчете величины K_I^F условно принять, что максимальная нагрузка в процессе долома остается постоянной (это действительно возможно, если испытательная машина достаточно жесткая или скорость нагружения высокая), получим диаграмму $OBCS$ (рис. 3), которая с учетом оси ординат напоминает букву D и поэтому ее называют D -диаграммой. Если при расчете K_I^F учитывать падение нагрузки в ходе долома образца (машина имеет относительно невысокую жесткость или скорость нагружения низкая), получим диаграмму $OB_1C_1S_1$ (рис. 3). Поскольку форма этой диаграммы напоминает букву Q, ее называют Q -диаграммой.

Диаграмма ЦУПРОТ в общем случае состоит из кривой циклического упруго-пластического разрушения (участки OBC на D -диаграмме и OB_1C_1 на Q -диаграмме) и кривой квазистатического разрушения (долома) (участки CS на D -диаграмме и C_1S_1 на Q -диаграмме). В соответствующих точках C и C_1 трещина достигает критического размера l_c , которому отвечает предельная утяжка φ_c и предельное значение КИН – циклическая вязкость разрушения (величины $K_{жс}^F$ на D -диаграмме и $K_{жс}^*$ на Q -диаграмме). В соответствующих точках S и S_1 происходит разделение образца на две части, при этом имеет место максимальное уширение φ_s его опасного сечения, по которому определяют другое предельное значение КИН – квазистатическую вязкость разрушения (величина K_{sc}^F на D -диаграмме; на Q -диаграмме $K_I^F = 0$ в точке S_1). Пересечение кривой CS с осью ординат дает еще один параметр трещиностойкости K_0^F (рис. 3).

Максимум Q -диаграммы по оси КИН (точка B_1) соответствует началу циклического долома и характеризуется параметром $K_{ц}^F$; началу квазистатического долома соответствует параметр $K_{ст}^F$ на Q -диаграмме, который не является характерной точкой этой 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 (рис. 3), в случае “идеально хрупкого разрушения” ($\varphi = 0$) – совпадает с осью ординат. Линия 2 (рис. 3) разделяет области квазихрупкого и упругопластического разрушений. Таким

образом, с помощью диаграммы ЦУПРОТ можно проанализировать вязко-хрупкий переход, например, при изменении размеров образца или температуры испытания.

Результаты испытаний образцов типа 1 и 2 с ориентацией трещины в осевом и окружном направлении приведены на рис. 4–6. В таблице представлены результаты испытаний на циклическую трещиностойкость образцов из пластичной стали, вырезанных из трубы линейного участка нефтепровода.

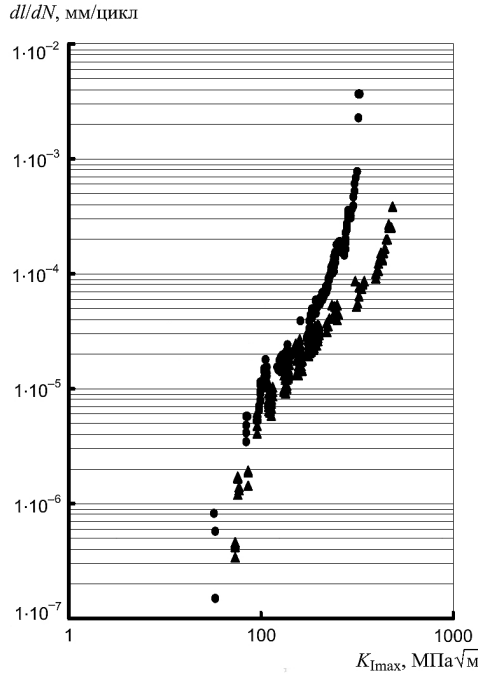


Рис. 4. Кинетические диаграммы усталостного разрушения компактных образцов типа 1 и 2: ●, ▲ – осевое и окружное направление трещины соответственно.

