

УДК 622.692.4:620.1

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА КРИВЫХ МАЛОЦИКЛОВОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ МЕТАЛЛА ТРУБ

Харисов Р.А.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г.Уфа

Исаев Ш.З.

ОАО АК «Транснефть»

Латыпов А.М.

*ГУП «Институт проблем транспорта энергоресурсов», г.Уфа
e-mail: azamatlm@gmail.com*

Аннотация. Проблема замедления роста усталостных трещин является весьма актуальной задачей надежности трубопроводного транспорта. Характеристики малоциклового трещиностойкости определяются по результатам испытаний образцов с краевой трещиной в условиях мягкого циклического растяжения по пульсирующему циклу. Для труб малого диаметра допускается определение параметров испытаний полукольцевых образцов с краевыми трещинами. При этом коэффициент интенсивности напряжений вычисляют по формуле для определения коэффициента интенсивности напряжений при изгибе плоских образцов. Обработка результатов малоцикловых испытаний образцов производится с учетом основных сведений о свойствах металла, об образце, условиях испытаний и характеристиках испытательной установки, размерах трещин и пластической зоны до и в процессе испытаний. В работе проведена оценка параметров кинетического уравнения малоциклового трещиностойкости.

Ключевые слова: трещиностойкость, долговечность, пластичность, трещина, коэффициент интенсивности

Характеристика малоциклового трещиностойкости определяются по результатам испытаний образцов с краевой трещиной в условиях мягкого циклического растяжения по пульсирующему циклу. Для труб малого диаметра допускается определение параметров испытаний полукольцевых образцов с краевыми трещинами. При этом коэффициент интенсивности напряжений вычисляют по формуле для определения коэффициента интенсивности напряжений при изгибе плоских образцов.

Обработка результатов малоцикловых испытаний образцов производится с учетом основных сведений о свойствах металла, об образце, условиях испытаний и характеристиках испытательной установки, размерах трещин и пластической зоны до и в процессе испытаний [1 - 5].

Долговечность элементов с трещинами определяется интегрированием кинетического уравнения малоциклового трещиностойкости, связывающего ско-

рость роста трещины $\frac{dh}{dN}$ и размах коэффициента интенсивности деформаций $\Delta K_{1\varepsilon}$, предложенный Н.А. Махутовым [1]:

$$v = \frac{dh}{dN} = C_{\sigma} \cdot (\Delta K_{1\varepsilon})^{n_{\sigma}}, \quad (1)$$

где v – скорость роста трещины;

N – число циклов нагружения;

C_{σ} и n_{σ} – константы материала, определяемые экспериментально.

Следует отметить, что основную трудность при оценке долговечности по критериям малоциклового трещиностойкости представляет экспериментальное определение параметров C_{σ} и n_{σ} . В работе [2] приводятся формулы для оценки C_{σ} и n_{σ} без выводов.

Величину $K_{1\varepsilon}$ можно определять по формулам:

$$K_{1\varepsilon} = \left(\frac{K_1}{\sigma_T} \right)^{\frac{2}{1+m}} \quad \text{при } \sigma_{HO} < \sigma_T; \quad (2)$$

$$K_{1\varepsilon} = \left(\frac{K_1}{\sigma_T} \right)^{\frac{2}{1+m}} \cdot \left(\frac{\sigma_{HO}}{\sigma_T} \right)^{\frac{1-m}{m(1+m)}} \quad \text{при } \sigma_{HO} > \sigma_T. \quad (3)$$

Значения параметров C_{σ} и n_{σ} можно связать с известными механическими свойствами сталей следующим образом.

Как известно [1] коэффициент концентрации пластических деформаций K_{ε} связан с теоретическим α_{σ} формулой

$$K_{\varepsilon} = \alpha_{\sigma}^{2/(1+m)}. \quad (4)$$

Напомним, что $K_{\varepsilon} = \varepsilon_{\max} / \varepsilon_n$, где ε_{\max} – максимальная упругопластическая деформация; ε_n – номинальная деформация ($\varepsilon_n = \sigma_H / E$). Для модели с угловатостью величину α_{σ} можно оценить на основе подходов механики разрушения. Например, используя данные работы [1] можно получить:

$$\alpha_{\sigma} = \frac{1}{\sigma_H} \cdot \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}}, \quad (5)$$

где r – полярная координата. Используя подход Нейбера [1 - 2] и формулу, находим коэффициент концентрации деформаций для модели с трещиной:

$$K_{\varepsilon} = \left(\frac{1}{\sigma_H} \cdot \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \right)^{\frac{2}{1+m}}. \quad (6)$$

При каждом цикле нагружения в вершине трещины деформации могут достигать предельной величины:

$$\varepsilon_{np} = \ln \frac{1}{1-\psi}, \quad (7)$$

где ψ – относительное сужение образца при разрыве.

