

^а Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь^б Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно, Беларусь

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ЦИКЛИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПРИ
УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ И ЕГО
ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЖИВУЧЕСТИ ТРУБЫ ДУ 550×30
ГЦТ АЭС ПОСЛЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Предложен расчетно-экспериментальный метод оценки трещиностойкости при циклическом упругопластическом деформировании, основанный на измерении локальной пластической деформации у вершины трещины (утяжки) и построении диаграммы циклического упругопластического разрушения. Выполнена реализация данного метода для оценки живучести трубы Ду 550×30 главного циркуляционного трубопровода АЭС..

Ключевые слова: трещиностойкость, живучесть, компактный образец, коэффициент интенсивности напряжений, утяжка.

Для пластичных сталей в верхней части кинетической диаграммы усталостного разрушения условия плоской деформации, как известно, не выполняются. Соответственно и известные формулы линейной механики разрушения (ЛМР) для оценки величины коэффициента интенсивности напряжений (КИН) при внецентренном растяжении компактного образца

$$K_{I \max} = \frac{P_{\max} \sqrt{l}}{t_0 B} \cdot Y\left(\frac{l}{B}\right), \quad (1)$$

где P_{\max} – максимальная нагрузка цикла; l – измеренная длина трещины; t_0 , B – размеры опасного сечения образца (рис. 1, а); $Y(l/B)$ – поправочная функция, которая учитывает геометрию образца и схему его нагружения:

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

справедливы при упругом деформировании, при сохранении условий плоской деформации. Чтобы применить их в упругопластической области, необходимо ввести в них соответствующую поправку на пластичность.

Это можно осуществить путем учета в функции (2) действительных размеров опасного сечения образца, т. е. тех размеров, которые имеют место при пластической деформации [1–3].

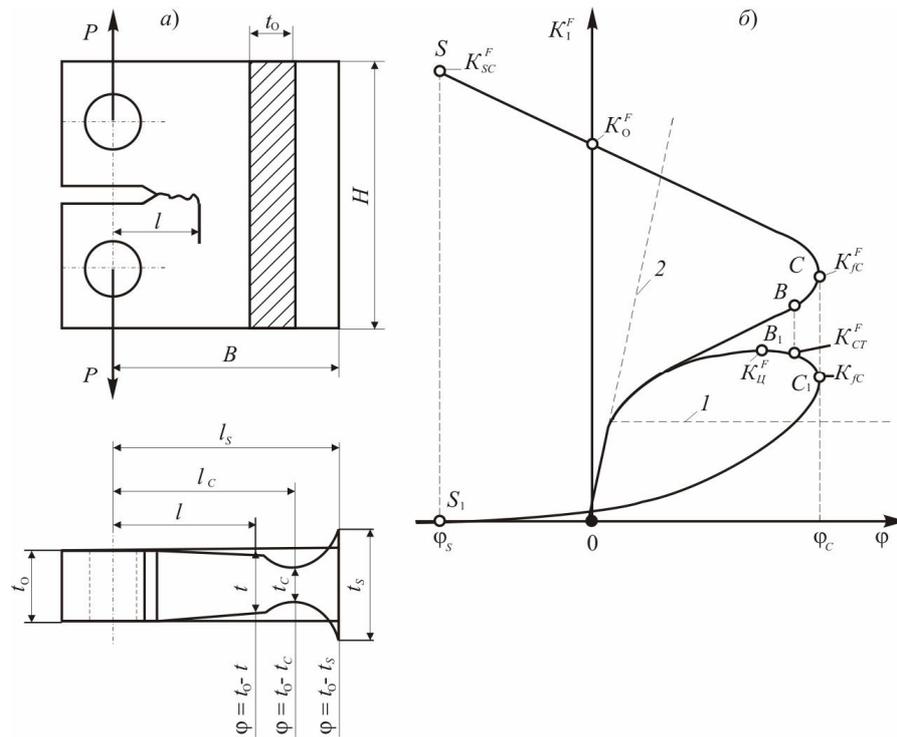


Рис. 1. Схемы: *a* – испытания компактного образца и измерения утяжки; *б* – диаграммы циклического упругопластического разрушения образца с трещиной (диаграммы ЦУПРОТ).

