

Упругопластическая модель роста усталостных поверхностных трещин в толстостенных конструкциях при двухосном нагружении

© К.А. Вансович

Омский государственный технический университет, Омск, 644050, Россия

Представлена модель роста поверхностных трещин в толстостенных элементах конструкций под действием двухосного циклического нагружения. По результатам испытания крестообразных образцов получены экспериментальные данные, на основании которых установлена зависимость скорости роста поверхностных трещин от степени двухосности нагружения. С помощью программы ANSYS исследовано поле деформаций в окрестности трещин с учетом упругопластических свойств материала. Разрушение в вершине усталостной трещины представлено как комбинация хрупкого разрушения в вершине трещины и вязкого разрушения в зоне развития пластических деформаций. Предложена формула для определения скорости роста усталостных поверхностных трещин с учетом хрупкого и вязкого параметров напряжений в вершине трещины.

Ключевые слова: *поверхностная трещина, двухосное нагружение, крестообразный образец, метод конечных элементов, хрупкая и пластическая зоны, скорость роста трещины*

Введение. При эксплуатации таких объектов, как цилиндрические и сферические резервуары, сосуды и аппараты высокого давления, ракетные корпуса, магистральные трубопроводы, работающие под воздействием высокого внутреннего давления, необходимо оценивать их прочность и ресурс работы при наличии трещиноподобных дефектов. Рост трещин в процессе эксплуатации таких конструкций может привести к образованию утечек и даже разрушений с очень серьезными последствиями [1–6].

Наиболее опасными из элементов сосудов и резервуаров высокого давления являются цилиндрические оболочки с продольными трещинами, поскольку в оболочке кольцевые напряжения являются наибольшими, инициирующими раскрытие именно продольных трещин, перпендикулярных этим напряжениям.

Отметим, что проблему разрушения и предельных состояний для сосудов давления, имеющих поверхностные трещины, решают, используя аналитические [2–4, 7] и численные методы анализа напряжений и деформаций [5, 9, 11], а также данные экспериментальных исследований [8, 13, 16], что позволяет полномасштабно оценить полученные результаты.

Пример аналитической работы изложен в статье [7], в которой в основу модели разрушения положен критерий критического раскрытия трещины. За критерий образования течи в работе [4] принято достижение мембранной составляющей раскрытия трещины критического значения. Авторами [2, 3] разработана теория разрушения цилиндрических оболочек с поверхностными трещинами.

В настоящее время научные работники и инженеры все большее предпочтение отдают численным методам исследования напряженно-деформированного состояния сосудов давления и резервуаров [14]. Это объясняется прежде всего большими достижениями в разработке прикладных компьютерных программ. Так, в работах [5, 6] представлена смоделированная с помощью метода конечных элементов полуэллиптическая трещина в толстостенном цилиндре. В качестве критерия для оценки прочности был использован коэффициент интенсивности напряжений K_I . Анализ выполнен в программе ANSYS.

В рамках линейно-упругой механики разрушения исследовано влияние местоположения трещины, геометрического соотношения полуосей поверхностной трещины, отношения малой полуоси трещины к толщине стенки сосуда давления на коэффициент интенсивности напряжений.

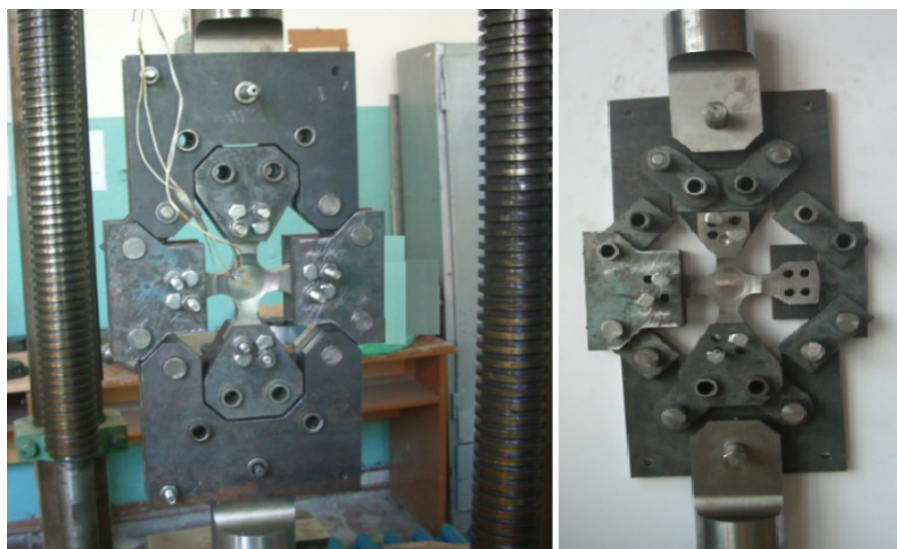
В работах [8, 10, 11, 15] приведены результаты исследований развития поверхностных трещин на основе теории упругопластической механики разрушения. Изучено влияние пластических свойств конструкций в окрестностях трещины на ее геометрию при различных видах нагружения. Показано, что теорию роста трещин, разработанную в рамках линейно-упругой механики разрушения, нельзя применять при реализации вязкого сценария разрушения.

В работе [12] представлены примеры практического применения параметров механики разрушения для сборных сварных конструкций сосудов высокого давления. Линейно-упругая механика разрушения была применена для решения типовых задач эксплуатации, когда при регулярном осмотре сварных соединений цилиндрических резервуаров для хранения сжатого воздуха методами неразрушающего контроля были обнаружены недопустимые дефекты. При моделировании разрушения стенки резервуара обнаруженные дефекты были заменены соответствующими трещинами для проведения дальнейших расчетов.

