

УДК 539.3

И. И. Мележик, П. П. Гонтаровский, Н. Г. Шульженко

Институт проблем машиностроения А.Н.Подгорного НАН Украины, г.Харьков, Украина

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВЛАЖНО-ПАРОВОЙ СРЕДЫ НА КИНЕТИКУ ТРЕЩИН В СОСУДАХ ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ

Разработанная ранее методика расчётной оценки живучести высокотемпературных элементов энергетического оборудования развита на случай учета влияния влажно-паровой среды. Диаграммы циклической трещиностойкости задаются по значениям в отдельных точках для учета их сложной формы. Приводятся результаты расчётной оценки кинетики поверхностной трещины в стенке цилиндрической части барботажного бака на воздухе и во влажно-паровой среде энергоблока мощностью 1000 МВт. Результаты свидетельствуют о значительном влиянии влажно-паровой среды на живучесть элементов конструкции.

**Ключевые слова:** трещина, коэффициент интенсивности напряжений, живучесть, влажно-паровая среда, сосуд энергооборудования.

Расчетная оценка живучести элементов энергетического оборудования в настоящее время актуальна, так как является составной частью процедуры продления их индивидуального ресурса (например, корпусов паровых турбин) [1]. Она позволяет корректировать сроки межремонтного контроля при оценке времени подрастания гипотетических трещин до критических размеров, которые по тем или иным причинам могли быть не выявлены при осмотрах.

Существующие методики расчетной оценки живучести элементов конструкций нуждаются в дальнейшем развитии. Так в [2 - 4] исследуется кинетика трещины при многорежимном характере нагружения, но не учитывается изменение полуосей эллиптической трещины при ее подрастании и релаксация напряжений при ползучести. Учет этих факторов может существенно сказаться на времени живучести конструкции [5].

Развитая ранее методика [5, 6], в отличие от других [2 - 4], позволяет учитывать такие эксплуатационные факторы, как асимметрия цикла нагружения, зависимость характеристик материала от температуры, изменение их во времени и другие факторы. Она развита на случай сложного напряженного состояния в окрестности вершины трещины, в этом случае коэффициент интенсивности напряжений (КИН) определяется с использованием метода конечных элементов [7]. Однако в этих методиках не учитывается влияние влажно-паровой среды.

Решение данного вопроса может быть осуществлено на основе развития методики [5, 6], которая основана на численном интегрировании уравнений роста трещины от начального размера

до критического при многорежимном статическом и циклическом нагружениях. При этом используется принцип линейного суммирования скоростей роста трещины на всех режимах нагружения

$$V = \sum_{i=1}^p V_{Ci} t_i + \sum_{j=1}^q V_{Nj} N_j, \quad (1)$$

где  $V$  – усредненная скорость распространения трещины на всех режимах работы, вычисленная в точке А и точке В на фронте эллиптической трещины (рис. 1);

$V_{Ci}$  – скорость роста трещины на  $i$ -том статическом режиме;

$t_i$  – относительное время работы на  $i$ -том статическом режиме;

$V_{Nj}$  – скорость роста трещины на  $j$ -том циклическом режиме;

$N_j$  – количество циклов нагружения на  $j$ -том циклическом режиме.

Скорость роста трещины определяется уравнениями П.Пэриса при циклическом нагружении [8]

$$V_{Nj} = \frac{dl}{dN_j} = C_{Nj} \left( \frac{\Delta K_{ej}}{\sqrt{1-R_j}} \right)^{n_{Nj}}, \quad (2)$$

и аналогичными уравнениями при ползучести материала [2]

$$V_{Ci} = \frac{dl}{dt_i} = C_{Ci} (K_{ei})^{n_{Ci}}, \quad (3)$$

где  $l$  – глубина трещины;  
 $\Delta K_{ej}$  – размах эквивалентного КИН на  $j$ -том циклическом режиме;  
 $R_j$  – коэффициент асимметрии цикла нагружения на  $j$ -том циклическом режиме;  
 $K_{ei}$  – эквивалентный КИН на  $i$ -том статическом режиме;  
 $C_{Ci}$ ,  $n_{Ci}$ ,  $C_{Nj}$ ,  $n_{Nj}$  – экспериментальные характеристики материала на статических и циклических режимах нагружения.

