

Исследование механизма и кинетики разрушения поверхностных разноориентированных полуэллиптических трещин при сложном напряженно-деформированном состоянии с помощью деформационных критериев нелинейной механики разрушения

Н. А. Махутов, И. В. Макаренко, Л. В. Макаренко

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия

С использованием деформационных критериев разрушения и численных методов на основе экспериментальных данных предложены функциональные зависимости определения напряженно-деформированного состояния по контуру поверхностных разноориентированных малоцикловых полуэллиптических трещин с учетом объемной анизотропии физико-механических свойств материала, позволяющие проводить уточненную оценку прочности и живучести оборудования АЭС.

Ключевые слова: наклонные полуэллиптические трещины, малоцикловое нагружение, упругопластические деформации, анизотропия свойств, поверхность разрушения, ресурс, живучесть оборудования АЭС.

Известно, что в элементах ответственных конструкций содержатся исходные, технологические и эксплуатационные дефекты типа трещин. В основном их можно смоделировать поверхностными разноориентированными полуэллиптическими трещинами. При этом для оценки живучести и ресурса оборудования важно знать направление и кинетику их развития в трехмерных полях упругопластических циклических номинальных эксплуатационных нагрузок, а также напряженно-деформированное состояние (НДС) вблизи трещины. Оптимальной стратегией исследования является разумное сочетание экспериментальных исследований и математического (компьютерного) моделирования.

Существует большое количество подходов к проблеме и методов ее решения. Для определения НДС у вершины трещины в линейно-упругих телах обычно применяются [1, 2] три основных метода: метод комплексных потенциалов Колосова–Мухелишвили; метод интегральных преобразований и метод разложения по собственным функциям.

Получить аналитические решения для таких параметров механики разрушения при коэффициентах интенсивности напряжений K_α ($\alpha = 1, 2, 3$) вдоль всей длины произвольной искривленной трещины практически невозможно. При этом существуют некоторые решения для типичных и простейших ее геометрий.

В общем случае упругопластического деформирования тела с трещиной для компонент тензора относительных деформаций в окрестности контура трещины справедливо [3–6] асимптотическое представление ($\alpha = I, II, III$; $i, j = 1, 2, 3$):

$$\bar{\epsilon}_{ij}(r, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \sum_{\alpha} \bar{K}_{\alpha} f_{ij}^{(\alpha)}(\theta) + \dots, \quad (1)$$

где $\bar{e}_{ij} = e_{ij}/e_T$; e_T – деформация, соответствующая пределу текучести материала; r, θ – полярные координаты точек вблизи контура трещины в плоскости, перпендикулярной к этому контуру; $\bar{K}_{e\alpha} = K_{e\alpha}/\sigma_T$; $\bar{K}_{eI}, \bar{K}_{eII}, \bar{K}_{eIII}$ – относительные коэффициенты интенсивности деформаций, зависящие от приложенной к телу нагрузки, геометрии тела и трещины; $K_{e\alpha}$ – коэффициент интенсивности деформаций; σ_{Ti} – локальный предел текучести материала.

Цель данной работы состоит в исследовании НДС, прогнозировании траектории роста поверхностных наклонных малоцикловых полуэллиптических трещин на основе локальных полей упругопластических деформаций вблизи этих трещин численными методами с помощью имеющихся экспериментальных результатов.

Для использования результатов экспериментального исследования и его логического расширения на большинство задач нелинейной механики разрушения необходимо применение численных методов решения, в частности метода конечных элементов (МКЭ). Особенно важным при этом является разработка процедур решения задач нелинейной механики разрушения в трехмерной постановке.

При решении поставленной задачи в качестве исходной используется модель однородного изотропного упругопластического тела с кусочно-линейным изотропным упрочнением в программном комплексе для математического моделирования задач нелинейной механики разрушения ANSYS.