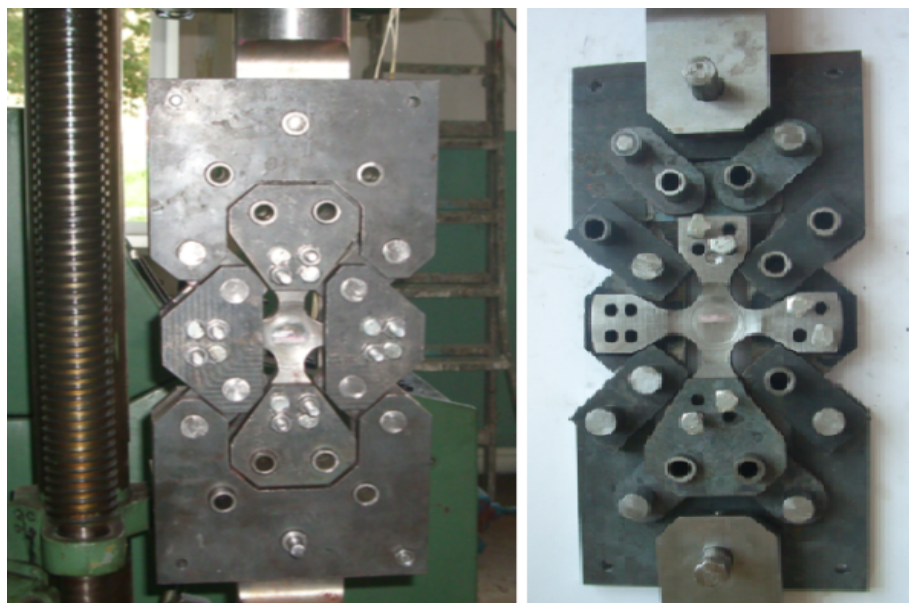
Метод исследования и анализ результатов. В настоящей статье изложены результаты экспериментальных и теоретических исследований влияния двухосности напряженного состояния на скорость роста поверхностных трещин для алюминиевого сплава АК6 и стали 20, выбранных в качестве пластичных материалов, широко используемых в промышленности. Для испытаний были разработаны образцы

крестообразной формы и приспособления для реализации нагружения растяжение — сжатие (рис. 1, а) и двухосное растяжение (рис. 1, б).

Методика проведения экспериментов подробно описана в работе [16]. Толщина рабочей части образца выбрана равной 10 мм. Напряженное состояние крестообразного образца исследовано в программе ANSYS Workbench.



а



б

Рис. 1. Приспособления для двухосных испытаний крестообразных образцов:
а — растяжение — сжатие; *б* — двухосное растяжение

На рис. 2 представлены основные этапы моделирования крестообразного образца для исследования напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов.

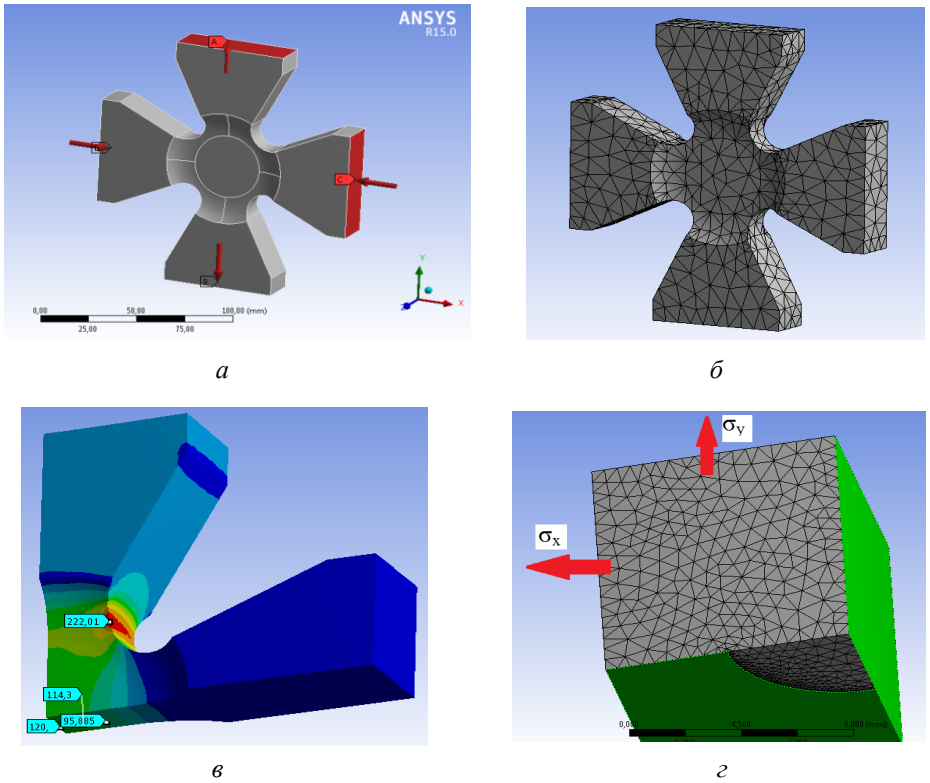


Рис. 2. Исследование напряженно-деформированного состояния в рабочей зоне крестообразного образца:

a — схема для расчета; *б* — конечно-элементная модель; *в* — результаты вычисления напряжений (МПа); *г* — моделирование поверхностной трещины

Для зарождения трещины на поверхности образца просверлены три отверстия так, чтобы перемычки между ними составляли 0,3...0,4 мм. В процессе нагружения перемычки стали быстро разрушаться вследствие концентрации напряжений.

В дальнейшем несквозная усталостная трещина в процессе циклического роста стремилась принять полуэллиптическую форму, которая геометрически характеризуется размерами большой ($2c$) и малой (a) полуосей (рис. 3). Результаты усталостных испытаний для сплава АК6 при различной степени двухосности нагружения в зоне поверхностной трещины представлены на рис. 4 и для стали 20 на рис. 5.

