

УДК 622.692

Л. А. СОСНОВСКИЙ, доктор технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, А. Н. КОЗИК, кандидат технических наук, ОАО «Гомельтранснефть Дружба», Гомель, С. С. ЩЕРБАКОВ, доктор физико-математических наук, А. В. БОГДАНОВИЧ, доктор технических наук, Белорусский государственный университет, Минск, В. В. ВОРОБЬЕВ, кандидат технических наук, ОАО «Гомельтранснефть Дружба», Гомель, Л. А. ШЕМЕТ, Белорусский государственный университет, Минск

ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО СТАНДАРТА ПО МЕТОДАМ ОЦЕНКИ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ТРУБНОЙ СТАЛИ С УЧЕТОМ ЕЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Изложены основные принципы разработки государственного стандарта по методам оценки трещиностойкости трубной стали с учетом ее пластических свойств.

Трубные стали нефтяного сортамента относятся к малоуглеродистым сталям ($C \leq 0,2 \%$), легированным малым количеством марганца (0,9–1,8 %), кремния (0,4–1,2 %), хрома, никеля, меди (0,3 %) и другими элементами. Стали 17ГС и 17Г1С – основные марки металла для труб диаметром 530–1220 мм на давление 5,5–6,4 МПа. Их используют для изготовления сварных прямошовных труб в горячекатаном или нормализованном состоянии. Процесс контролируемой прокатки применяется для получения в листовых сталях магистральных трубопроводов наиболее высокого комплекса свойств путем придания особой структуры. Прокатка осуществляется по специальной программе, при которой достигается получение необходимой структуры при определенном сочетании температуры металла и величины обжатия листа [1].

Трубные стали имеют схожие механические свойства. Для стали 17Г1С-У, например, по сертификату предел прочности σ_b составляет 580–610 МПа, предел текучести $\sigma_T = 400 \dots 445$ МПа, относительное удлинение $\delta = 22 \dots 28 \%$, ударная вязкость $KCU = 90–100$ Дж/см² при минус 40 °С, предел прочности сварного шва – 580–600 МПа. При этом трубные стали обладают довольно высокой пластичностью, сохраняя ее до весьма низких температур – вплоть до 77 К [1]. По данным работы [2], где исследовались механические свойства сталей 17ГС и 17Г1С на образцах, вырезанных из труб магистральных нефтепроводов после 40 лет эксплуатации, для металла всех исследованных труб относительное поперечное сужение ψ намного больше относительного удлинения δ , что указывает на значительную величину сосредоточенной составляющей пластической деформации. Авторы [2] полагают, что для оценки работоспособности нефтепроводов относительное поперечное сужение ψ является весьма важной характеристикой, поскольку оно отражает предельную степень пластической деформации, которая достигается до разрушения.

В связи с тем, что трубопровод для транспортировки жидких или газообразных нефтепродуктов представляет сложную и весьма ответственную конструкцию, имею-

щую нередко существенную нагруженность и подвергающуюся воздействию многих факторов внешней среды в течение длительной эксплуатации, вопросы прочности и надежности для нее являются, несомненно, первоочередными. При этом наряду с характеристиками механических свойств, определяемыми при стандартных испытаниях на растяжение, ударную вязкость, необходимость оценки характеристик трещиностойкости трубных сталей в настоящее время стала очевидной: она обусловлена наличием дефектов труб (появившихся в процессе изготовления, монтажа и эксплуатации трубопровода), переменным характером их нагруженности. Соответственно возникла потребность в стандартизации методов оценки трещиностойкости материала труб.

В настоящей работе изложены принципы разработки государственного стандарта «Трубы нефтепроводные. Методы испытания трубной стали на трещиностойкость», проект которого подготовлен на основе многолетних экспериментальных исследований. Этот стандарт распространяется на испытания образцов из трубной стали, вырезанных из нефтепроводных труб с различным сроком эксплуатации и в различном техническом состоянии (новых, после эксплуатации, дефектных, вырезанных из действующих и выведенных из эксплуатации участков нефтепроводов). Стандартом предусмотрены испытания образцов, вырезанных из нефтепровода диаметром 530–1020 мм и имеющих толщину стенки 7–12 мм. Допускаются испытания образцов из труб, имеющих толщину стенки до 20 мм.

Характеристики трещиностойкости, определяемые по разработанному стандарту, могут быть использованы:

- при выборе материала нефтепроводных труб;
- контроле качества трубных сталей и сварных соединений, применяемых для изготовления линейных участков нефтепровода;
- сертификации трубных сталей по критериям статической и циклической трещиностойкости;
- расчетах на этапе проектирования конструкций нефтепровода и при оценке его остаточного ресурса;
- оценке эксплуатационной поврежденности нефтепроводных труб;

– контроле качества основного металла и сварных соединений нефтепроводных труб по критериям статической и циклической трещиностойкости в зависимости от срока эксплуатации;

– переаттестации линейных участков нефтепроводов.

Для оценки характеристик сопротивления разрушению материала трубы с учетом анизотропии предусмотрено изготавливать образцы с ориентацией надреза и трещины вдоль оси трубы и в окружном направлении (рисунок 1). Также предусмотрено изготовление образцов из труб для оценки трещиностойкости металла сварного соединения (окружного, продольного, рисунок 2). Для визуального наблюдения за развитием трещины одна из сторон образца (как правило, соответствующая наружной стороне трубопровода) может подвергаться шлифованию и полированию.