Умножим и разделим отношение l / B на величину t_0 ; при этом $l / B = (l / B)(t_\phi / t_0)$. Значит, $Y(l / B) = Y[(l / B)(t_\phi / t_0)]$. При упругом деформировании это равенство является тождественным. При учете пластической деформации сечения в функции Y необходимо принять действительную толщину образца $t_\phi = t_0 - \phi$, где ϕ – поперечная составляющая пластической деформации (утяжка) сечения, т. е. записать [1]:

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

где F_0 – номинальная (до деформации) площадь опасного сечения образца; F_l – площадь, поврежденная трещиной длиной l и определенная с учетом пластической деформации сечения. Значит, путем введения (3) в (1) и (2) получаем методику вычисления КИН в упругопластической области [1–3]:

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

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

Таким образом, функция (2а) учитывает не только геометрию образца и схему его нагружения, но и интегрально величину пластической деформации в опасном сечении. А в (1а) введена, по существу, локальная мера поврежденности образца с трещиной $\omega_F = F_1 / F_0$, которая имеет не только геометрический смысл, но и физическое содержание: эта мера однозначно определяет живучесть объекта с трещиной [4]. Дополнительно подчеркнем, что мера ω_F определяется с учетом пластической деформации опасного сечения.

Согласно развиваемому подходу [1–3], весь процесс упругопластического деформирования и разрушения описывается с помощью диаграммы циклического упругопластического разрушения образца с трещиной (диаграммы ЦУПРОТ). Эту диаграмму строят 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. $\varphi = t_0 - t_\varphi$ (см. рис. 1,а); ее относительная величина $\psi = \varphi / t_0$. При этом КИН K_I^F вычисляют по формулам ЛМР, но с поправкой на пластичность исследуемого материала. Например, для расчета КИН компактного образца (см. рис. 1,а) используют формулы (1а), (2а).

Различают два типа диаграммы ЦУПРОТ [3]. 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. рис. 1,б), 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 *OB₁C₁S₁* (см. рис. 1,б). Поскольку форма этой диаграммы напоминает букву *Q*, ее называют *Q*-диаграммой.

Диаграмма ЦУПРОТ в общем случае состоит из двух кривых: кривой циклического упругопластического разрушения (участки *OBC* на *D*-диаграмме и *OB₁C₁* на *Q*-диаграмме) и кривой квазистатического разрушения (долома) (участки *CS* на *D*-диаграмме и *C₁S₁* на *Q*-диаграмме). В соответствующих точках *C* и *C₁* 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 *S₁* 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. рис. 1, б). 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 $OBС$ (точка B на D -диаграмме). В случае «идеально пластического разрушения» кривая циклического упругопластического разрушения трансформируется в прямую 1. В случае «идеально хрупкого разрушения» ($\varphi = 0$) эта кривая совпадает с осью ординат. Линия 2 разделяет области квазихрупкого и упругопластического разрушений. Таким образом, с помощью диаграммы ЦУПРОТ возможен анализ вязко-хрупкого перехода, например, при изменении размеров образца или температуры испытания. Предложены [1–5] формулы для аналитического описания D - и Q -диаграмм ЦУПРОТ.

На рис. 2 в качестве примера приведены диаграммы ЦУПРОТ для компактных образцов разной толщины из стали 45.

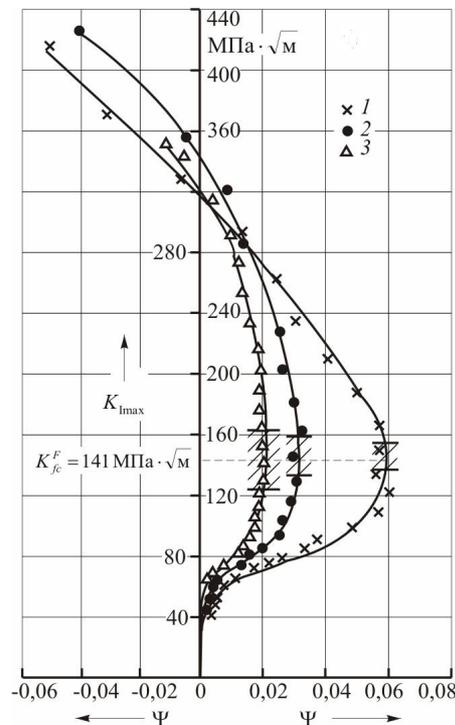


Рис. 2. Диаграммы ЦУПРОТ для углеродистой стали, построенные по результатам испытаний компактных образцов толщиной 10 (1), 20 (2) и 40 (3) мм.