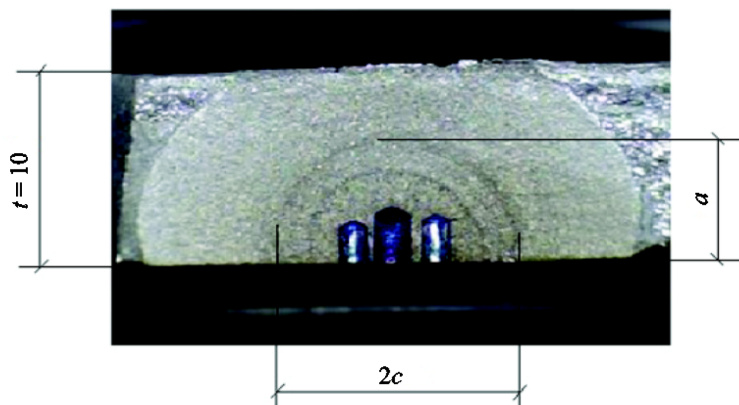
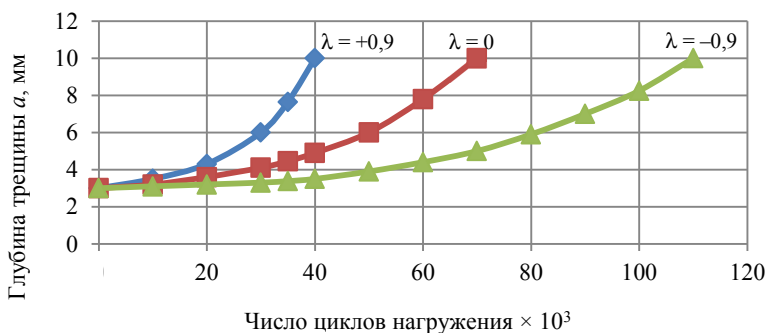
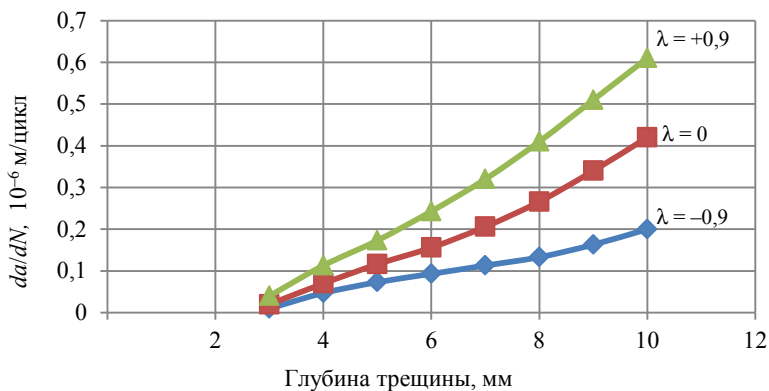


Рис. 3. Поверхность излома усталостного разрушения образца из стали 20:

a — глубина полуэллиптической поверхностной трещины; $2c$ — длина трещины, измеренная по поверхности образца; t — толщина рабочей части образца



a



б

Рис. 4. Рост усталостных трещин в алюминиевом сплаве АК6 при различных значениях λ :

a — рост трещины; b — скорость роста трещины.

Здесь и далее на рисунках: $\lambda = +0,9$ — растяжение — растяжение; $\lambda = 0$ — одноосное растяжение; $\lambda = -0,9$ — растяжение — сжатие

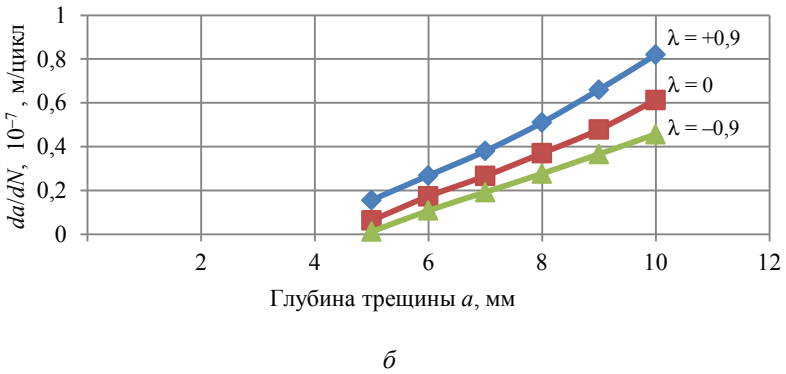
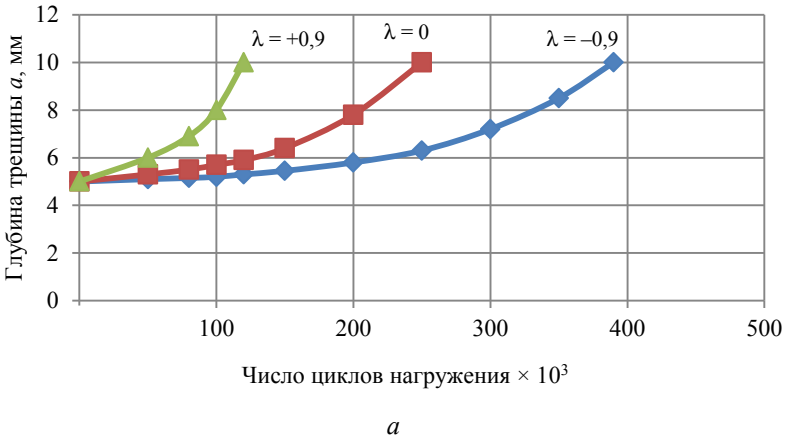


Рис. 5. Рост усталостных трещин в стали 20 при различных значениях λ : a — рост трещины; b — скорость роста трещины

Степень двухосности нагружения $\lambda = \sigma_x / \sigma_y$ определяется отношением нормальных напряжений в центре рабочей зоны образца (см. рис. 2, в). Напряжение σ_y , перпендикулярное плоскости трещины, раскрывает ее при нагружении и может иметь только положительные значения, в то время как напряжение σ_x действует параллельно плоскости трещины и может создавать растяжение или сжатие в зоне трещины, т. е. его значение может быть как положительным, так и отрицательным.