Значения констант упругого и пластического деформирования получены из проведенных экспериментов для соответствующих сталей аустенитного класса. При определении параметров модели материала использованы результаты статических и малоцикловых испытаний цилиндрических и трубчатых образцов из этих сталей с нанесенными исходными поверхностными полуэллиптическими наклонными трещинами (рис. 1). Это позволило определить локальные деформации и механические свойства сталей, построить диаграммы растяжения и исследовать кинетику поверхностей разрушения соответствующих трещин с определением комплекса параметров нелинейной механики разрушения.

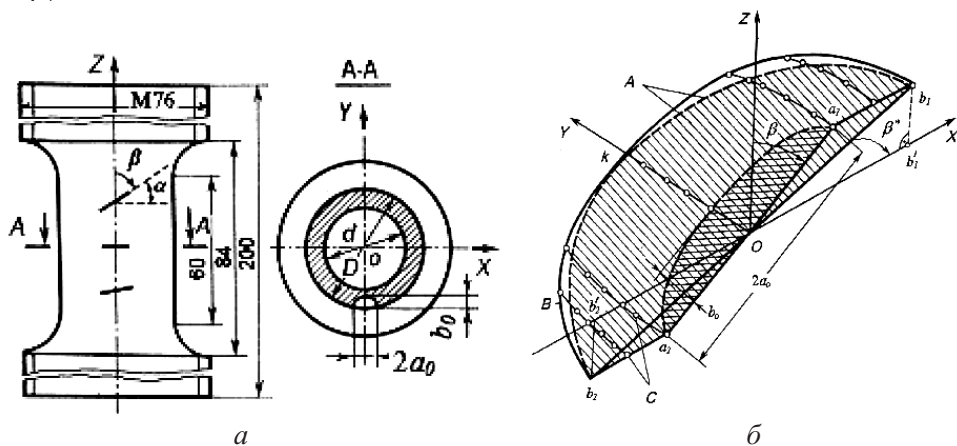


Рис. 1. Схема трубчатого образца из стали 08X18H10T с исходными надрезами (а) и изометрическое изображение поверхности трещины, подросшей из исходного полуэллиптического надреза при $\bar{\sigma}_n = \pm 1,15$, $\beta = \pi/4$; А – расчетная поверхность трещины; В – контур реальной поверхности трещины; С – точки реальной поверхности трещины.

Для выбранной модели пластичности использовались точки на диаграмме деформирования, расположенные за пределами пропорциональности, которые были определены в координатах истинные напряжения–истинные деформации. Поскольку истинную площадь сечения образца после образования шейки можно определить только экспериментально, истинный предел прочности коррелировался с истинным сопротивлением разрыву в шейке прямой линией в двойных логарифмических координатах.

Максимальные номинальные растягивающие и циклические нагрузки, действующие на образец в процессе испытаний, были выше предела текучести материала.

При решении задачи с физической нелинейностью использовались такие специальные опции программы ANSYS, как учет больших деформаций и поворотов трещины с сохранением промежуточных результатов на всех шагах нагружения. При этом применялась полная процедура Ньютона–Рафсона как алгоритм пошагового решения системы нелинейных алгебраических уравнений $[K] \cdot \{u\} = \{F\}$, когда на каждом шаге нагрузки решается линейное алгебраическое уравнение вида

$$[K]_{i-1} \{\Delta u\}_i = \{F\} - \{F\}_{i-1}, \quad (2)$$

где $[K]_{i-1}$ – матрица жесткости на предыдущей итерации (касательная); $\{\Delta u\}_i$ – вектор приращений перемещений, $\{\Delta u\}_i = \{u\}_i - \{u\}_{i-1}$; $\{F\}$ – вектор, приложенный к системе внешних сил; $\{F\}_{i-1}$ – вектор сил, соответствующий перемещениям системы на предыдущей итерации.

При расчете применяется пошаговое приложение нагрузки. Создаются массивы для хранения выходных данных на каждом шаге расчета, которые нужны для их сопоставления с изменениями деформационных параметров с учетом нелинейных эффектов номинальных напряжений на локальные деформации и рост трещин и построения их функциональной зависимости.