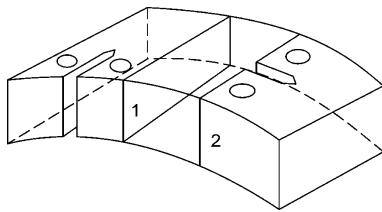


Рисунок 1 – Схема вырезки образцов из материала трубы с различной ориентацией надреза:

1 – образец для испытаний на трещиностойкость с ориентацией надреза и трещины в осевом направлении трубы; 2 – образец для испытаний на трещиностойкость с ориентацией надреза и трещины в окружном направлении трубы



Рисунок 2 – Схема вырезки образцов из материала трубы для испытаний на трещиностойкость:

1 – образцы для испытаний на трещиностойкость, вырезанные из основного материала трубы; 2 – образцы для испытаний на трещиностойкость, вырезанные из материала трубы, содержащего сварной шов

Оборудование для испытаний на трещиностойкость должно обеспечивать проведение испытаний согласно нормативным требованиям [3–5]. Для испытаний на трещиностойкость рекомендуется использовать стандартную разрывную машину с гидравлическим, электрическим или сервогидравлическим приводом, а предварительное выращивание трещины следует производить на разрывных машинах усталостного типа.

Оборудование должно быть снабжено электронной аппаратурой для измерения усилий и деформаций, устройствами для измерения частоты циклов, среднего значения и амплитуды нагрузки, регистрирующей аппаратурой для записи диаграмм «нагрузка – смещение берегов надреза», а также по необходимости крио- и термокамерами, удовлетворяющими соответствующим требованиям по точности регулировки и скорости достижения необходимого уровня температуры. Оно должно иметь управление от ПЭВМ с соответствующим программным обеспечением, позволяющим обра-

батывать сигналы датчиков силы и смещения (перемещения), производить автоматическую обработку результатов испытаний и вывод протокола испытаний с диаграммой «нагрузка – смещение берегов надреза» и численными значениями определяемых характеристик трещиностойкости. Для измерения смещения берегов надреза на образцах могут применяться датчики смещения тензорезисторного, индукционного или емкостного типа.

Стандартом предусмотрено проведение двух видов испытаний: 1) на статическую трещиностойкость; 2) на циклическую трещиностойкость. Рассмотрим их особенности.

Испытания на статическую трещиностойкость.

Испытания компактных образцов проводят по схеме внецентренного растяжения по [3, 4]. Основным критерием достижения предельного состояния является разрушение образца – разделение его на две части.

Для определения характеристик трещиностойкости материала рекомендуется испытывать 3–5 образцов. Для оценки рассеяния характеристик вязкости разрушения при заданных условиях нагружений (способ нагружения, температура) проводят испытания не менее 15–20 одинаковых образцов.

Режимы испытаний предусматривают два этапа:

1) предварительное выращивание трещины при циклическом нагружении по [3, 4];

2) статическое нагружение до разрушения (рисунок 3). Диаграмма типа I соответствует хрупкому разрушению материала в условиях плоской деформации; диаграммы типов II, III и IV соответствуют различным степеням упругопластического деформирования и частей сдвига подрастания трещины перед разрушением образца.

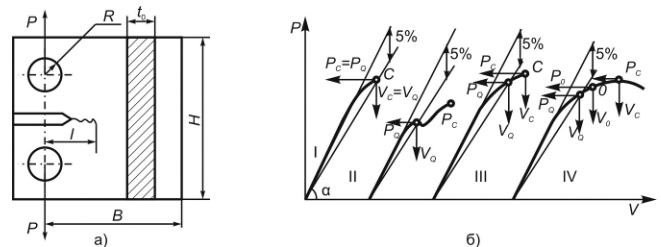


Рисунок 3 – Схема нагружения компактного образца (а) и диаграмма «нагрузка – смещение берегов надреза» при испытаниях на трещиностойкость (б):

Точка C соответствует максимальной нагрузке в процессе испытания; Q – расчетная точка; точка O соответствует началу докритического подрастания трещины

При определении трещиностойкости трубных сталей применяют, как правило, критерии линейной механики разрушения (ЛМР), основанные на коэффициентах интенсивности напряжений (КИН). При этом формулы ЛМР справедливыми считаются в условиях плоской деформации, что не всегда соблюдается по причине высоких пластических свойств материала труб.

Вместе с тем в ряде работ [6–10 и др.] показано, что поперечная деформация может служить эффективным инструментом для описания как статического, так и циклического упругопластического разрушения тел с трещинами. Значение остаточной поперечной деформации (утяжки) $\psi = 1,5 \%$ используют как критерий пере-

хода от плоского деформированного к плоскому напряженному состоянию. В работах [11–13] предложено пластичность материала учитывать путем корректировки поправочной функции Y в формуле для расчета КИН следующим образом. Вместо отношения длины трещины L к характерному размеру B образца в качестве аргумента этой функции использовать соотношение действительной (с учетом пластической деформации) площади F_l опасного сечения образца, соответствующей длине трещины L , к номинальной F_0 площади этого сечения, т.е. $Y(F_l/F_0)$. Тогда

$$\tilde{K} = K^F = f(\sigma, L)Y(F_l/F_0). \quad (1)$$

Так, величина КИН при внецентренном растяжении компактного образца вычисляется по формуле

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

где P_{\max} – максимальная нагрузка цикла; ω_F – локальная мера поврежденности образца с трещиной $\omega_F = F_l / F_0$; t_0, B – размеры опасного сечения образца (рисунок 3); $Y(\omega_F)$ – поправочная функция, определяемая по формуле

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

Поправочная функция (3) учитывает не только геометрию образца и схему его нагружения, но и интегрально величину пластической деформации в опасном сечении, а в (2) введена, по существу, локальная мера поврежденности образца с трещиной $\omega_F = F_l / F_0$, которая имеет не только геометрический смысл, но и физическое содержание: эта мера однозначно определяет живучесть объекта с трещиной [14]. Дополнительно подчеркнем, что мера ω_F определяется с учетом пластической деформации опасного сечения.

