

УДК 621.431

С.С. Гутыря, профессор, д-р техн. наук,**Ю.М. Хомяк, доцент, канд. техн. наук,****Ён Ариза де Мигель, аспирант, магистр***Одесский национальный политехнический университет**пр-т Шевченко, 1, Одесса, Украина, 65044**E-mail: sergut@bk.ru***НОМИНАЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ТРУБЧАТЫХ ОСЯХ
ПРИ РАЗВИТИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН**

Разработана аналитическая методика расчета эволюции номинальных (без учета концентрации) напряжений в точках фронта растущей усталостной сегментной трещины для трубчатой оси при изгибе с вращением. Результаты исследований могут применяться для расчетов остаточного ресурса осей в составе металлургического оборудования, ж/д и колесного транспорта.

Ключевые слова: *многоцикловая усталость, кинетика поверхностной трещины, изгиб с вращением трубчатой оси.*

Введение. Достоверность прогноза остаточного ресурса многих деталей машин определяется точностью модели разрушающего процесса многоциклового усталости, связанного с кинетикой поверхностных трещин. Адекватность той или иной из известных гипотез накопления повреждений [1–3] зависит от распределения номинальных напряжений σ_n вдоль линии фронта трещины. При наличии концентраторов напряжений переход от σ_n к действительным амплитудным напряжениям σ_a выполняется умножением величины σ_n на эффективный коэффициент концентрации напряжений K_σ . Номинальные напряжения σ_a при изгибе сплошных и трубчатых цилиндрических осей в различных точках фронта трещины неодинаковы.

Для характеристики направления распространения фронта трещины по величине σ_a рекомендовано использовать понятие локального теоретического концентратора напряжений [4]. При определении остаточной долговечности методами механики разрушения с применением зависимости П. Пэриса также необходимо располагать данными о напряженном состоянии детали вдоль траектории роста трещины [1, 2, 5].

В данной работе применительно к изгибу с вращением цилиндрических трубчатых осей, ослабленных усталостной трещиной, исследовано распределение циклических напряжений вдоль фронта поверхностной трещины, которое при определенных условиях может влиять на скорость ее развития [6].

Постановка задачи. Рассматривается поперечное сечение трубчатой оси, ослабленной плоской поверхностной трещиной в форме сегмента (рисунок 1). Фронт трещины не пересекает внутреннюю границу оси. Соответственно $\varphi < \varphi_b$, где φ – половина полярного угла, характеризующего хорду сегмента; $\varphi_b = \arccos k_h$ – предельное (граничное) значение угла φ ; D и d – соответственно наружный и внутренний диаметры цилиндрической оси; $k_h = d/D$ – коэффициент пустотелости.

Ранее аналогичное исследование выполнено на основе расчетной схемы для плоского изгиба оси, у которой фронт трещины симметричен относительно силовой плоскости [4]. При этом расчет проводится по нормальным напряжениям (чистый изгиб). Вращению оси с поверхностной трещиной относительно неподвижной силовой плоскости соответствует схема косоугольного изгиба, при этом симметрия деформаций и номинальных напряжений нарушается.

Целью работы является получение и исследование аналитических выражений для номинальных напряжений в локальных точках фронта трещины АВ при изгибе с вращением.

Решение. Определяются геометрические характеристики составного поперечного сечения. Площадь кольца 1, ограниченная окружностями диаметров d и D , равна

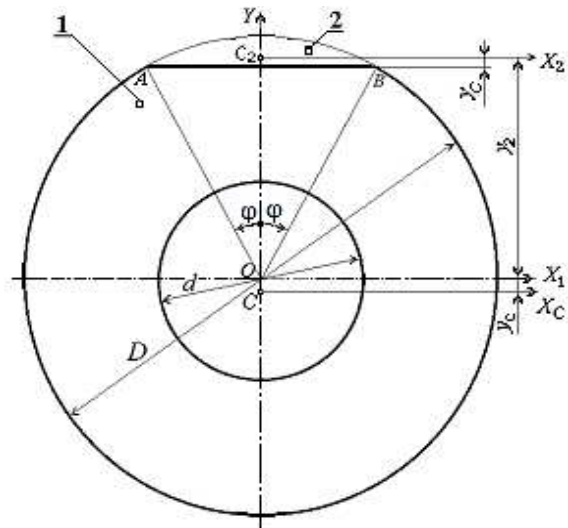


Рисунок 1 – Расчетная схема сечения трубчатой оси с поверхностной трещиной:

1 – кольцевая область; 2 – сегмент

$$F_1 = \frac{\pi D^2}{4} (1 - k_h^2), \quad (1)$$

площадь сегмента 2

$$F_2 = D^2 A_{\varphi 1} / 8, \quad (2)$$

где $A_{\varphi 1} = 2\varphi - \sin 2\varphi$.