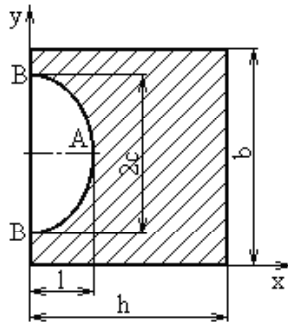


Рис. 1. Сечение элемента в плоскости трещины

В элементах энергетического оборудования влажно-паровая среда может существенно влиять на скорость распространения усталостных трещин. Для ее учета в [5, 6] используются диаграммы коррозионной трещиностойкости материала, которые можно описать зависимостями:

$$dl/dN = f(\Delta K_e, R, \omega, T), \quad (4)$$

$$dl/dt = f_c(K_e, \omega, T), \quad (5)$$

где  $\omega$  – частота нагружения;  
 $T$  – температура.

Эти диаграммы являются основными при проведении расчетов на долговечность элементов конструкций энергетического оборудования. Они определяются экспериментально для конкретных значений температуры, асимметрии цикла и частоты нагружения. Зачастую диаграммы коррозионной трещиностойкости имеют сложный вид. Описать произвольный закон (4, 5) предложенными в литературе аналитическими зависимостями сложно. Поэтому в данной методике для каждого режима нагружения предлагается задавать диаграмму в отдельных точках. Промежуточные значения определяются с помощью линейной или квадратичной интерполяции, затем вычисляется скорость развития трещины.

Исследуется кинетика трещины в стенке цилиндрической части барботажного бака. Барботажный бак предназначенного для сброса избыточной пара из компенсатора объема с целью снижения давления в первом контуре реакторной установки [8]. Трещины рассматриваются на внутренней части поверхности, при этом учи-

тывается влажно-паровая среда, и на внешней поверхности. Начальные размеры поверхностной полуэллиптической трещины составили  $l = 2$  мм,  $c = 10$  мм, наружный диаметр – 2,5 м, толщина корпуса – 20 мм, материал – сталь 08X18H10T. Базовые диаграммы циклической трещиностойкости стали 08X18H10T приводятся на рис. 2 [9].

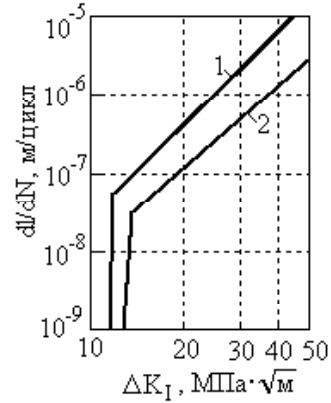


Рис. 2. Базовые диаграммы для стали 08X18H10T: 1 – в агрессивной среде, 2 – в воздухе

Рассматривались следующие режимы работы бака [8]:

- 1) гидроиспытание (давление  $P=1$  МПа, температура  $T=20$  °С, число циклов нагружения  $N = 3$  циклов за время эксплуатации);
- 2) гидроиспытание ( $P=0,8$  МПа,  $T=20$  °С,  $N = 27$ );
- 3) срабатывание основного клапана ( $P = 0,3$  МПа,  $T = 100$  °С, перепад температур  $\Delta T = 80$  °С,  $N = 260$ );
- 4) срабатывание предохранительного клапана ( $P = 0,3$  МПа,  $T = 70$  °С,  $\Delta T = 50$  °С,  $N = 390$ );
- 5) разрыв предохранительной мембраны ( $P = 0,68$  МПа,  $T = 179$  °С,  $\Delta T = 159$  °С,  $N = 18$ ).

Время службы рассматриваемого барботажного бака составляет 30 лет.

В таблице 1 приведены значения напряжений  $\sigma_Z$  по толщине стенки на разных эксплуатационных режимах.

Таблица 1

Максимальные (над чертой) и минимальные (под чертой) значения напряжений  $\sigma_Z$ , МПа

Режим	Координата толщины стенки, м				
	0	0,005	0,01	0,015	0,02
1	<u>49,6</u> 0	<u>49,4</u> 0	<u>49,2</u> 0	<u>49,0</u> 0	<u>48,8</u> 0
2	<u>62,0</u> 0	<u>61,7</u> 0	<u>61,5</u> 0	<u>61,3</u> 0	<u>61,0</u> 0
3	<u>18,6</u> -162,7	<u>18,5</u> -71,5	<u>18,9</u> 0	<u>108,7</u> 0	<u>197,7</u> 0
4	<u>18,6</u> -94,7	<u>18,5</u> -37,7	<u>18,8</u> 0	<u>74,8</u> 0	<u>130,4</u> 0
5	<u>42,2</u> -318,2	<u>42,0</u> -137,0	<u>42,8</u> 0	<u>221,1</u> 0	<u>397,9</u> 0

На рис. 3 и 4 приводятся результаты оценки живучести трещины, расположенной на внутренней поверхности стенки бака, во влажно-паровой среде и в воздухе. Результаты представлены в виде зависимости глубины трещины  $l$ , ширины  $c$ , КИН от отношения полученного числа циклов  $N$  от эксплуатационного числа циклов нагружения  $N_3$ .