Для реализации данного подхода стандартом предусмотрено после завершения нагружения образца измерять его утяжку (уширение), как показано на рисунке 4. По полученным в результате испытания на статическую трещиностойкость значениям нагрузки, длины трещины и с учетом пластической деформации опасного сечения образца рассчитывают величину КИН по формуле (2).

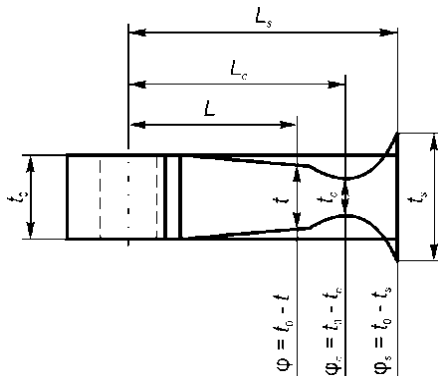


Рисунок 4 – Схема измерения утяжки (уширения) опасного сечения образца

Условие плоской деформации проверяется по одному из двух неравенств:

$$\phi_C = \frac{t_0 - t_C}{t_C} 100 \leq 1,5 \% \quad (4)$$

или

$$V_C \leq 1,2V_Q. \quad (5)$$

Значение КИН K_Q , соответствующее предельной нагрузке P_Q , принимают равным статической вязкости разрушения K_{Ic} в случае, если условие плоской деформации выполняется.

По полученным значениям КИН и утяжки (уширения) образца в стандарте предлагается строить D - и Q -диаграммы статического упругопластического разрушения образца с трещиной (диаграммы СУПРОТ), представляющие собой графики в координатах КИН K_I^F – абсолютная ϕ или относительная ψ утяжка (рисунк 5).

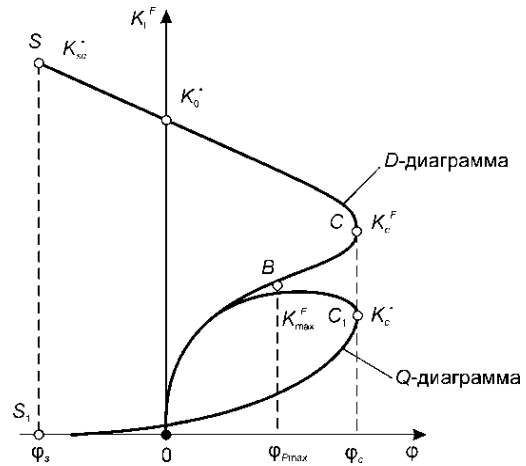


Рисунок 5 – D - и Q -диаграммы СУПРОТ

Если при расчете величины K_I^F условно принимают, что максимальная нагрузка в процессе долома остается постоянной (а это действительно возможно, если испытательная машина достаточно жесткая или скорость нагружения высока), то получают диаграмму $OBCS$ (см. рисунок 5), которая с учетом оси ординат напоминает букву D , поэтому ее называют D -диаграммой. Если же при расчете K_I^F учитывают падение нагрузки в ходе долома образца (когда машина имеет относительно невысокую жесткость или скорость нагружения низка), то получают диаграмму OBC_1S_1 (см. рисунок 5). Поскольку форма этой диаграммы напоминает букву Q , ее называют Q -диаграммой.

Диаграмма СУПРОТ в общем случае состоит из двух кривых: кривой упругопластического разрушения (участки OBC на D -диаграмме и OBC_1 на Q -диаграмме) и кривой 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 L_c , которому отвечает предельная утяжка ψ_c и предельное значение КИН – статическая вязкость разрушения (величина K_c^F на D -диаграмме и K_c^* на Q -диаграмме). В соответствующих точках S и S_1 происходит разделение образца на две части, при этом имеет место максимальное уширение ψ_s его опасного сечения, по которому определяют другое предельное значение КИН – ква-

зистатическую вязкость разрушения (величина K_{sc}^* на D -диаграмме; на Q -диаграмме $K_I^F = 0$ в этой точке). Пересечение кривой CS с осью ординат дает еще один параметр трещиностойкости K_0^* (см. рисунок 5). Максимум Q -диаграммы по оси КИН (точка B) соответствует максимальной нагрузке $P_{max} = P_C$ и характеризуется параметром K_{max}^F , ему отвечает утяжка $\Psi_{P_{max}}$.

Таким образом, в качестве основных характеристик статической трещиностойкости для пластичных трубных сталей стандартом предлагается применять следующие (таблица 1).