Квадратичное пошаговое изменение текущей величины приложенной нагрузки от нуля до конечного максимального значения обеспечивает лучшую сходимость расчета. Данная функциональная зависимость позволяет придавать меньшее приращение нагрузки вблизи конечной стадии процесса, когда пластические деформации становятся большими и их рост ускоряется.

При решении задачи рассматривалась трещина нормального отрыва ($\beta = \pi/2$) и наклонная ($\beta = \pi/4$) при приложенном вдоль оси Z номинальном упругопластическом напряжении $\bar{\sigma}_n = 1,15$.

На рис. 2 приведена конечноэлементная модель полуэллиптической поверхности трещины.

Размах интенсивностей локальных относительных упругопластических деформаций вблизи поверхностей разрушения, полученных численными методами, подтверждает ранее [6] приведенные функциональные эмпирические зависимости при заданных граничных условиях:

$$(\Delta \bar{e}_{ia})_b^* = (\Delta \bar{e}_{ia})_a^* (\tilde{V}^*)^{0,5}; \quad (3)$$

$$(\Delta \bar{e}_{ia})_a^* = (2/3)\sqrt{1 - \mu + \mu^2} (A/e_{Ti}) f_1 \beta f_2 (l_{ijx}/t)^{f_3 + \beta f_4}; \quad (4)$$

$$A = 1,18 - 1,7 \cdot 10^{-3} \bar{e}_f. \quad (5)$$

Для аустенитных нержавеющей циклически стабильных сталей класса 08X18H10T имеем $f_1 = 0,181\bar{\sigma}_n - 0,191\bar{\sigma}_n^2 + 0,083\bar{\sigma}_n^3$, $f_2 = -1,5 + 0,33\bar{\sigma}_n$, $f_3 = 3,645(\bar{\sigma}_n)^{-0,29}$, $f_4 = -1,319(\bar{\sigma}_n)^{-0,156}$.

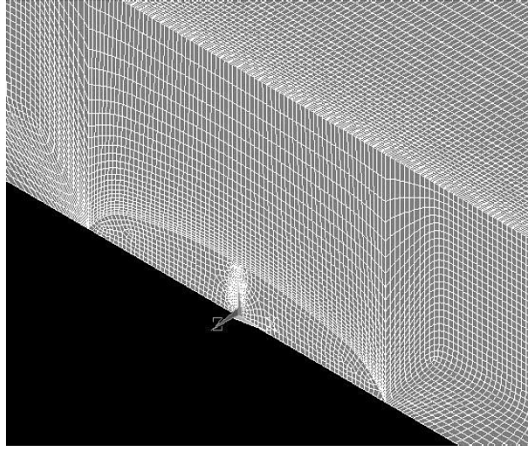


Рис. 2. Схема конечноэлементной модели полуэллиптической поверхностной трещины.

На рис. 3 с учетом критериев [4–6] приведены экспериментальные и расчетные величины размахов интенсивностей относительных упругопластических деформаций в направлении малой полуоси полуэллиптической трещины с углом наклона $\beta = \pi/4$ от самой глубокой ее точки (вдоль оси OY) и по поверхности образца от поверхностной точки трещины (вдоль оси OX).

На рис. 4 показано, что рост полуэллиптической трещины происходит по направлению наименьших градиентов интенсивностей упругопластических деформаций, что и было установлено экспериментальными исследованиями.

С помощью численных расчетов на основе нелинейных деформационных критериев разрушения установлено направление развития исходной поверхностной трещины, совпадающее с экспериментальными данными.