Как следует из расчетов, трещина в начальный момент времени развивается при разрыве предохранительной мембраны (режим 5) в точках А, В и срабатывании основного клапана (режим 3) в точке В. Влияние всех эксплуатационных режимов на процесс развития трещины заметно при ее значительных размерах.

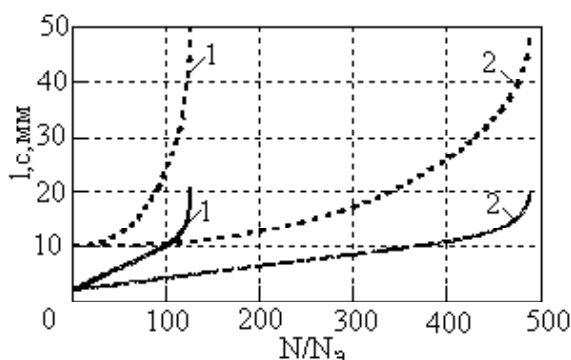


Рис. 3 Зависимость глубины  $l$  (сплошная линия) и ширины  $c$  трещины (пунктирная линия) от  $N/N_3$ : 1 – во влажно-паровой среде, 2 – в воздухе

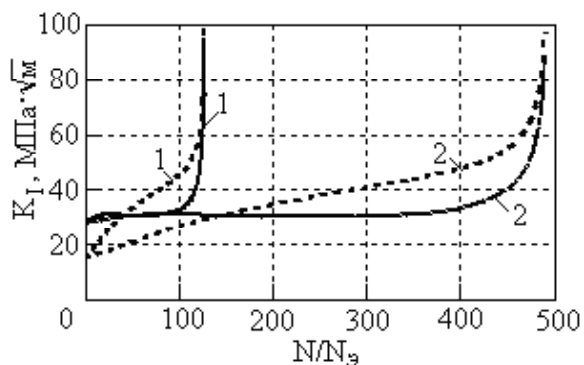


Рис. 4 Зависимость КИН в точке А (сплошная линия) и в точке В (пунктирная линия) от  $N/N_3$ : 1 – во влажно-паровой среде, 2 – в воздухе

Разрушение стенки бака при действии влажно-паровой среды произойдет через  $33,2 \cdot 10^3$  тыс. часов в результате прорастания трещины насквозь и достижения КИН критического значения  $\Delta K_{Icr} = 100 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$  на режиме работы 5. В случае развития трещины в воздухе время живучести

составило  $129 \cdot 10^3$  тыс. часов, конструкция разрушилась вследствие прорастания трещины насквозь. Размеры трещины перед разрушением составили  $l=20 \text{ мм}$ ,  $c = 50 \text{ мм}$ .

Исследовалось развитие трещины, расположенной на наружной поверхности стенки бака. В этом случае отсутствует влияние влажно-паровой среды. На рис. 5 показаны результаты оценки живучести наружной трещины. Разрушение стенки произойдет через  $83,4 \cdot 10^3$  тыс. часов в результате долома на режиме разрыва предохранительной мембраны, при этом размеры трещины перед разрушением составили  $l=19 \text{ мм}$ ,  $c = 50 \text{ мм}$ .

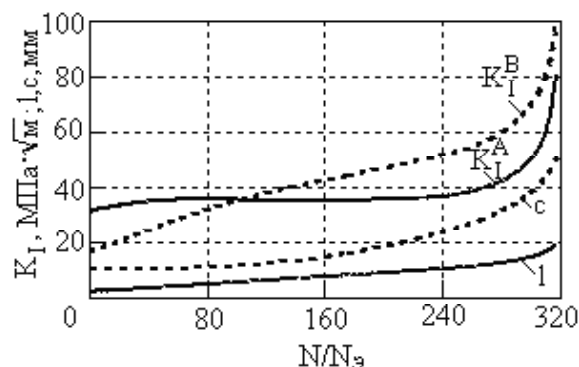


Рис. 5 Зависимость КИН и размеров наружной трещины от  $N/N_3$

Данный пример показывает, что влияние влажно-паровой среды почти в четыре раза уменьшает время живучести конструкции. Как следует из результатов расчета наружная трещина будет развиваться в 1,5 раза быстрее чем аналогичная внутренняя при развитии ее в воздухе вследствие больших растягивающих напряжений на наружной поверхности, вызванных температурным перепадом.