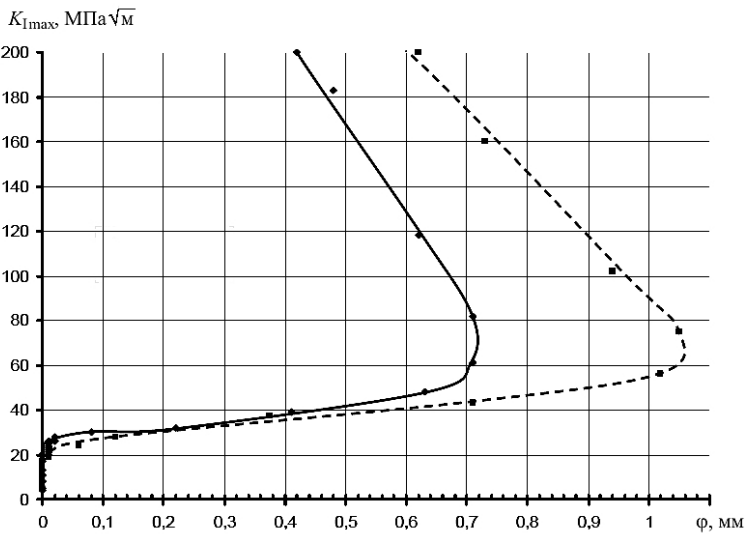


Рис. 5. Диаграммы циклического упругопластического разрушения компактных образцов типа 1 и 2. (Здесь и на рис. 6: ◆, ■ – осевое и окружное направление трещины соответственно.)

Экспериментальные значения характеристик циклической трещиностойкости исследуемой стали после длительной эксплуатации

Характеристика		Значение для образца с ориентацией трещины в направлении			
		окружном		осевом	
		до эксплуатации	после эксплуатации	до эксплуатации	после эксплуатации
$K_{I \max}$, МПа $\sqrt{м}$	K_{th}	$\frac{5,66...7,18}{6,42}$	$\frac{6,5...8,0}{7,25}$	$\frac{7,73...7,97}{7,85}$	$\frac{5,5...6,5}{6,0}$
	K_Q	33,2	$\frac{48,0...54,4}{51,2}$	$\frac{31,54...33,3}{32,42}$	$\frac{25,1...33,0}{29,05}$
$K_{I \max}^F$, МПа $\sqrt{м}$	K_{th}^F	$\frac{5,66...7,18}{6,42}$	$\frac{6,5...8,0}{7,25}$	$\frac{7,73...7,97}{7,85}$	$\frac{5,5...6,5}{6,0}$
	K_{fc}^F	81,78	$\frac{72,0...87,2}{79,6}$	$\frac{75,0...85,72}{80,36}$	$\frac{51,0...70,2}{60,6}$
Скорость роста трещины, м/цикл	$\left(\frac{dl}{dN}\right)_{fc}$	$0,538 \cdot 10^{-6}$	$\frac{(0,38...1,37) \cdot 10^{-6}}{8,75 \cdot 10^{-7}}$	$\frac{(0,86...1,35) \cdot 10^{-6}}{1,11 \cdot 10^{-6}}$	$\frac{(0,44...3,61) \cdot 10^{-6}}{2,03 \cdot 10^{-6}}$
Утяжка φ , мм	φ_c	$\frac{0,57...1,05}{0,785}$	$\frac{1,06...1,18}{1,12}$	$\frac{0,72...1,1}{0,91}$	$\frac{0,55...0,75}{0,65}$
	φ_s	-0,3	$\frac{-0,50...-0,45}{-0,475}$	-0,44	$\frac{-0,46...-0,35}{-0,405}$

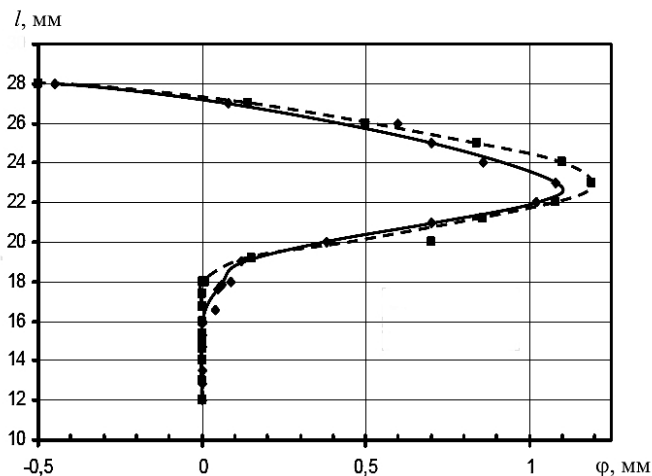


Рис. 6. Экспериментальные зависимости длины трещины l от утяжки φ компактных образцов типа 1 и 2.