Тогда предельный коэффициент концентрации напряжений будет равен $K_{np} = \varepsilon_{np} / \varepsilon_H$. С учетом этого можно получить формулу для определения значения радиуса пластической зоны, в пределах которого деформации равны предельным значениям:

$$r(\varepsilon_{np}) = \frac{(K_1 / \sigma_H)}{2\pi(K_{np})^{1+m}}. \quad (8)$$

Коэффициент интенсивности деформаций $K_{1\varepsilon} = \left(\frac{K_1}{\sigma_T}\right)^{2/(1+m)}$. Тогда,

$$r(\varepsilon_{np}) = \frac{(K_{1\varepsilon})^{1+m}}{2\pi(K_{np})^{1+m}}. \quad (9)$$

Поскольку при $r = r(\varepsilon_{np})$ деформации равны предельным, то можно полагать, что величина $r(\varepsilon_{np})$ должна быть равной приращению глубины трещино-подобного дефекта dh . Обозначим через N количество циклов нагружения, имеем:

$$\frac{dh}{DN} = \frac{(K_{1\varepsilon})^{1+m}}{2\pi(K_{np})^{1+m}} = C_\sigma \cdot K_{1\varepsilon}^{n_\sigma}. \quad (10)$$

Следовательно, что параметры малоциклового трещиностойкости n_σ и C_σ должны быть равными:

$$n_\sigma = 1 + m; C_\sigma = \frac{1}{2\pi(\varepsilon_{np}/\varepsilon_T)^{n_\sigma}}. \quad (11)$$

Размерность C_σ – (М/цикл)^{0,501+m}.

Очевидно, что n_σ является безразмерным параметром.

Долговечность элемента определяется интегрированием уравнения (11):

$$N_p = \int_{h_0}^{h_{kp}} \frac{dh}{C_\sigma \cdot (\Delta K_{1\varepsilon})^{n_\sigma}}, \quad (12)$$

где h_0 и h_{kp} – исходная и критическая глубина трещины.

Уравнение (12) можно представить в следующем виде:

$$N_{mp} = N_0 \cdot K_n, \quad (13)$$

где K_n в первом приближении равен h_0/h_{kp} , а N_0 определяется по уравнению (10) при начальном значении коэффициента интенсивности деформаций $K_{1\varepsilon}^{(0)}$:

$$N_0 = \frac{h_{kp} - h_0}{C_\sigma (K_{1\varepsilon}^{(0)})^{n_\sigma}}. \quad (14)$$

С учетом K_n и $N = t / v$ эта формула может быть представлена в следующем виде:

$$t_p = \frac{\delta_0 \cdot \eta_0 (n_h - 1)}{v \cdot n_h \cdot C_\sigma K_{1\varepsilon p}^{n_\sigma}}, \quad (15)$$

где t_p – время до разрушения элемента;

δ_0 – толщина элемента;

$n_h = h_{kp} / h_0$; v – частота циклов нагружения.

Рассмотрим конкретный пример расчетов.

Пусть конструктивный элемент работает при пульсирующем отнулевом цикле нагружения с максимальным напряжением σ_{\max} , равным рабочему σ_p . При этом рабочее напряжение составляет: $\sigma_p = 0,67 \sigma_m$, т.е. $\sigma_p = 201$ МПа. Коэффициент деформационного упрочнения $m = 0,23$, а относительное сужение $\psi = 52\%$.

При указанных исходных данных по формуле (1) параметры циклической трещиностойкости будут равными: $n_\sigma = 1,23$ и $C_\sigma = 1,116 \cdot 10^{-4}$.

По данным диагностики начальная глубина трещиноподобного дефекта $h_0 = 3,8$ мм. Далее находим критическую глубину дефекта, соответствующую рабочему напряжению σ_p . Сталь 17ГС относится к категории пластических сталей, для которой параметр трещиностойкости α_{mp} [2] равен единице ($\alpha_{mp} = 1,0$). Это говорит о том, что элемент (труба) с протяженным трещиноподобным дефектом будет разрушаться при таких давлениях, при которых в ослабленном сечении модели возникают средние напряжения, близкие по величине к временному сопротивлению металла σ_B . Другими словами, прочность таких элементов будет пропорционально зависеть от степени ослабления стенки:

$$\sigma_{HB} = \sigma_B^{0M} \left(1 - \frac{h}{\delta_0} \right). \quad (16)$$

Подставляя в это уравнение вместо σ_{HB} значение рабочего напряжения σ_p , получаем $h_{кр} = 9,8$ мм. При этом относительная глубина дефекта равна: $\eta_{кр} = 0,71$, а начальное значение $\eta_0 = 0,275$.