Ордината центра тяжести сегмента C_2 [7]

$$y_2 = \frac{2D \sin^3 \varphi}{3A_{\varphi 1}}. \quad (3)$$

Координаты центра тяжести C составного сечения

$$x_C = 0; \quad y_C = -\frac{2}{3} \cdot \frac{D \sin^3 \varphi}{2\pi(1 - k_h^2) - (2\varphi - \sin 2\varphi)}. \quad (4)$$

Осевые моменты инерции кольца 1 относительно его центральных осей OX_1 и OY равны

$$J_{x1} = J_{y1} = \frac{\pi D^4}{64} (1 - k_h^4). \quad (5)$$

Осевой момент инерции сегмента 2 относительно его центральной оси C_2X_2

$$J_{xC2} = \frac{D^4}{256} \left(A_{\varphi 2} - \frac{128}{9} \cdot \frac{\sin^6 \varphi}{A_{\varphi 1}} \right), \quad (6)$$

где $A_{\varphi 2} = 4\varphi - \sin 4\varphi$.

Следует отметить, что приведенное в справочнике [7] выражение (6) для центрального момента инерции сегмента, в действительности соответствует моменту инерции сегмента относительно оси, совпадающей с его основанием AB .

Осевой момент инерции сегмента 2 относительно центральной оси OY равен

$$J_{y2} = \frac{D^4}{128} \left(A_{\varphi 1} - \frac{4}{3} \cos \varphi \sin^3 \varphi \right). \quad (7)$$

Осевые моменты инерции составной фигуры относительно ее главных центральных осей $X_c C Y$ определяются формулами $J_{xC} = J_{xC1} - J_{xC2}$, $J_y = J_{y1} - J_{y2}$. Используя приведенные выше выражения (1) – (7) для геометрических характеристик сечения, главные центральные моменты представлены в виде

$$J_{xC} = k_x J_{x1}, \quad J_y = k_y J_{y1}. \quad (8)$$

Относительные характеристики осевых моментов инерции определены безразмерными коэффициентами

$$k_x = 1 - \frac{A_{\varphi 2}}{4\pi(1 - k_h^4)} - \frac{32}{9\pi(1 - k_h^4)} \cdot \frac{\sin^6 \varphi}{2\pi(1 - k_h^2) - A_{\varphi 1}}; \quad k_y = 1 - \frac{1}{2\pi(1 - k_h^4)} \cdot \left(A_{\varphi 1} - \frac{4}{3} \cos \varphi \cdot \sin^3 \varphi \right), \quad (9)$$

которые характеризуют изменение главных центральных моментов инерции ослабленного поперечного сечения оси по сравнению с величиной их исходных значений при развитии поверхностной трещины (рисунок 2).

Графики построены для диапазона применяемых на практике значений коэффициента пустотелости k_h . Отметим, что для углов $2\varphi < 40^\circ$, определяющих длину фронта трещины, уменьшение момента инерции составляет примерно 5% при высоте сегментной трещины порядка 6% от величины внешнего радиуса оси. Это уменьшение более существенно для осей с большим коэффициентом пустотелости, поэтому живучесть осей с малой толщиной стенки, ослабленных поверхностными трещинами, невысока. Для характеристики изменения максимальных напряжений вводится отношение

$$\bar{\sigma}(\varphi, k_h) = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{0\max}} = \left[\frac{4}{3} \cdot \frac{\sin^3 \varphi}{2\pi(1 - k_h^2) - A_{\varphi 1}} + \cos \varphi \right] / k_x, \quad (10)$$

где σ_{\max} и $\sigma_{0\max}$ – максимальные напряжения соответственно для ослабленной и неповрежденной оси в характерных точках линии фронта трещины.