Аналитическое выражение для скорости накопления повреждений на стадии развития магистральной трещины можно записать в виде степенной зависимости от уровня интенсивности напряжений ΔK с учетом поврежденности ω_F [4]:

$$v = \frac{d(1-\omega_F)}{dn} = -C_k \left(\frac{\Delta K_I}{1-\omega_F} \right)^{m_k} \quad (4)$$

Из (4) после интегрирования следует формула для оценки живучести изделия:

$$N_{ж} = \frac{(1-\omega_F)^{m_k+1}}{C_k (m_k + 1) \Delta K_I^{m_k}} \quad (5)$$

В выражениях (4), (5) величина КИН ΔK_I есть разность максимального $K_{I \max}$ и порогового K_{th} КИН, т. е. $\Delta K_I = K_{I \max} - K_{th}$; C_k и m_k – параметры (постоянные материала), определяемые по кинетической диаграмме усталостного разрушения в координатах скорость роста трещины $v = d(1 - \omega_F) / dn$ – КИН $K_{I \max}$ (или ΔK_I), т. е. по смыслу и по размерности параметры C_k и m_k соответственно тождественны известным параметрам C_σ и m_σ уравнения Пэриса.

Если нагружение носит нерегулярный характер и изменяется, например, по заданной программе в виде многократно повторяющихся блоков длительностью $N_{\bar{\sigma}}$, то живучесть тела с трещиной в этом случае

$$N_{ж\Sigma} = \frac{N_{\bar{\sigma}}}{C_k (m_k + 1) \sum_{i=1}^s \frac{\Delta K_i^{m_k} n_{i\bar{\sigma}}}{(1-\omega_F)^{m_k+1}}}, \quad (6)$$

где i – номер ступени блока; s – количество ступеней в одном блоке; $n_{i\bar{\sigma}}$ – число циклов i -того уровня нагрузки в одном блоке.

Таким образом, согласно развиваемому подходу, предварительно путем стандартных испытаний на трещиностойкость малоразмерных образцов и измерений утяжки их опасного сечения определяют силовые и деформационные характеристики сопротивления росту трещин исследуемого материала изделия в соответствии с изложенной методикой, а затем переходят от модели к натуре и определяют по формулам (5) и (6) живучесть изделия с учетом упругопластических деформаций.

Ранее [1–5] выполнена апробация предложенного подхода к оценке характеристик циклической трещиностойкости ряда пластичных сталей, а также модели корпуса реактора [6] здесь данный подход применим для определения живучести труб Ду 550×30 из стали 08X18H12T первого контура ГЦТ Ново-Воронежской АЭС (1-й энергоблок) после их длительной (100 тысяч часов) эксплуатации.

Продольную поверхностную трещину в трубе принято схематизировать полуэллипсом с полуосями длиной c – вдоль оси трубы и длиной a – в радиальном направлении. КИН такой трещины с учетом поправки на пластичность можно вычислить по формулам:

$$K_{I_{\max}} = \frac{p_{\max}(D-2h)}{2\sqrt{h}} \omega_F^{1/4} Y(\omega_F), \quad (7)$$

$$Y(\omega_F) = 1,99 - 0,41\omega_F^{1/2} + 18,7\omega_F - 38,48\omega_F^{3/2} + 53,85\omega_F^2, \quad (8)$$

$$r_{\text{Ц}} = \frac{F_l}{F_0} = \frac{(1/2)\pi a c}{(1/2)\pi h c'} = \frac{(2/3)a^2}{(2/3)h^2} = \left(\frac{a}{h}\right)^2, \quad (9)$$

где $a = h$ и c – малая (глубина) и большая полуоси полуэллиптической трещины; c' – большая полуось предельной полуэллиптической трещины; D – диаметр трубы.

Характеристики циклической трещиностойкости компактных образцов нержавеющей стали 08X18H12T толщиной 20 мм определяли путем испытаний при внецентренном растяжении с частотой 20 Гц, асимметрией цикла 0,1 при комнатной температуре. Получили следующие значения характеристик при ориентации трещины в осевом направлении трубы: пороговое значение КИН $K_{th}^F = 4,2 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$; предельное значение КИН $K_{fc}^F = 97,3 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$; $C_k = 2 \cdot 10^{-10}$; $m_k = 3,82$.