Циклическая вязкость разрушения исследуемой стали K_{fc} не может быть определена по стандартному методу [1], поскольку не выполняется условие плоской деформации:

$$t \geq 2,5 \left(\frac{K_{I \max}}{\sigma_{0,2}} \right)^2. \tag{4}$$

Поэтому в таблице приведена условная величина циклической вязкости разрушения данной стали K_Q . Однако в соответствии с разработанной ранее методикой вычисление КИН с учетом поправки на пластичность материала позволяет определять предельное значение КИН K_{fc}^F с помощью построенной диаграммы ЦУПРОТ (таблица). При этом, если трещина ориентирована в образце в окружном направлении, то в среднем по результатам испытания партии образцов предельное значение КИН K_{fc}^F оказывается выше условной циклической вязкости разрушения K_Q . Если сравнить предельные значения K_{fc}^F с условными K_Q для образцов типа 1 и 2, то они оказались больше для образцов типа 2, т.е. сопротивление росту трещины на стадии предразрушения в исследуемой стали больше в окружном направлении, чем в осевом [4].

Важной характеристикой трещиностойкости материала является пороговое значение КИН K_{th} , которое указывает на опасность распространения малых трещин. Результаты испытаний показывают, что для образцов типа 1 и 2 различие в величине K_{th} незначительное: в среднем 6,42 и 7,85 МПа $\sqrt{м}$ (до эксплуатации) и 6 и 7,25 МПа $\sqrt{м}$ (после эксплуатации) соответственно (таблица). Это также свидетельствует о более высоком сопротивлении росту малых трещин исследуемой стали трубопровода в окружном направлении (на ~18 и 17% соответственно).

Деформационные характеристики циклической трещиностойкости образцов (предельная утяжка φ_c и предельное уширение φ_s) представлены в таблице и на рис. 6.

Анализ результатов испытаний показывает, что значения предельной утяжки φ_c и предельного уширения φ_s приблизительно одинаковы для образцов типа 1 и 2 из стали в исходном состоянии. Однако для образцов типа 2 значения обеих характеристик больше, чем для образцов типа 1, для материала, эксплуатировавшегося длительное время, в среднем предельная утяжка оказывается больше на ~42%, предельное уширение – на ~14,7%. Этот факт указывает на более высокие пластические свойства материала трубы после длительной эксплуатации в окружном направлении и подтверждает известную закономерность увеличения сопротивления развитию трещин с ростом пластичности ряда сталей и снижения трещиностойкости при их охрупчивании [2, 3].

Резюме

Обговорюються результати випробувань на тріщиностійкість зразків із пластичної сталі, вирізаних із труби лінійної ділянки нафтопроводу. Для вивчення анізотропії властивостей тріщину в зразку орієнтували в осьовому і обводовому напрямку труби. Наведено характеристики циклічної тріщиностійкості досліджуваної сталі після тривалої експлуатації.

1. *РД 50-345-82*. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 43 с.
2. *Сосновский Л. А., Богданович А. В., Бордовский А. М.* Живучесть линейной части нефтепровода. – Гомель: НПО “ТРИБОФАТИКА”, 2004. – 112 с.
3. *Сосновский Л. А., Богданович А. В.* Анализ диаграммы циклического упруго-пластического разрушения образца с трещиной. Сообщ. 1, 2 // Пробл. прочности. – 1995. – № 5-6. – С. 39 – 61.
4. *Bogdanovich A. V. and Veselukha V. M.* Cyclic crack resistance of the steel of oil mains after long periods of operation // Mater. Sci. – 2011. – 47, No. 1, 70–75. DOI: 10.1007/s11003-011-9369-6.

Поступила 14. 11. 2013