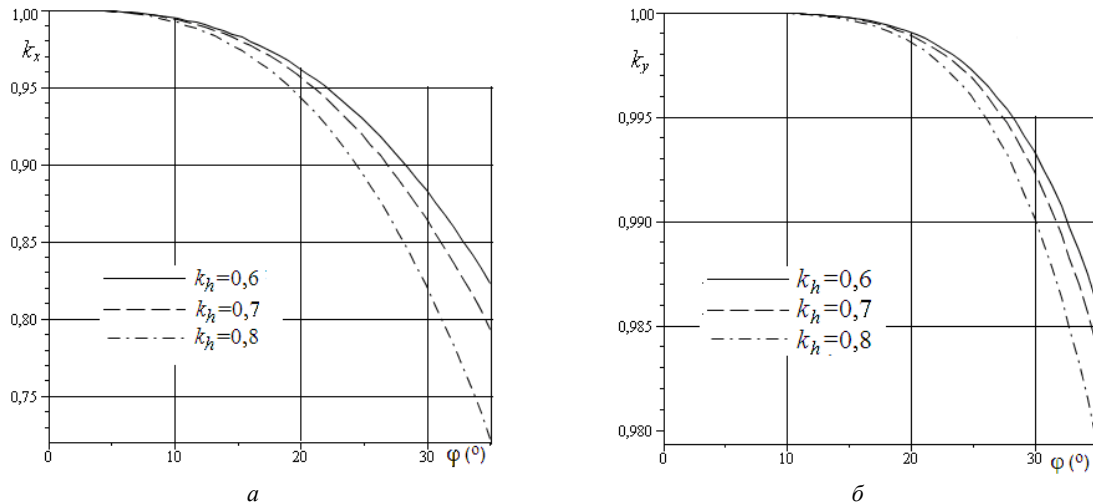


Рисунок 2 – Графики изменения коэффициентов осевых моментов инерции поперечного сечения трубчатых осей при развитии поверхностной трещины:
a – относительно оси абсцисс; *б* – относительно оси ординат

Графики функции (10) указывают на характерную особенность максимальных напряжений для осей с трещиной сегментной формы при изгибе – момент сопротивления поперечного сечения возрастает, несмотря на уменьшение момента инерции J_{xc} (см. рисунок 2, *a*), что приводит в итоге к снижению напряжений (рисунок 3). Этот эффект ослабляется по мере увеличения коэффициента пустотелости k_h . Установленная особенность является одной из возможных причин снижения скорости распространения неглубоких усталостных трещин, что в известных исследованиях не учитывается [8]. Наибольшее снижение максимальных изгибных напряжений (на 1,5 %) наблюдается для сплошной оси с углом сегментной трещины $2\varphi \approx 32^\circ$. Аналогичный эффект описан акад. Н.М.Беляевым для оси кругового сечения, ослабленного двумя сегментными лысками, максимально удаленными от нейтральной оси [9].

При изгибе с вращением происходит периодическое смыкание и размыкание берегов трещины (рисунок 4). При переходе трещины в область, где ее берега смыкаются (для рассмотренной схемы в нижних квадрантах) моменты инерции сечения возрастают до величин (5), соответствующих неповрежденной оси. Анализ кинетики этого процесса показывает, что существуют области угла поворота γ , в которых номинальные напряжения в разных точках линии фронта трещины существенно различны. В верхнем положении, при значении $\gamma=0$, во всех точках фронта сегментной трещины напряжения одинаковы и определяются формулой (10).

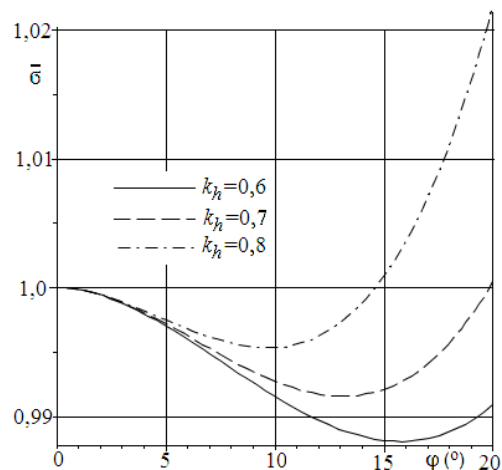


Рисунок 3 – Графики изменения уровня максимальных напряжений вдоль фронта усталостной трещины