Диаграмму ЦУПРОТ (рис. 3) для стали 08X18H12T строили по результатам проведенных испытаний на трещиностойкость компактных образцов и измерения утяжки образцов в зоне развития трещины, откладывая по оси абсцисс утяжку образца, а по оси ординат – величину КИН $K_{I_{\max}}^F$, соответствующую ей и вычисленную по следующей формуле с учетом предложенной поправки на пластичность по формулам (1а), (2а).

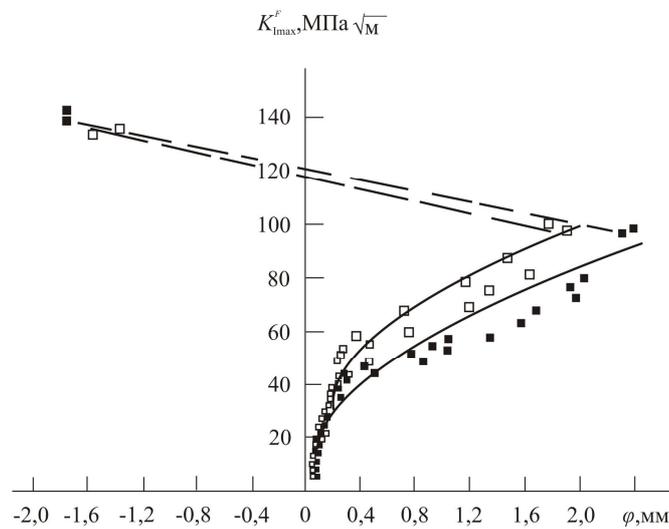


Рис. 3. Диаграмма $K_{I_{\max}}^F - \phi$ стали 08X18H12T для образцов с фронтом развития трещины в осевом направлении: ■ – в исходном состоянии, □ – после эксплуатационной наработки (100 тысяч часов).

Кинетическая кривая накопления повреждений в трубе из стали 08X18H12T в зависимости от размеров полуэллиптической продольной трещины и интенсивности растягивающих напряжений представлена на рис. 4. Она построена на основе выражений (7) – (9) для максимального давления рабочей жидкости в трубопроводе $p_{\max} = 10 \text{ МПа} = \text{const}$ в предположении выполнения условий плоской деформации. По этой кривой можно графически оценить, например, минимальное значение меры поврежденности $\omega_F = \omega_* \approx 0,001$ (что отвечает длине трещины $a \approx 1,0 \text{ мм}$), при которой (для заданного уровня нагруженности) трещина соответствующих размеров прорасти дальше не будет, так как при этом имеет место пороговое значение K_{th} КИН. Из рис. 4 можно также найти критическое значение меры поврежденности $\omega_c = \omega_{\text{lim}} \approx 0,42$, при которой происходит катастрофическое прорастание трещины до внутренней стенки трубопровода (поскольку в этом случае имеет место предельный КИН K_{fc}), – на рис. 4 показано стрелками.

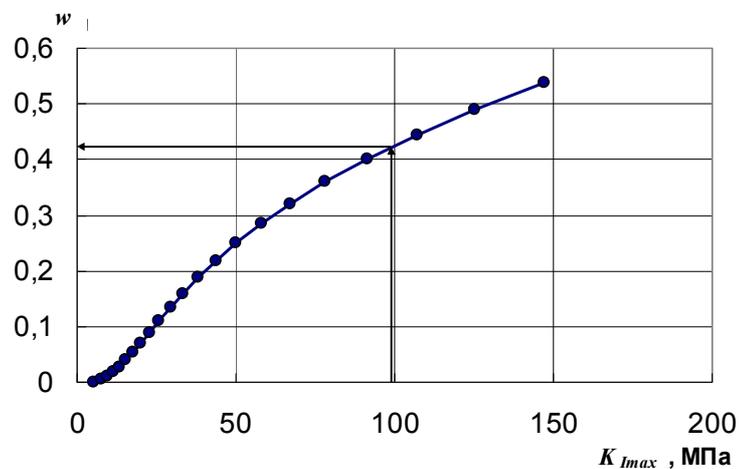


Рис. 4. Кинетическая кривая накопления повреждений в трубе Ду 550×30 из стали 08X18H12T с полуэллиптической продольной трещиной после эксплуатационной наработки (100 тысяч часов) при пульсирующем давлении $p_{\max} = 10 \text{ МПа}$.