Проведенные исследования позволяют определять [4–9] характеристики нелинейной механики разрушения как относительные коэффициенты интенсивности деформаций для поверхностных разноориентированных малоцикловых трещин, зависящие от размаха упругопластических деформаций в поверхностных точках по их контуру для трех моделей (I, II, III) разрушения. Для трещин нормального отрыва:

$$(\Delta \bar{K}_{Ie}^{*(k)})_{\Phi} = \left\{ (2\pi r^*)^{p_{ke}^{(k)}} \bar{e}_n^{(-2m)/(1+m_k)} \left/ \left[\frac{1 + (r^*/a^*)}{\sqrt{1 + (r^*/2a^*)}} \right]^{p_{ke}^{(k)}} \right. \right\} \times$$

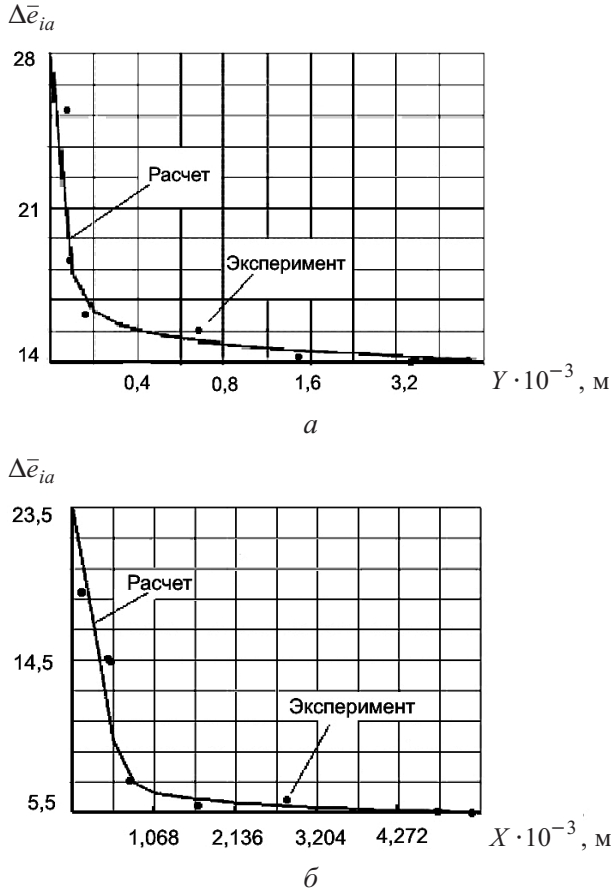


Рис. 3. Сравнение расчетных размахов относительных упругопластических деформаций с экспериментальными вблизи контура наклонной поверхностной полуэллиптической трещины вдоль малой полуоси OY (а) и вблизи поверхностной точки полуэллиптической трещины вдоль оси OX (б) для стали 08Х18Н10Т: $\bar{\sigma}_n = \pm 1,15$, $\beta = \pi/4$; b_0, a_0 – исходные размеры полуосей трещины, $b_0 = 1,05$ мм; $a_0 = 3,5$ мм.

$$\begin{aligned} & (\Delta \bar{e}_{ia} \sin^2 \beta^*) \left\{ 1 + \left[0,1 + 0,35 \left(\frac{b}{t} \right)^2 \right] (1 - \sin \Phi)^2 \right\} \\ & \times \frac{1}{\left[\left(\frac{b}{a} \right)^2 \cos^2 \Phi + \sin^2 \Phi \right]^{-1/4} \left[\frac{100}{58} \left(\frac{b}{t} \right)^{0,5} \right]} \end{aligned} \quad (6)$$

поперечного сдвига:

$$(\Delta \bar{K}_{IIe}^{*(k)})_{\Phi} = f_2(\bar{e}_n, \Delta \bar{e}_{ia}, b, a, b/a, b/t, \beta^*, r^*, \Phi, m, k, m_k) \quad (7)$$

и продольного сдвига:

$$(\Delta \bar{K}_{IIIe}^{*(k)})_{\Phi} = f_3(\bar{e}_n, \Delta \bar{e}_{ia}, b, a, b/a, b/t, \beta^*, r^*, \Phi, m, k, m_k). \quad (8)$$