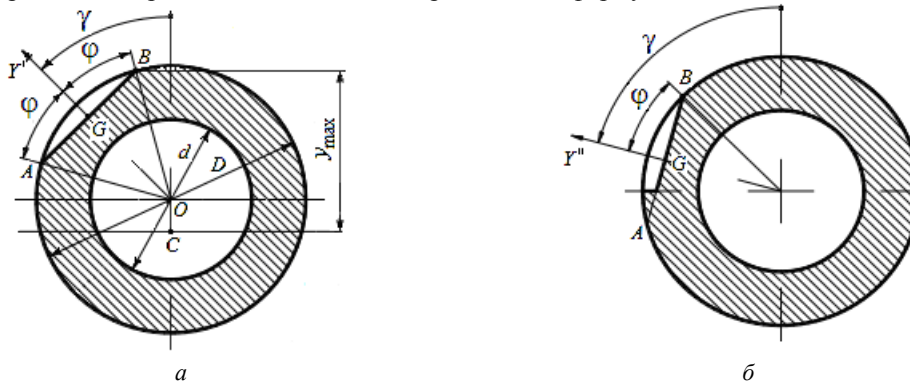


Рисунок 4 – Расчетные схемы при изгибе с вращением и повороте оси:
a – трещина в зоне растяжения; *б* – часть трещины в зоне сжатия, берега трещины смыкаются

При вращении оси (рисунок 4, а) точка *B* проходит через крайнее верхнее положение, в ее зоне напряжения возрастают, тогда как в зонах точек *A* и *G* они убывают. После перехода через нижние квадранты – наоборот, точка *A* приходит в верхнее положение, где расчетные напряжения принимают максимальное значение. Например, при $\varphi = 15^\circ$ максимальные напряжения в точках *A* и *B* превышают напряжения в точке *G* примерно на 6 %, а при $\varphi = 30^\circ$ это превышение достигает уже 25 %. Следовательно, чем длиннее будет линия фронта, тем большим будет различие напряжений в центре и на флангах трещины. Таким образом, в средней зоне фронта трещины номинальные напряжения всегда ниже, чем на флангах. Из анализа кинетики трещины (рисунок 5) следует также, что если возникшая усталостная трещина имеет выпуклую (к центру) линию фронта, то в процессе циклического нагружения скорость перемещения на флангах будет выше, чем в центре.

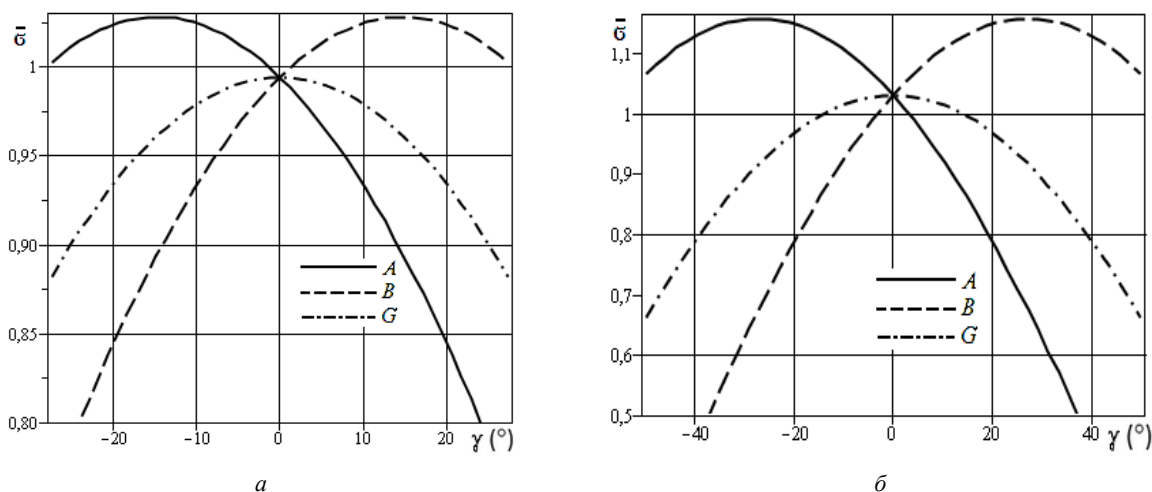


Рисунок 5 – Характерные функции кинетики напряжений в точках фронта сегментной трещины на поверхности трубчатой оси при изгибе с вращением ($k_h=0,6$): а – $\varphi=15^\circ$; б – $\varphi=30^\circ$

При этом выпуклая линия фронта выпрямляется и постепенно приобретает вогнутую форму. В процессе развития трещины и увеличения угла φ вращение оси приводит к все более существенному возрастанию максимальных напряжений на флангах трещины.