Таблица 1 – Основные характеристики статической трещиностойкости

| Характеристика | Обозначение | Единица измерения |
|--|-----------------------------------|----------------------|
| Силловые характеристики | | |
| Предельная нагрузка | P_Q | Н |
| Максимальная нагрузка | $P_{max} = P_C$ | Н |
| Статическая вязкость разрушения | $K_c^F (K_c^*)$ | МПа·м ^{1/2} |
| Значение КИН, соответствующее предельной нагрузке P_Q | K_Q | МПа·м ^{1/2} |
| Значение КИН, соответствующее максимальной нагрузке P_{max} | K_{max}^F | МПа·м ^{1/2} |
| Деформационные характеристики | | |
| Критическая длина трещины | L_c | мм |
| Предельное смещение берегов трещины | V_k | мм |
| Критическое раскрытие трещины | δ_c | мм |
| Предельная утяжка/ относительная предельная утяжка | Φ_c / Ψ_c | мм / – |
| Утяжка, отвечающая максимальной нагрузке/ относительная утяжка, отвечающая максимальной нагрузке | $\Phi_{P_{max}} / \Psi_{P_{max}}$ | мм / – |
| Максимальное уширение/ относительное максимальное уширение | Φ_s / Ψ_s | мм / – |

Приведем ниже результаты испытания на статическую трещиностойкость компактных образцов стали 17Г1С, изготовленных из трубы диаметром 820 мм линейного участка нефтепровода Мозырь – Брест в состоянии поставки (до эксплуатации), с ориентацией трещины в осевом направлении трубы.

Предварительно в каждом образце производили выращивание начальной трещины от надреза согласно [1] и в соответствии с установленными режимами. Начальную трещину растили при циклическом нагружении, коэффициенте асимметрии цикла $R = 0,2$. Испытания вели при атмосферном давлении, в воздухе с относительной влажностью 40–60 % и не содержащем активных по отношению к испытываемому материалу примесей, частоте нагружения $f = 20$ Гц, синусоидальной форме цикла и при температуре 17...23 °С.

В таблице 2 приведены значения основных силовых и деформационных характеристик статической трещиностойкости стали 17Г1С в состоянии поставки, на рисунке 6 – протокол испытания, на рисунках 7, 8 – диаграммы СУПРОТ компактного образца с ориентацией трещины в осевом направлении трубы, построенные с учетом реального падения нагрузки в процессе долома.

Таблица 2 – Характеристики статической трещиностойкости трубной стали 17Г1С в состоянии поставки

| Характеристика | Значение для образца с ориентацией трещины в осевом направлении |
|-------------------------------|---|
| Силловые характеристики | |
| P_Q , Н | 7500 |
| P_{max} , Н | 12400 |
| K_c^* , МПа·√м | 27,3 |
| K_{max}^F , МПа·√м | 55,8 |
| K_c^F , МПа·√м | 71,1 |
| Деформационные характеристики | |
| $\Phi_{P_{max}}$, мм | 0,30 |
| Φ_c , мм | 1,02 |
| Φ_s , мм | –0,73 |

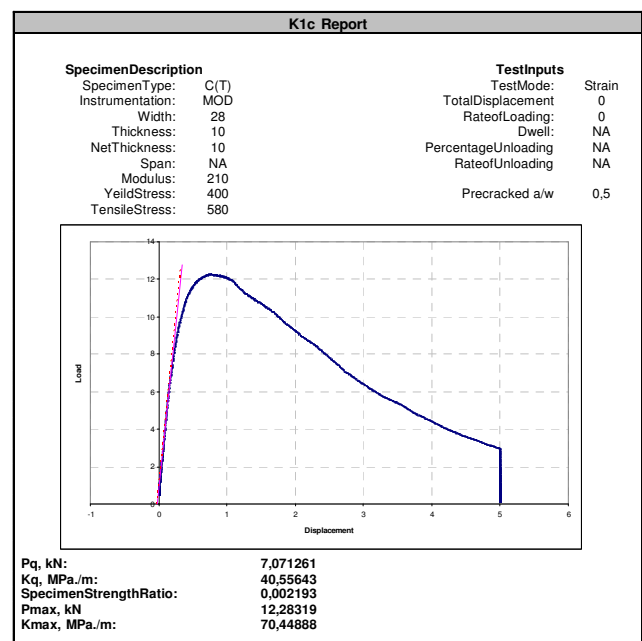


Рисунок 6 – Протокол испытания компактного образца из стали 17Г1С на статическую трещиностойкость

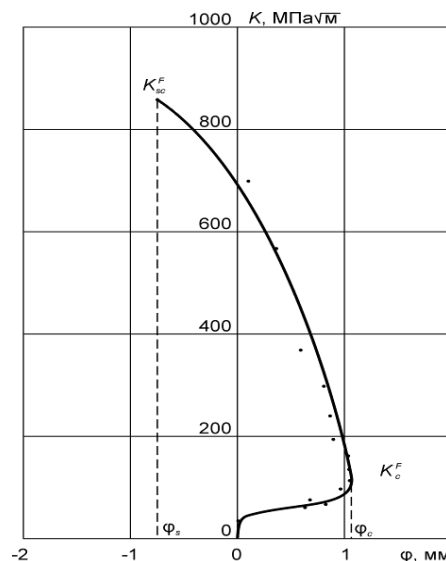


Рисунок 7 – Экспериментальная D -диаграмма СУПРОТ компактного образца из стали 17Г1С

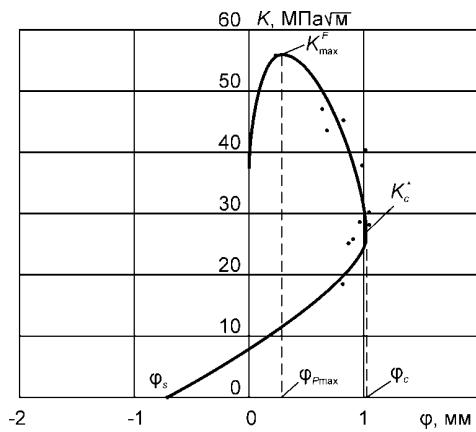


Рисунок 8 – Экспериментальная Q -диаграмма ЦУПРОТ компактного образца из стали 17Г1С

Испытания на циклическую трещиностойкость.