На основании анализа полученных экспериментальных данных установлено, что при сжимающем напряжении σ_x число циклов до разрушения образца увеличивалось, а скорость роста трещины уменьшалась. И наоборот — при растягивающем напряжении σ_x число циклов до разрушения уменьшалось, а скорость роста трещины увеличивалась.

В настоящей статье предлагается метод исследования уругопластических напряжений в вершине трещины, объясняющий влияние степени двухосности нагружения на скорость роста усталостных поверхностных трещин. Он основан на представлении процесса усталостного разрушения как комбинации независимых явлений, происходящих впереди фронта трещины и характеризуемых охрупчиванием металла, с одной стороны, и большими пластическими деформациями, возникающими у вершины трещины в направлении, поперечном плоскости распространения трещины, — с другой. Важно, что эти деформационные процессы рассматриваются непосредственно у кончика трещины на расстоянии не более 0,5 мм от него. В связи с этим характерный размер сетки конечных элементов в вершине трещины выбран равным 0,001...0,005 мм.

Результаты вычислений сравнивали с данными экспериментов, полученными при испытании крестообразных образцов на растяжение — сжатие и на двухосное растяжение. В основу исследования положен анализ изменения скорости роста усталостных трещин при двухосном нагружении по сравнению со скоростью роста трещин, которая была зафиксирована при испытании на одноосное нагружение призматических образцов прямоугольного поперечного сечения с поверхностной трещиной.

На примере расчета эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ при одноосном нагружении на рис. 6 представлены две зоны уругопластической деформации сплава АК6 в вершине трещины. В зоне 1 происходит охрупчивание металла вследствие роста всех трех нормальных

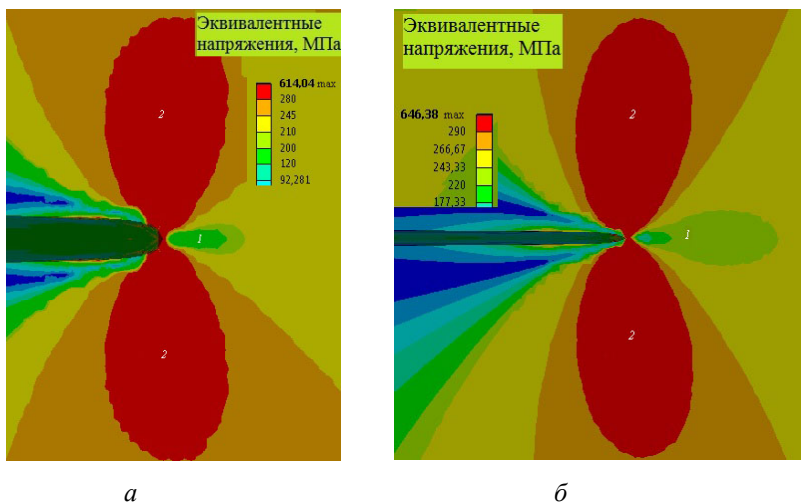


Рис. 6. Зоны деформаций в вершине трещины:
a — АК6; *б* — сталь 20; 1 — зона охрупчивания материала; 2 — зона больших пластических деформаций

напряжений в вершине трещины, которые, независимо от вида нагружения, имеют высокие растягивающие значения. В зоне 2 возникают большие пластические деформации по причине развития касательных напряжений в процессе прорастания трещины: часть металла с образовавшейся свободной поверхностью получает поперечный сдвиг относительно неразрушенной части металла.

Ранее авторами работы [17] было установлено, что размеры зоны пластической деформации в вершине трещины (зона 2) коррелируют с изменением скорости роста усталостных трещин при двухосном нагружении. Однако в работе не учитывалось влияние значения напряжений, развивающихся непосредственно у кончика трещины, на скорость ее роста. Было установлено, что с увеличением зоны пластических деформаций скорость роста трещины снижается. Особенно эта связь заметна при испытании образцов на растяжение — сжатие, когда пластические деформации развиваются наиболее активно.

Задача данного исследования сводится к определению параметров, характеризующих напряженное состояние в зонах 1 и 2 с учетом процессов разрушения, характерных для этих частей металла, а также к оценке их влияния на скорость роста усталостных поверхностных трещин при различных видах нагружения.

При исследовании процесса усталостного разрушения сделано предположение, что в вершине трещины одновременно происходят разрушения как в зоне 1, так и в зоне 2. Однако механизмы разрушения в этих зонах принципиально различаются. В зоне 1 реализуется хрупкое разрушение отрывом, которое характеризуется величиной нормальных растягивающих напряжений, а для различных видов нагружения — отличается величиной среднего напряжения σ_0 . В зоне 2 реализуется вязкое разрушение сдвигом и количественно оценивается эквивалентными напряжениями $\sigma_{ЭКВ}$ и максимальными касательными напряжениями τ_{max} .

В зоне 1 у вершины трещины охрупчивание материала характеризуется развитием больших растягивающих напряжений. Здесь реализуется трехосное растяжение: наибольшие значения имеют напряжения σ_y , перпендикулярные плоскости трещины; напряжения σ_x и σ_z также имеют высокие положительные значения, превышающие предел текучести.

Хрупкое разрушение, которое реализуется впереди фронта трещины в зоне 1 из-за высоких растягивающих напряжений, предложено характеризовать безразмерной величиной $\beta = \sigma_0 / \tau_{max}$. Увеличение этого параметра приводит к более активному разрушению впереди фронта трещины путем отрыва и, соответственно, в процессе усталостного разрушения увеличивает скорость роста трещины. Анализ диаграмм на рис. 7 позволяет сделать вывод о том, что предложен-

ный параметр β характеризует увеличение скорости роста трещины только при двухосном растяжении, а для случая растяжения — сжатия этот параметр нельзя применять, так как график, отображающий этот случай, практически совпадает с графиком, построенным для одноосного растяжения.