Выводы

1. Получены аналитические выражения для номинальных (без учета концентрации) напряжений в точках фронта усталостной сегментной трещины на поверхности трубчатой оси при изгибе с вращением.
2. Установлена характерная особенность максимума циклических напряжений для осей с трещиной сегментной формы при изгибе – уменьшение момента инерции J_{xc} при одновременном увеличении момента сопротивления ослабленного поперечного сечения приводит в итоге к снижению максимума напряжений.
3. Данная особенность представляется одной из причин снижения скорости распространения неглубоких усталостных трещин.
4. Анализ кинетики поверхностной усталостной трещины подтверждает известный механизм изменения формы линии фронта: в процессе циклического нагружения скорость перемещения на флангах возрастает интенсивнее, чем в центре. В результате изначально выпуклая линия фронта выпрямляется и постепенно приобретает вогнутую форму.

Библиографический список использованной литературы

1. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение / Дж. Коллинз. — М.: Мир, 1984. — 624 с.
2. Avilés R. Análisis de fatiga en máquinas / R. Avilés. — Madrid: Editorial Paraninfo, 2005. — 464 p.
3. Корнилова А.В. Определение общей долговечности и остаточного ресурса объекта по критерию многоциклового усталости / А.В. Корнилова // Безопасность труда в промышленности. — 2008. — № 6. — С. 47–51.
4. Кольцун Ю.И. Механика концентрации напряжений в окрестности фронта нераспространяющейся усталостной трещины / Ю.И. Кольцун // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. — СамГТУ, Самара. 2004. — Вып. 30. — С. 41–54.

5. Гринь Е.А. Метод определения остаточной долговечности конструкций на стадии развития трещины по результатам ее контроля / Е.А. Гринь // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2010. — № 2 (76). — С. 43–47.

6. Gutyrza S. Speed-up determination of endurance limit for the revolved hollow axes / S. Gutyrza, Ju. Khomiak, D. Peluhno // MOTROL: Motoryzation and power industry in agriculture. — Polska, Lublin, 2008. — Vol. 10A. — P. 145–149.

7. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. — 2-е изд. — К.: Наук. думка, 1988. — 736 с.

8. Кудрявцев, П.И. Нераспространяющиеся усталостные трещины / П.И. Кудрявцев. — М.: Машиностроение, 1982. — 174 с.

9. Беляев Н.М. Сопротивление материалов / Н.М. Беляев. — М.: Наука, 1976. — 608 с.

Поступила в редакцию 27.05.2013 г.

Гутиря С.С., Хомяк Ю.М., Аріза де Мігель Й. Номінальні напруження в трубчастих осях при розвитку поверхневих втомних тріщин

Розроблено аналітичну методику розрахунку еволюції номінальних (без урахування концентрації) напружень в точках фронту втомної сегментної тріщини, що зростає, для трубчастої осі при згинанні з обертанням. результати можуть бути застосовані для розрахунків залишкового ресурсу осей у складі металургійного обладнання, залізничного та колісного транспорту.

Ключові слова: багатоциклова втома, кінетика поверхневої тріщини, згинання з обертанням трубчастої осі.

Gutyrya S.S., Homiak Yu.M., Ariza de Miguel J. Rated tensions in hollow axes when superficial fatigue cracks emerge

The analytical method of calculation of evolution nominal tensions (without concentration) in points of the front of a growing fatigue segment crack for a hollow axis at a bend with rotation is developed. Results of researches can be applied to calculations of a residual resource of axes as a part of the metallurgical equipment, railway and wheel transport.

Keywords: multi-cycle fatigue, kinetics of a superficial crack, bend with rotation of a hollow axis.