Испытания компактных образцов проводят по схеме внецентренного растяжения в соответствии с [5]. Основным критерием достижения предельного состояния является разрушение образца – разделение его на две части. Испытания образцов (включая образование исходной трещины) проводят с одной установки в машине непрерывно, пользуясь при визуальном методе измерений и частоте циклов выше 15 Гц стробоскопическим освещением. Их проводят поэтапно, на всем протяжении поддерживают постоянными все параметры цикла нагрузки. Для определения характеристик трещиностойкости минимально необходимое для испытаний количество образцов не должно быть меньше трех.

После проведения испытания измеряют утяжку (уширение), как показано на рисунке 4. По результатам испытаний получают диаграмму нагрузка – смещение берегов трещины (рисунок 9).

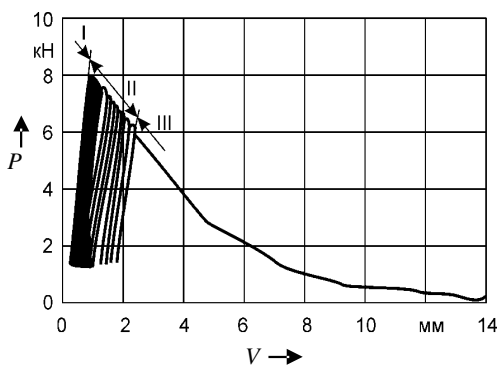


Рисунок 9 – Зависимость нагрузки (P) от смещения берегов трещины (V):

I – конец участка стабильного развития трещины; II – участок циклического долома; III – участок квазистатического долома

По результатам испытания рассчитывают величину КИН по формуле (2) и строят кинетическую диаграмму усталостного разрушения (КДУР) – зависимость скорости роста усталостной трещины $v = dl/dn$ от максимального значения коэффициента интенсивности напряжений K_{\max} или его размаха $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ за цикл. Диаграмму строят в двойных логарифмических координатах $\lg v - \lg K_{\max}$ ($\lg \Delta K$). Также с учетом замеров утяжки образца строят диаграмму циклического упругопластического разрушения (диаграмму ЦУПРОТ) в координатах КИН K_I^F – абсолютная ϕ - или относительная ψ -утяжка (рисунок 10).

Различают D - и Q -диаграммы ЦУПРОТ [12, 13, 15]. Если при расчете величины K_I^F условно принимают, что максимальная нагрузка в процессе долома остается постоянной (а это действительно возможно, если испытательная машина достаточно жесткая или скорость нагружения высока), то получают диаграмму OC_S (см. рисунок 10), которая с учетом оси ординат напоминает букву D , поэтому ее называют D -диаграммой. Если же при расчете K_I^F учитывают падение нагрузки в ходе долома образца (когда машина имеет относительно невысокую жесткость или скорость нагружения низка), то получают диаграмму $OB_1C_1S_1$ (см. рисунок 10). Поскольку форма этой диаграммы напоминает букву Q , ее называют Q -диаграммой.

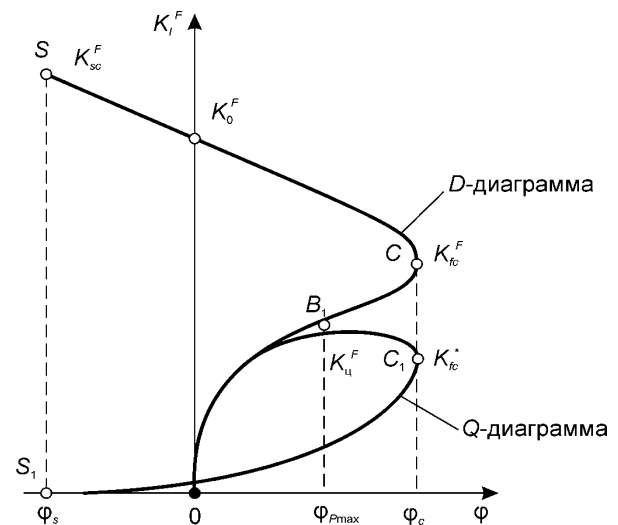


Рисунок 10 – D - и Q -диаграммы ЦУПРОТ

Диаграмма ЦУПРОТ в общем случае состоит из двух кривых: кривой циклического упругопластического разрушения (участки OC 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 (величина K_{fc}^F на D -диаграмме и K_{fc}^* 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 этой точке). Пересечение кривой CS с осью ординат дает еще один параметр трещиностойкости K_0^F (см. рисунок 10). Максимум Q -диаграммы по оси КИН (точка B_1) соответствует началу циклического долома при максимальной нагрузке P_{\max} и характеризуется параметром K_{II}^F , ему отвечает утяжка $\phi_{P_{\max}}$.