Далее определяем коэффициент интенсивности деформаций $K_{1\epsilon}$. При $\eta_0 = 0,275$ по ГОСТ 25.506-85, находим поправочную функцию $Y_5 = 2,85$. Тогда КИН будет равным $K_1 = 201 \sqrt{0,0038} \cdot 2,85 = 35$ МПа. При этом коэффициент интенсивности деформаций будет равным: $K_{1\epsilon} = (35/300)^{2/(1+0,23)}$. По найденному значению $K_{1\epsilon}$ по формуле (15) находим N_{mp} :

$$N_{mp} = \frac{3,8}{9,8} \frac{(9,8 - 3,8) \cdot 10^{-3}}{1,116 \cdot 10^{-4} \cdot (0,0304)^{1,23}} = 1530 \text{ циклов.}$$

Это число циклов нагружения соответствует отнулевому циклу нагружения: $P_{\min} = 0$; $P_{\max} = P_p$, где P_p – рабочее давление ($P_p = 3,35$ МПа). Снижение амплитуды коэффициента интенсивности деформаций в два раза приводит к росту долговечности почти в 2,5 раза. При частоте циклов нагружения $\nu = 365$ циклов/год время до разрушения $t_p = 4,2$ года.

Таким образом, произведена оценка параметров кинетического уравнения малоциклового трещиностойкости.

Литература

1. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.
2. Зайнуллин Р.С. Обеспечение работоспособности оборудования в условиях механохимической повреждаемости. Уфа: МНТЦ «БЭСТС», 1997. 426 с.
3. РД 39-0147103-387-87. Методика определения трещиностойкости материала труб нефтепроводов. Уфа: ВНИИСПТнефть, 1987. 41 с.
4. Кантемиров И.Ф., Харисов Р.А., Галлямов А.М. Основы расчетов ресурса безопасной эксплуатации нефтепроводов, проложенных в скальных грунтах // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2011. № 2 (84). С. 67-73.
5. Гумеров А.Г., Харисов Р.А., Галлямов А.М. Оценка сопротивления хрупкому и вязкому разрушениям труб с локализованными изменениями рабочих сечений // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2011. № 2 (84). С. 59-66.

ESTIMATION CURVES OF LOW-CYCLE FRACTURE STRENGTH OF PIPE METAL

R.A. Kharisov

Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia

Sh.Z. Isayev

JSC "Transneft"

A.M. Latypov

Institute of Power Resources Transport, Ufa, Russia

e-mail: azamatlm@gmail.com

Abstract. *The problem of fatigue crack growth retardation is a very urgent problem of reliability of pipeline transportation. Characteristics of low-cycle fracture strength determined by testing specimens with an edge crack under cyclic stretching of soft pulsating cycle. For small-diameter pipes can define test parameters semicircular specimens with edge cracks. In this case the stress intensity factor calculated by the formula for determining the stress intensity factor in bending of flat samples. Processing of low-cycle test results of samples is given basic information about the properties of the metal on the sample under test conditions and characteristics of the test set, the amount of crack and plastic zone before and during testing. We evaluated the parameters of the kinetic equation low-cycle fracture.*

Keywords: *fracture strength, durability, plasticity, edge crack, stress intensity factor*

References

1. Makhutov N.A. Deformatsionnye kriterii razrusheniya i raschet elementov konstruktsii na prochnost' (Deformation fracture criteria and strength analysis of structural elements). Moscow, Mashinostroenie, 1981. 200 p.
2. Zainullin R.S. Obespechenie rabotosposobnosti oborudovaniya v usloviyakh mekhanokhimicheskoi povrezhdaemosti (Providing the equipment operability under mechanochemical damageability). Ufa, MNTTs "BESTS", 1997. 426 zp.
3. RD 39-0147103-387-87. Metodika opredeleniya treshchinostoikosti materiala trub nefteprovodov (Methods of determination of the oil pipeline material cracking resistance). Ufa, VNIISPTneft, 1987. 41 p.
4. Kantemirov I.F., Kharisov R.A., Gallyamov A.M. Osnovy raschetov resursa bezopasnoi ekspluatatsii nefteprovodov, prolozhennykh v skal'nykh gruntakh (Principles of calculating safe service life of oil pipelines laid in rocky ground), *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov - Problems of gathering, treatment and transportation of oil and oil products*, 2011, Issue 2 (84), pp. 67 - 73.
5. Gumerov A.G., Kharisov R.A., Gallyamov A.M. Otsenka soprotivleniya khрупkomu i vyazkomu razrusheniyam trub s lokalizovannymi izmeneniyami rabochikh

sechenii (Evaluation of resistance to brittle and ductile failure of pipes with localized changes in the net section), Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov - Problems of gathering, treatment and transportation of oil and oil products, 2011, Issue 2 (84), pp. 59 - 66.