Отметим, что за время эксплуатации на рассмотренных режимах работы на рост трещины существенно влияет деградация свойств материала во времени, а не только циклические нагрузки. Поэтому для учета изменения свойств материала во времени необходимы дополнительные экспериментальные данные по трещиностойкости материала с учетом его деградации.

#### Перечень ссылок

1. РД 34.17.440-96. Методические указания о порядке проведения работ при оценке индивидуального ресурса паровых турбин и продления срока их эксплуатации сверх паркового ресурса. – М., 1996. – 153 с.
2. О ресурсе высокотемпературных роторов паровых турбин / В.С. Балина, Е.Д. Консон // Теплоэнергетика. – 1988. - №7. - С. 21 – 24.

3. Оценка полного и межремонтного ресурсов модернизированных корпусов ЦВД турбин К-200-130-3 ЛМЗ по критериям малоциклового усталости и трещиностойкости / В.И. Берлянд, А.А. Глядя, В.С. Балина, Е.Д. Консон, М.Г. Кабелевский, Л.И.Столярова // Теплоэнергетика. – 1991. – №8. – С. 54 – 60.

4. Степаненко С.М. К вопросу о прочности дисков ГТД с учетом стадии развития усталостных трещин / С.М.Степаненко // Совершенствование турбоустановок методами мат. и физ. моделирования: тр. междунар. науч.-техн. конф. / Институт проблем машиностроения им.А.Н.Подгорного НАН Украины. – Х., 1997. – С. 537 – 539.

5. Шульженко Н.Г. Оценка живучести высокотемпературных элементов турбомашин с трещинами / Н.Г. Шульженко, П.П.Гонтаровский, И.И.Мележик // Вестник НТУ «ХПИ». Сб. научных трудов. Тематический выпуск: Динамика и прочность машин / НТУ «ХПИ». – Х., 2004. – Вып.19. – С. 153 – 160.

6. Шульженко Н.Г. Задачи термпрочности, вибродиагностики и ресурса энергетических аг-

регатив: монография / Н.Г. Шульженко, П.П. Гонтаровский, Б.Ф.Зайцев – Х.: ХНАДУ, 2011 – 444 с.

7. Шульженко Н.Г. Расчет трещино-стойкости элементов конструкций методом конечных элементов / Н.Г. Шульженко, П.П. Гонтаровский, И.И. Мележик // Вестник НТУ «ХПИ». Сб. научных трудов. Тематический выпуск: Динамика и прочность машин / НТУ «ХПИ». – Х., 2005.- №21. – С. 127 – 132.

8. Механіка руйнування та міцність матеріалів: довідниковий посібник. / Під заг. ред. В.В. Панасюка. Том 7: Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / І.М. Дмитрах, А.Б. Вайнман, М.Г. Стащук, Л.Тот. Під ред. І.М.Дмитраха. – Київ: ВД «Академперіодика», 2005. – 378с.

9. Гетман А.Ф. Ресурс эксплуатации сосудов и трубопроводов АЭС / А.Ф.Гетман. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 427 с.

Поступила в редакцию 20.06.2011

### **І.І. Мележик, П.П.Гонтаровський, М.Г.Шульженко. Оцінка впливу волого-парового середовища на кінетику тріщин в посудинах енергообладнання**

*Розроблена раніше методика розрахункової оцінки живучості високотемпературних елементів енергетичного обладнання розвинута на випадок врахування впливу волого-парового середовища. Діаграми циклічної тріщиностійкості задаються за значеннями в окремих точках для врахування їхньої складної форми. Наводяться результати розрахункової оцінки кінетики поверхневої тріщини в стінці циліндричної частини барботажного баку в повітрі й у волого-паровому середовищі енергоблоку потужність 100 МВт. Результати свідчать про значний вплив волого-парового середовища на живучість елемента конструкції.*

**Ключові слова:** тріщина, коефіцієнт інтенсивності напружень, живучість, волого-парове середовище, посудина енергообладнання.

### **I.I.Melezhyk, P.P.Gontarovsky, M.G.Shulzhenko. Estimation of influence of wet-steam environment on cracks cinetics in energy equipment vessels**

*Earlier developed calculation estimation technique of survivability of power equipment high-temperature elements advanced on a case of the account of influence of wet-steam environment. Cyclic crack resistance diagrams are set on value in separate points that allow taking into account their complex shape. Results of surface crack kinetics estimation calculation in the wall of bubble vessel cylindrical part a forecandle in air and in wet-steam environment of energetic block with power 100 MW of are given. The results are evidence of considerable influence of wet-steam environment on structural element survivability.*

**Key words:** crack, stress intensity factor, survivability, wet-steam environment, energy equipment vessel.