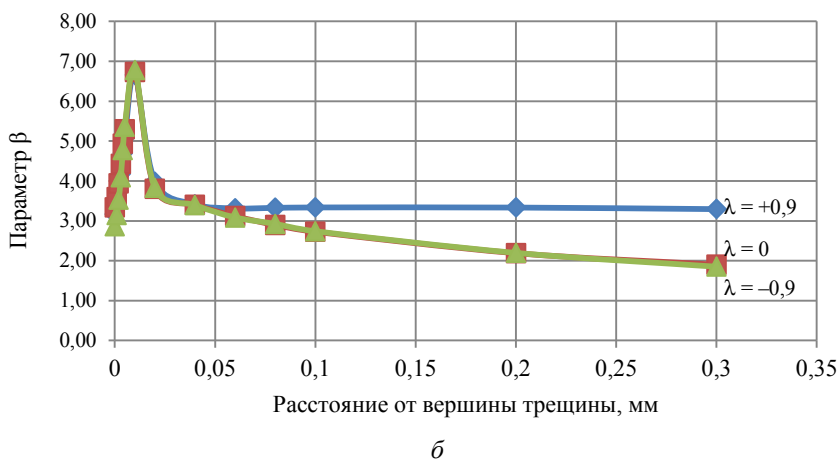
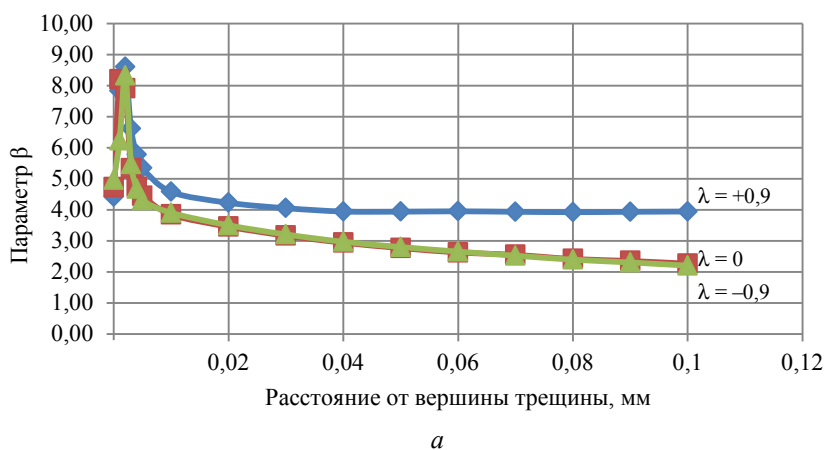


Рис. 7. Безразмерный параметр $\beta = \sigma_0/\tau_{\max}$:
 а — АК6, глубина трещины 5 мм; б — сталь 20, глубина трещины 6 мм

При двухосном растяжении параметр β_λ необходимо сравнивать с параметром β_0 , вычисленным для одноосного растяжения, т. е. следует определить изменение скорости роста трещины в зависимости от отношения β_λ/β_0 .

Для сплава АК6 сравнительный анализ результатов усталостных испытаний образцов (см. рис. 4) и результатов вычислений параметра β (см. рис. 7, а) позволил установить, что для трещины размером $a = 5$ мм на расстоянии 0,07 мм впереди ее фронта отношение

$\beta_{\lambda 0,07} / \beta_{0 0,07} = 3,93/2,58 = 1,52$, что очень близко отношению скоростей: $(da/dN)_{\lambda=+0,9}/(da/dN)_{\lambda=0} = 0,172/0,116 = 1,48$.

Для стали 20 аналогичные результаты представлены на рис. 5 и 7, б для трещины размером $a = 6$ мм. Отношение скоростей роста усталостных трещин: $(da/dN)_{\lambda=+0,9}/(da/dN)_{\lambda=0} = 0,268/0,173 = 1,55$. Отношение $\beta_{\lambda 0,2} / \beta_{0 0,2} = 3,33/2,19 = 1,52$ на расстоянии 0,2 мм впереди фронта трещины. Как видно, полученные результаты для стали аналогичны результатам для алюминиевого сплава. Следует отметить, что отношение расстояний впереди фронта трещины, где вычислялся параметр β , для стали 20 и алюминиевого сплава АК6 равен $0,2/0,07$, что практически соответствует отношению модулей Юнга для стали и алюминиевого сплава E_{st}/E_{al} .

Для количественной оценки скорости роста трещины в случае растяжения — сжатия необходимо исследовать разрушение металла в зоне 2 (см. рис. 6). Предполагается, что образование свободных поверхностей при сдвиге происходит в случае превышения эквивалентными напряжениями предела прочности материала, т. е. когда $\sigma_{\text{ЭКВ}} > \sigma_{\text{в}}$, где $\sigma_{\text{в}}$ — предел прочности материала. При этом разрушение происходит по плоскостям развития максимальных пластических деформаций, т. е. близко к перпендикулярному направлению относительно плоскости роста трещины. Будем полагать, что такое разрушение снизит скорость роста трещины в магистральном направлении из-за «сброса» части энергии раскрытия трещины по второстепенным направлениям разрушения.

Результаты вычисления эквивалентных напряжений в зоне 2 у вершины трещины для сплава АК6 приведены на рис. 8, а. Их определяли для размера пластической зоны в вершине трещины, на 10 % превышающей предел текучести. Сравнили только два варианта нагружения: растяжение — сжатие крестообразного образца и одноосное нагружение призматического образца. Результаты первого варианта не приведены по причине их незначительного отличия от результатов второго.

Характерный размер зоны эквивалентных напряжений предложено определять в направлении, нормальном к плоскости трещины. В случае растяжения — сжатия такой характерный размер зоны эквивалентных напряжений при $\sigma_{\text{ЭКВ}} > 1,1\sigma_{\text{T}}$ ($\sigma_{\text{T}} = 240$ МПа) составит $d = 0,049$ мм, при одноосном растяжении $d = 0,038$ мм.