В качестве основных характеристик циклической трещиностойкости для пластичных трубных сталей стандартом предлагается применять следующие:

Таблица 3 – Основные характеристики циклической трещиностойкости

| Характеристика | Обозначение | Единица измерения |
|--|-----------------------|-------------------|
| Силловые характеристики | | |
| Пороговое значение КИН | K_{th}^F | МПа $\sqrt{м}$ |
| Критический КИН (циклическая вязкость разрушения) | $K_{fc}^F (K_{jc}^*)$ | МПа $\sqrt{м}$ |
| Значение КИН, соответствующее предельной нагрузке P_0 | K_Q^F | МПа $\sqrt{м}$ |
| Квазистатическая вязкость разрушения | K_{sc}^F | МПа $\sqrt{м}$ |
| КИН, соответствующий началу циклического долома | K_u^F | МПа $\sqrt{м}$ |
| Деформационные характеристики | | |
| Критическая длина трещины | L_C | мм |
| Предельная утяжка | φ_C | мм |
| Утяжка, соответствующая максимальной нагрузке P_{max} | φ_{Pmax} | мм |
| Максимальное уширение | φ_S | мм |
| Утяжка образца, соответствующая началу текучести материала при осевом растяжении | φ_t | мм |

На рисунке 11 представлена экспериментальная КДУР компактного образца (с ориентацией трещины в окружном направлении трубы) в состоянии после длительной (35–45 лет) эксплуатации, а на рисунке 12 – D -диаграмма ЦУПРОТ при испытании одного из образцов, вырезанных из трубы в осевом направлении в состоянии поставки. Значения силовых и деформационных характеристик циклической трещиностойкости материала труб до и после эксплуатации, полученные на образцах, вырезанных в осевом направлении, представлены в таблице 4, из которой видно, что в материале трубы после длительной эксплуатации наблюдается существенное снижение порогового значения КИН K_{th}^F (на 22 %). По другим параметрам КИН (K_{fc}^F ; K_{sc}^F) значения характеристик снижаются менее значительно (до 7 %). А по таким параметрам, как предельная утяжка образца φ_C и максимальное уширение φ_S значения характеристик материала новой трубы на 30–46 % выше аналогичных характеристик после эксплуатации.

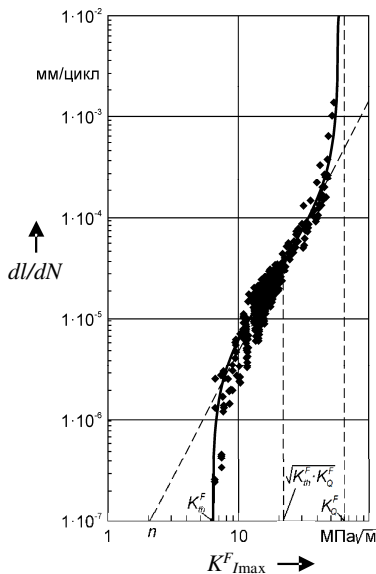


Рисунок 11 – Экспериментальная диаграмма КДУР компактного образца (с ориентацией трещины в окружном направлении трубы) из стали 17Г1С после длительной эксплуатации 35–45 лет

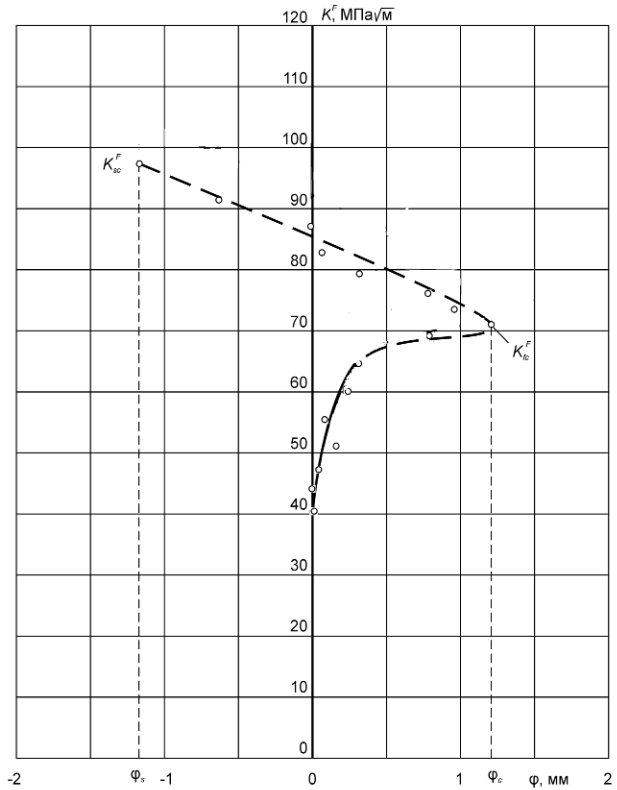


Рисунок 12 – D -диаграмма ЦУПРОТ при испытании компактного образца из стали 17Г1С в состоянии поставки