Анализ живучести трубы Ду 550×30 из стали 08X18H12T при постоянном давлении $p_{\max} = 10 \text{ МПа}$ в зависимости от величины начальной поврежденности ω_F на основе формулы (5) выполнен графически на рис. 5. В качестве предельного состояния принят момент, когда полуэллиптическая схематизированная трещина длиной полуоси a в радиальном направлении достигнет размера h толщины стенки трубы: $a = h$, т.е. произойдет разгерметизация, «течь» трубы.

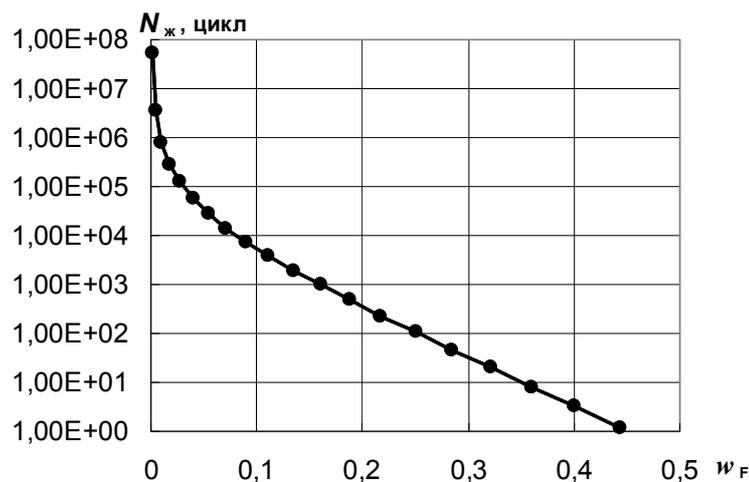


Рис. 5. Анализ живучести трубы Ду 550×30 из стали 08X18H12T с начальной полуэллиптической продольной трещиной после эксплуатационной наработки (100 тысяч часов) при пульсирующем давлении $p_{max} = 10$ МПа.

Summary

The calculated-experimental method for the estimation of crack growth resistance under cyclic elasto-plastic straining based on measuring of local plastic strain near the crack tip and on plotting the cyclic elasto-plastic fracture diagram is suggested. Realization of this method for evaluation of tube Du 550×30 of the main circulating pipeline of atomic power station is given.

Keywords: crack growth resistance, crack growth life, compact specimen, stress intensity factor, contraction.

Резюме

Запропоновано розрахунково-експериментальний метод оцінки тріщиностійкості при циклічному пружнопластичному деформуванні, заснований на вимірюванні локальної пластичної деформації біля вершини тріщини (утяжці) і побудові діаграми циклічного пружнопластичного руйнування. Виконано реалізацію даного методу для оцінки живучості труби Ду 550×30 головного циркуляційного трубопроводу АЕС.

Ключові слова: тріщиностійкість, живучість, компактний зразок, коефіцієнт інтенсивності напружень, утяжка.

1. *Сасноускі Л. А.* Дыяграма цыклічнага пругкапластычнага дэфармавання узору з трэшчынай і яе характэрныя кропкі // *Весці АН БССР, серыя фіз.-тэхн. навук.* – 1990. – № 2. – С. 3 – 7.
2. *Сосновский Л. А., Хамаза Л. А., Бабич Н. К.* Экспериментальное исследование циклической трещиностойкости стали 20 // *Там же.* – 1990. – № 6. – С. 34 – 38.
3. *Сосновский Л. А., Богданович А. В.* Анализ диаграммы циклического упругопластического разрушения образца с трещиной. Сообщение 1 // *Проблемы прочности.* – 1995. – № 5-6. – С. 39 – 51; Сообщение 2 // *Там же.* – 1995. – № 5-6. – С. 52 – 61.
4. *Сосновский Л. А.* Статистическая механика усталостного разрушения. – Минск: Наука и техника, 1987. – 288 с.
5. *Богданович А. В.* Прогнозирование предельных состояний силовых систем. Монография. – Гродно: ГрГУ им. Я. Купалы, 2008. – 383 с.
6. *Сосновский Л. А.* Оценка живучести модели корпуса реактора // *Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук.* – 1990. – № 3. – С. 36–40.

Поступила 22.05.2009