Другой величиной, характеризующей процессы разрушения сдвигом в зоне 2, предложено считать максимальное эквивалентное напряжение по Мизесу (см. рис. 8). Анализ результатов вычислений показал, что при растяжении-сжатии пластические деформации развиваются значительно сильнее, чем при одноосном нагружении. Максимальные эквивалентные напряжения при растяжении — сжатии оказались равными $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}} = 593$ МПа, а при одноосном растяжении $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}} = 507$ МПа.

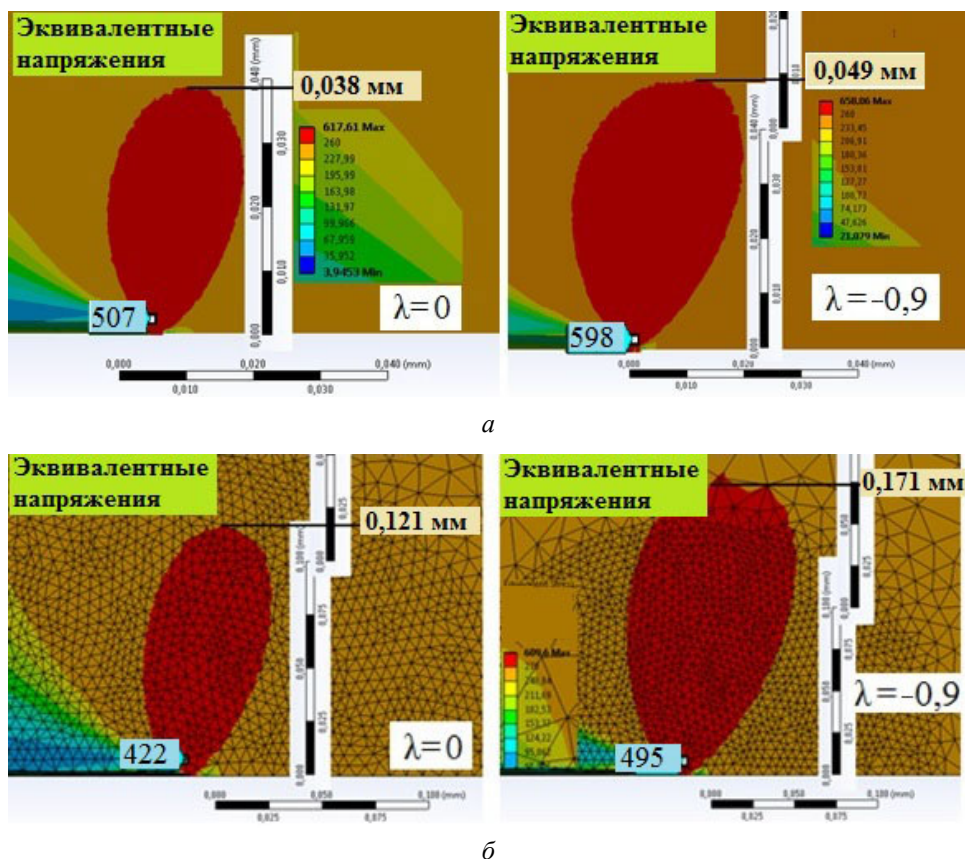


Рис. 8. Эквивалентные напряжения в зоне трещины:
 а — сплав АК6; б — сталь 20

Проведенный в данном исследовании совместный анализ экспериментальных исследований и результатов вычисления напряжений в зоне 2 у вершины трещины позволил выбрать параметр, который адекватно отражает зависимость скорости роста усталостной трещины от интенсивности процессов разрушения, происходящих по механизму сдвига в направлении, поперечном плоскости трещины. Такой параметр предложено вычислять как произведение максимальных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}}$ и размера зоны пластических деформаций d (см. рис. 6):

$$\gamma = \sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}} d. \quad (1)$$

Предполагается, что параметр γ можно использовать только для сравнения роста трещин при двухосном и одноосном нагружении, т. е. как отношение $\gamma_{\lambda}/\gamma_0$, где γ_{λ} определяется для случая двухосного нагружения с коэффициентом двухосности λ , а γ_0 определяется для одноосного нагружения при $\lambda = 0$. В этом случае размерность рассматриваемых величин не имеет принципиального значения. Когда

раскрывающие напряжения $\sigma_y = 120$ МПа (см. рис. 3) и размер поверхностной трещины $a = 5$ мм, для сплава АК6 $\gamma_\lambda = 593 \cdot 0,049 \approx 29,1$ МПа \cdot мм для $\lambda = -0,9$ (см. рис. 6, 7) и $\gamma_0 = 507 \cdot 0,038 \approx 19,1$ МПа \cdot мм для $\lambda = 0$. Отсюда $\gamma_\lambda/\gamma_0 \approx 1,52$. Для такого варианта расчетов сравним отношение скоростей (см. рис. 3): $(da/dN)_0/(da/dN)_\lambda = 0,116/0,074 \approx 1,56$. Этот пример показывает, что отмечается хорошая корреляция между отношением скоростей при двухосном нагружении и отношением параметров, характеризующих разрушения в зоне пластической деформации у вершины трещины.

Для стали 20 и глубины поверхностной трещины $a = 6$ мм при раскрывающих напряжениях $\sigma_y = 150$ МПа аналогичные параметры для формулы (1) были определены для размера пластической зоны в вершине трещины, превышающей предел текучести $\sigma_T = 250$ МПа на 10 % (см. рис. 8, б). В этом случае $\gamma_\lambda = 495 \cdot 0,171 \approx 84,6$ МПа \cdot мм для $\lambda = -0,9$ и $\gamma_0 = 422 \cdot 1,121 \approx 51,1$ МПа \cdot мм для $\lambda = 0$. Отсюда $\gamma_\lambda/\gamma_0 \approx 1,65$. Для этого случая отношение скоростей (см. рис. 4, б): $(da/dN)_0/(da/dN)_\lambda = 0,173/0,108 \approx 1,61$. В примере также хорошо совпадает зависимость скорости трещины от предложенного параметра (1) для случая растяжения — сжатия.