Таблица 4 – Обобщенные силовые и деформационные характеристики циклической трещиностойкости материала трубы до и после эксплуатации

| Характеристика | Значение для образца | |
|--|-------------------------------|-------------------------------|
| | до эксплуатации | после эксплуатации |
| Силловые характеристики | | |
| Пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений K_{th}^F , МПа $\sqrt{м}$ | 7,7 | 6,0 |
| Критический КИН (циклическая вязкость разрушения) K_{fc}^F , МПа $\sqrt{м}$ | $\frac{67,83 - 70,88}{69,36}$ | $\frac{64,91 - 67,34}{66,13}$ |
| Квазистатическая вязкость разрушения K_{sc}^F , МПа $\sqrt{м}$ | $\frac{86,89 - 97,19}{92,04}$ | $\frac{83,63 - 87,04}{85,34}$ |
| Деформационные характеристики | | |
| Критическая длина трещины L_C , мм | $\frac{21,00 - 23,00}{22,00}$ | $\frac{20,7 - 23,00}{21,85}$ |
| Предельная утяжка образца φ_C , мм | $\frac{1,2 - 1,62}{1,41}$ | $\frac{0,96 - 1,03}{0,99}$ |
| Максимальное уширение φ_S , мм | $\frac{1,11 - 1,17}{1,14}$ | $\frac{0,35 - 0,87}{0,61}$ |

Компьютерное моделирование распространения трещиноподобного повреждения в условиях линейно-упругого поведения материала может проводиться (и это предусмотрено в стандарте) на основе модели деформируемого твердого тела с опасным объемом с помощью программного пакета конечно-элементного моделирования, например, ANSYS, ABAQUS и др. С этой целью задают геометрические размеры образца, а также модуль упругости E , коэффициент Пуассона μ , характе-

ризирующие свойства исследуемого материала, нагрузку P . Затем выбирают способ расчета эквивалентных напряжений σ_q в каждом элементарном объеме образца. Если, например, выбрана четвертая теория прочности, то эквивалентные напряжения

$$\sigma_q = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (6)$$

Задаются предельным значением эквивалентных напряжений σ_q^{lim} (допускаемое напряжение), соответствующее, например, пределу прочности σ_b или текучести σ_s , отнесенным к некоторому коэффициенту запаса m . Для описания изменения величины действующих напряжений по сравнению с величиной предельных формируют показатель локальной повреждаемости следующего вида:

$$\Psi_q = \left| \sigma_q / \sigma_q^{\text{lim}} \right|, \quad q = \text{I, II, III, IV и т.д.}, \quad (7)$$

где I, II, III, IV – выбранная теория прочности.

Условия для ограничения опасных объемов, как множества элементарных объемов, в которых действующие эквивалентные напряжения не меньше предельных, с учетом формул (6) и (7) имеют вид:

$$W_q = \{ dW / \Psi_q \geq 1, dW \geq W_k \}, \quad (8)$$

где dW – элементарный объем, W_k – рабочий объем нагруженного тела.

Соответствующая формула для численного расчета опасных объемов:

$$W_q = \iiint_{\Psi_q \geq 1} dW, \quad (9)$$

Алгоритм итерационного моделирования распространения трещиноподобного повреждения основан на предварительном проведении расчета напряженно-деформированного состояния образца для каждого (i -го) конечного элемента, который рассматривается как элементарный объем dW и для которого имеются значения средних напряжений и деформаций.

Данные значения используются для расчета локальной повреждаемости для каждого конечного элемента из W_k , как отношений действующих и предельных напряжений в соответствии с (7).

Конечно-элементная сетка формируется таким образом, чтобы наибольшая плотность элементов была в направлении предполагаемого распространения повреждения (рисунок 13).

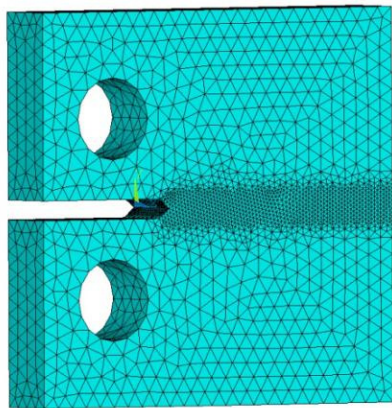


Рисунок 13 – Конечно-элементное разбиение образца

В соответствии с (8) формируется массив конечных элементов W_q , составляющих опасный объем, и в соответствии с (9) рассчитывается его значение.

Распространение трещиноподобного повреждения моделируется удалением данного массива (W_q) из конечно-элементной модели (W_k) на текущем шаге по времени. На следующем шаге последовательный расчет напряженно-деформированного состояния, состояния повреждаемости и опасных объемов производится для модифицированной конечно-элементной модели (с увеличенной длиной повреждения).

Расчет заканчивается при достижении предварительно заданного количества итераций или при резком увеличении значения опасного объема по сравнению с предыдущей итерацией, что может рассматриваться как состояние (мгновенного) долома образца. В двумерной постановке опасный объем W принимает вид опасной площади S .

По полученным в результате расчета значениям W_q вычисляют величину КИН по формуле (2). Затем могут быть определены зависимости:

- приращения опасного объема (площади) от приращения длины трещины;
- приращения опасного объема (площади) от длины трещины;
- опасного объема (площади) от длины трещины;
- КИН от длины трещины;
- приращения КИН от приращения длины трещины;
- КИН от приращения длины трещины;
- КИН от величины опасного объема (площади);
- КИН от приращения опасного объема (площади);
- приращения КИН от приращения опасного объема (площади).

Пример компьютерного моделирования развития трещины в компактном образце был выполнен по следующим исходным данным: размеры образца $B = 0,05$ м, $H = 0,06$ м, $R = 0,0625$ м; нагрузка $P = 20000$ Н; модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$. Предельное значение эквивалентных напряжений для материала исследуемой модели принято равным $\sigma_q^{\text{lim}} = 600$ МПа (по IV энергетической теории прочности). Результаты расчета представлены на рисунке 14.