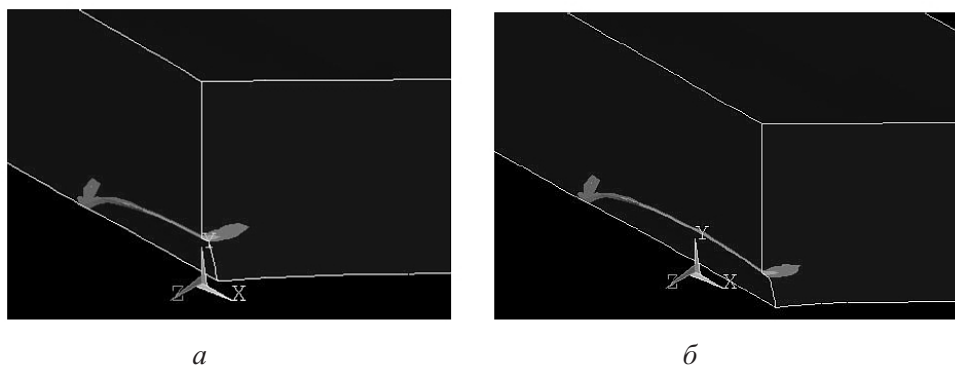


Рис. 4. Эпюры интенсивностей упругопластических деформаций в плоскости продольного сечения образца вблизи самой глубокой точки трещины (а) и в параллельной ей плоскости $X = 2$ мм вблизи соответствующей точки контура (б): $\bar{\sigma}_n = 1,15$, $\beta = \pi/4$.

Полученные результаты исследованных закономерностей развития наклонных поверхностных малоцикловых полуэллиптических трещин могут быть введены в обобщенные расчетные комплексы прогнозирования остаточного ресурса элементов оборудования при трехосном НДС.

В соответствии с полученными результатами численного расчета, подтвержденными экспериментальными данными, можно определять не только локальные характеристики прочности, но и осуществлять уточненную оценку живучести и безопасности высоконагруженных элементов оборудования АЭС в процессе их эксплуатации.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 13-08-00839А.

Резюме

Із використанням деформаційних критеріїв руйнування і числових методів на основі експериментальних даних запропоновано функціональні залежності визначення напружено-деформованого стану по контуру поверхневих різноорієнтованих малоциклових напівеліптичних тріщин з урахуванням об'ємної анізотропії фізико-механічних властивостей матеріалу, за допомогою яких можна проводити уточнену оцінку міцності і живучості АЕС.

1. *Разрушение* / Перевод с англ. под ред. Г. Либовица. – М.: Мир, 1973–1976. – Т. I–VII.
2. *Механика разрушения и прочность материалов. Справочное пособие* / Под ред. В. В. Панасюка. – Киев: Наук. думка, 1988. – Т. 1–4.
3. *Троценко В. Т., Ясний П. В., Покровский В. В.* Влияние температуры испытания на трещиностойкость теплоустойчивых конструкционных сталей // Физ.-хим. механика материалов. – 1986. – № 1. – С. 98 – 106.
4. *Махутов Н. А.* Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
5. *Махутов Н. А.* Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. В 2 ч. – Новосибирск: Наука, 2005. – 1110 с.

6. *Махутов Н. А., Макаренко И. В., Макаренко Л. В.* Исследование кинетики разрушения при наличии поверхностных полуэллиптических разноориентированных трещин в сварных элементах оборудования АЭС // Пробл. прочности. – 2010. – № 1. – С. 37 – 45.
7. *Makhutov N. A., Makarenko I. V., and Makarenko L. V.* Particularities a micromechanism of cycle elastic-plastic fracture and damage // Proc. Int. Conf. “In-Service Damage of Materials, Its Diagnostics and Prediction” (Sept. 21–24, 2009, Ternopil, Ukraine). – Pul’uj State Technical University, 2009. – P. 96 – 102.
8. *Махутов Н. А., Фролов К. В., Драгунов Ю. Г. и др.* Обеспечение ресурса и живучести водо-водяных энергетических реакторов. – М.: Наука, 2009. – 343 с.
9. *Махутов Н. А., Макаренко И. В., Макаренко Л. В.* Влияние анизотропии физико-механических свойств на кинетику трещин в аустенитных сталях // Пробл. прочности. – 2004. – № 1. – С. 113 – 119.

Поступила 03. 10. 2012