В качестве обобщения полученных результатов экспериментальных исследований и вычисления напряжений в зонах 1 и 2 у вершины трещины предлагаем формулу для определения скорости роста усталостной трещины при двухосном нагружении:

$$\frac{da}{dN} = \frac{\beta_\lambda/\beta_0}{\gamma_\lambda/\gamma_0} C(\Delta K_I)^n. \quad (2)$$

Для ее получения была использована классическая формула Пэриса, применяемая для оценки усталостного роста трещин при одноосном циклическом нагружении [18]. Формула (2) позволяет, используя отношение β_λ/β_0 , учитывать влияние процессов разрушения, происходящих в зоне охрупчивания 1 у вершины трещины, на скорость роста трещины. Отношение γ_λ/γ_0 , отражающее влияние на скорость роста трещины пластических деформаций в зоне 2 у вершины трещины, находится в знаменателе формулы (2). Таким образом, при двухосном растяжении $\beta_\lambda/\beta_0 > 1$ и вычисленное значение скорости трещины получается больше, чем при одноосном растяжении. При растяжении — сжатии $\gamma_\lambda/\gamma_0 > 1$, но при этом скорость роста трещины становится меньше, чем при одноосном нагружении, так как это отношение находится в знаменателе. Следует подчеркнуть, что при $\beta_\lambda = \beta_0$ и $\gamma_\lambda = \gamma_0$, т. е. при одноосном нагружении образца формула (2) совпадает с известной формулой Пэриса [18]:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_I)^n. \quad (3)$$

Заключение. Предложенная модель роста усталостных поверхностных трещин в толстостенных металлических конструкциях позволяет выполнить оценку остаточного ресурса, если известны постоянные C и n формулы Пэриса для заданного материала, которые можно определить на основании результатов усталостных испытаний, проведенных при одноосном циклическом нагружении призматических образцов с поверхностной трещиной. Для определения остаточного ресурса деталей с поверхностной трещиной необходимо исследовать ее напряженно-деформированное состояние под действием внешних нагрузок и определить степень двухосности нагружения в области трещины. Затем следует выделить элемент с трещиной и смоделировать зону деформаций непосредственно в вершине трещины размером 0,5 мм. В этой области размер конечных элементов должен соответствовать 0,001...0,005 мм. Напряжения у вершины трещины рассчитываются для одноосного и двухосного нагружения с заданным коэффициентом двухосности нагружения. После определения параметров β_λ , β_0 и γ_λ , γ_0 , характеризующих напряженное состояние у вершины трещины, используется формула (2) для определения скорости роста при двухосном нагружении. Для определения числа циклов нагружения, которое потребуется для прорастания трещины до предельного размера, выполняется интегрирование уравнения (2) при зафиксированных размерах и форме трещины, которые могут быть определены с помощью методов неразрушающего контроля. Предельный размер трещины должен быть установлен нормативно-технической документацией.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Raju I., Newman C. Stress Intensity Factors for Internal and External Surface Crack in Cylindrical Vessels. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1982, vol. 104, pp. 293–298.
- [2] Остосёмин А.А., Заварухин В.Ю. Прочность нефтепровода с поверхностными дефектами. *Проблемы прочности*, 1993, № 12, с. 1–59.
- [3] Красовский А.Я., Орыняк И.В., Тороп В.М. Вязкое разрушение цилиндрических тел с аксиальными трещинами, нагруженных внутренним давлением. *Проблемы прочности*, 1990, № 2, с. 16–20.
- [4] Фокин М.Ф. Оценка прочности труб магистральных трубопроводов с дефектами стенки, ориентированными по окружности трубы, по критерию возникновения течи перед разрушением. *Прикладная механика и технологии машиностроения. Сб. науч. тр.* Нижний Новгород, Изд-во Интелсервис, 2005, с. 69–76.
- [5] Sahu Y., Moulick S. Analysis of Semi-elliptical Crack in a Thick Walled Cylinder Using FEM. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, 2015, vol. IV, pp. 231–235.
- [6] Shahani A., Habibi S. Stress Intensity Factors in a Hollow Cylinder Containing a Circumferential Semielliptical Crack Subjected to Combined Loading. *International Journal of Fatigue*, 2007, vol. 29, pp. 128–140.

- [7] Миронов А.А., Волков В.М. Модель разрушения оболочек с поверхностными трещинами. *Проблемы прочности*, 2006, № 68, с. 45–51.
- [8] Lee S., Kim I., Park Y., Kim J., Park C. Fatigue Crack Growth Characteristics of the Pressure Vessel Steel SA 508 Cl.3 in Various Environments. *Journal of the Korean Nuclear Society*, 2001, vol. 33, no. 5, pp. 526–538.
- [9] Ni K., Hu P. Three-dimensional Finite Element Modeling of Surface Crack on Titanium tubes. *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference*, Chicago, 10–13 August, 2009, pp. 10–13.
- [10] Terfas O., Alaktiwi A. Ductile Crack Grows in Surface Cracked Pressure Vessels. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 2013, vol. 7, no. 1, pp. 46–52.
- [11] Chen Y., Lambert S. Numerical modelling of Ductile Tearing for Semi-elliptical Surface Cracks in Wide Plates. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2005, vol. 82, pp. 417–426.
- [12] Qiao X., He S. Safety Analysis of the Reactor Pressure Vessel of NHR-200. *Technische Mechanik*, 1998, vol. 18, no. 4, pp. 277–284.
- [13] Grabulov V., Sedmak S., Sedmak A., Burzic Z. Structural Integrity Assessment of Pressure Vessels with Defect in Welded Joints. *Scientific Technical Review*, 2007, vol. LVII, no. 3–4, pp. 32–42.
- [14] Sedmak A., Berkovic M., Savovic N. Numerical Analysis of Surface Crack Problems in Pressure Vessels. *Structural Integrity and Life*, 2004, vol. 4, no. 2, pp. 91–100.
- [15] Terfas O. Effect of Geometry on Hydrostatic Stress and J-integral in Surface Cracks in Bending. *International Journal of Mining, Metallurgy & Mechanical Engineering*, 2014, vol. 2, no. 1, pp. 1–5.
- [16] Вансович К.А., Ядров В.И. Усталостные испытания стальных крестообразных образцов с поверхностной трещиной при двухосном нагружении. *Омский научный вестник*, 2012, № 3 (113), с. 117–122.
- [17] Vansovich K., Jatrov V., Beseliya D. The Effect of Stress State Characteristics on the Surface Fatigue Cracks Growth Rate into Account Plastic Deformations. *Procedia Engineering*, 2015, no. 113, pp. 244–253.
- [18] Paris P., Erdogan F. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. *Journal of Basic Engineering*, 1963, vol. 85, pp. 528–534.