Применение стандарта для оценки характеристик статической и циклической трещиностойкости образцов трубной стали после длительной эксплуатации позволило установить, что наблюдается существенное снижение порогового значения критического коэффициента интенсивности напряжений K_{th} (на 22 %). По другим параметрам коэффициента интенсивности напряжений (K_{fc}^F ; $K_{fc}^{F\phi}$; K_s^F ; $K_s^{F\phi}$; $K_{1,5}^F$) значения характеристик снижаются менее значительно (до 7 %). Установлено также, что характеристики трещиностойкости трубной стали в окружном направлении примерно на 14 % больше, чем в осевом направлении.

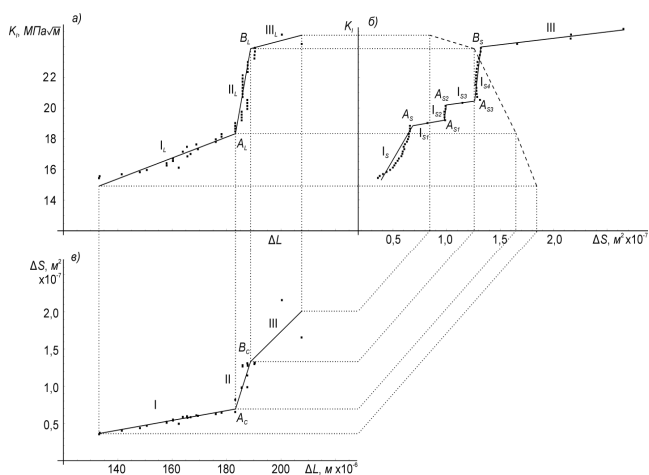


Рисунок 14 – Зависимости: а – КИН от приращения длины трещины; б – КИН от приращения площади трещины; в – приращение площади трещины от приращения длины трещины

Список литературы

1 **Красовский, А. Я.** Трещиностойкость сталей магистральных нефтепроводов / А. Я. Красовский, В. Н. Красико. – Киев : Наук. думка, 1990. – 176 с.

2 Об оценке влияния длительной эксплуатации на механические свойства и структуру металла магистральных нефтепроводов / Н. П. Лякишев [и др.] // Заводская лаборатория. – 2007. – № 1. – С. 75–82.

3 Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении : ГОСТ 25.506–85. – Введ. 1986–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 42 с.

4 Материалы металлические. Метод испытания для определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) сварных швов при квазистатическом нагружении : СТБ ISO 15653–2013. – Введ. 2014–07–01. – Мн : Госстандарт : БелГИСС, 2014. – 41 с.

Получено 10.04.2016

L. A. Sosnovskiy, A. N. Kozik, S. S. Sherbakov, A. V. Bogdanovich, V. V. Vorobyov, L. A. Shemet. Design principles and experimental validation of the state standard for fracture toughness evaluation methods became tubal because of its plastic properties.

The paper sets out the main principles for the development of state standard on assessment methods of fracture toughness of steel pipe because of its plastic properties.

5 **MP 2–95.** Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении / Механика катастроф. Определение характеристик трещиностойкости конструкционных материалов : метод. рекомендации. – М. : Изд. МИБ СТС, Ассоциация КОДАС, 1995. – С. 83–180.

6 **Черепанов, Г. П.** О распространении трещины в сплошной среде / Г. П. Черепанов // Прикл. механика и математика. – 1967. – 31. – № 3. – С. 476–488.

7 **Rice, J. R.** A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by north's and cracks / J. R. Rice // J. Mech. and Phys. Solids. – 1968. – 35. – № 4. – P. 379–386.

8 **Трошенко, В. Т.** Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении / В. Т. Трошенко, В. В. Покровский, А. В. Прокопенко. – Киев : Наук. думка, 1987. – 256 с.

9 **Леонов, М. Я.** Розвиток найдрібніших тріщин у твердому тілі / М. Я. Леонов, В. В. Панасюк // Прикл. механіка. – 1959. – Вип. 4. – С. 391–401.

10 **Dugdale, D. S.** Yielding of steel sheets containing slits / D. S. Dugdale // J. Mech. and Phys. Solids. – 1960. – 8. – № 2. – P. 100–108.

11 **Сосновский, Л. А.** Экспериментальное исследование циклической трещиностойкости стали 20 / Л. А. Сосновский, Л. А. Хамаза, Н. К. Бабич // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1990. – № 6. – С. 34–38.

12 **Сосновский, Л. А.** Анализ диаграммы циклического упругопластического разрушения образца с трещиной. Сообщение 1 / Л. А. Сосновский, А. В. Богданович // Проблемы прочности. – 1995. – № 5–6. – С. 39–51.

13 **Сосновский, Л. А.** Анализ диаграммы циклического упругопластического разрушения образца с трещиной. Сообщение 2 / Л. А. Сосновский, А. В. Богданович // Проблемы прочности. – 1995. – № 5–6. – С. 52–61.

14 **Сосновский, Л. А.** Статистическая механика усталостного разрушения / Л. А. Сосновский. – Минск : Наука и техника, 1987. – 288 с.

15 **Сосновский, Л. А.** Живучесть линейной части нефтепровода // Л. А. Сосновский, А. В. Богданович, А. М. Бордовский. – Гомель : НПО «ТРИБОФАТИКА», 2004. – 112 с.