Статья поступила в редакцию 28.11.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Вансович К.А. Уруголастическая модель роста усталостных поверхностных трещин в толстостенных конструкциях при двухосном нагружении. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 3.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-3-1596>

Вансович Константин Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» Омского государственного технического университета, специалист в области механики разрушения. Научные интересы: усталостное разрушение толстостенных конструкций с поверхностными трещинами.
e-mail: vansovichka@mail.ru

Elastic-plastic model of fatigue crack growth in the surface of thick-walled structures under biaxial loading

© К.А. Vansovich

Omsk State Technical University, Omsk, 644050, Russia

The model of surface crack growth in thick-walled elements of structures under the biaxial cyclic loading is presented. The dependence of surface crack growth rate on the degree of loading biaxiality is established on the basis of experimental data obtained from the results of testing cruciform specimens. The strain field in the vicinity of cracks is investigated taking into account elastic-plastic material properties using the ANSYS program. Destruction at the fatigue crack tip is represented as a combination of brittle fracture at the crack tip and ductile fracture in the zone of plastic deformation. The formula is proposed for determining the rate of fatigue surface crack growth in view of the brittle and viscous stress parameters at the crack tip. The obtained results allow determining with greater accuracy the remaining service life of structures with a surface crack in the case of biaxial loading.

Keywords: surface crack, biaxial loading, cruciform specimen, finite element method, brittle and plastic zone, crack growth rate

REFERENCES

- [1] Raju I., Newman C. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1982, vol. 104, pp. 293–298.
- [2] Ostsemin A.A., Zavarukhin V.Yu. *Problemy Prochnosti — Strength of Materials*, 1993, no. 12, pp. 1–59.
- [3] Krasovskiy A.Ya., Orynyak I.V., Torop V.M. *Problemy Prochnosti — Strength of Materials*, 1990, no. 2, pp. 16–20.
- [4] Fokin M.F. Otsenka prochnosti trub magistralnykh truboprovodov s defektami stenki, orientirovannymi po okruzhnosti trubyy, po kriteriyu vozniknoveniya techy pered razrusheniem [Assessing pipe strength of long-distance pipeline with wall defects oriented along the circumference of the pipe on the criterion of the occurrence of a leak before destruction]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnologii mashinostroeniya. Sbornik nauchnykh trudov* [Applied Mechanics and Mechanical Engineering. Collected scientific works]. Nizhniy Novgorod, Intelservis Publ., 2005, pp. 69–76.
- [5] Sahu Y., Moulick S. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, 2015, vol. 4, pp. 231–235.
- [6] Shahani A., Habibi S. *International Journal of Fatigue*, 2007, vol. 29, pp. 128–140.
- [7] Mironov A.A., Volkov V.M. *Problemy Prochnosti — Strength of Materials*, 2006, no. 68, pp. 45–51.
- [8] Lee S., Kim I., Park Y., Kim J., Park C. *Journal of the Korean Nuclear Society*, 2001, vol. 33, no. 5, pp. 526–538.
- [9] Ni K., Hu P. Three-dimensional Finite Element Modeling of Surface Crack on Titanium tubes. *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference*, Chicago, August 10–13, 2009, pp. 10–13.
- [10] Terfas O., Alaktiwi A. Ductile Crack Grows in Surface Cracked Pressure Vessels. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 2013, vol. 7, no. 1, pp. 46–52.

- [11] Chen Y., Lambert S. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2005, vol. 82, pp. 417–426.
- [12] Qiao X., He S. *Technische Mechanik*, 1998, vol. 18, no. 4, pp. 277–284.
- [13] Grabulov V., Sedmak S., Sedmak A. *Scientific Technical Review*, 2007, vol. 57, no. 3–4, pp. 32–42.
- [14] Sedmak A., Berkovic M., Savovic N. *Structural Integrity and Life*, 2004, vol. 4, no. 2, pp. 91–100.
- [15] Terfas O. *International Journal of Mining, Metallurgy and Mechanical Engineering*, 2014, vol. 2, no. 1, pp. 1–5.
- [16] Vansovich K.A., Jadrov V.I. *Omskiy nauchnyy vestnik — Omsk Scientific Bulletin*, 2012, no. 3 (113), pp. 117–122.
- [17] Vansovich K., Jadrov V., Beseliya D. *Procedia Engineering*, 2015, no. 113, pp. 244–253.
- [18] Paris P., Erdogan F. *Journal of Basic Engineering*, 1963, vol. 85, pp. 528–534.

Vansovich K.A. (b. 1953) graduated from Omsk Polytechnic Institute in 1975. Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Oil and Gas Business, Standardization and Metrology, Omsk State Technical University. Research interests: fatigue fracture of thick-walled structures with surface cracks. e-mail: vansovichka@mail.ru