

УДК 539.3

К ОЦЕНКЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИНКУБАЦИОННОЙ СТАДИИ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В ТОНКИХ ИЗОТРОПНЫХ ПЛАСТИНАХ С КРУГОВЫМ ОТВЕРСТИЕМ ПРИ ОДНООСНОМ АСИММЕТРИЧНОМ РАСТЯЖЕНИИ-СЖАТИИ

Голуб В.П., Плащинская А.В.

Институт механики им. С.П. Тимошенко НАН Украины, Киев, Украина

Анотация. Рассмотрена задача о длительности инкубационного периода усталостной трещины нормального отрыва в тонкой изотропной пластине конечных размеров с центральным гладким круговым отверстием при одноосном симметричном и асимметричном растяжении-сжатии. Решение построено аналитически на основе двухстадийной модели роста усталостных трещин, объединяющей силовую концепцию нелинейной механики трещин и концепцию механики непрерывной поврежденности. Асимметричное циклическое нагружение сводится к эквивалентному по числу циклов разрушения симметричному циклу нагружения. Определена длительность инкубационной стадии роста усталостной трещины в пластинах из алюминиевых сплавов 2024-T3 и 7075-T6 в зависимости от размера отверстий и приложенного циклического нагружения. Результаты расчетов апробированы экспериментально.

Ключевые слова: усталостное разрушение, инкубационный период, усталостная трещина, тонкие изотропные пластины, круговое отверстие, асимметричное циклическое нагружение.

Введение. Построение моделей усталостного разрушения и решение задач распространения усталостных трещин в твердых телах при многоцикловом нагружении является актуальной проблемой механики хрупкого разрушения. Одним из перспективных путей построения теоретических моделей роста усталостных трещин в упругих телах представляется подход, объединяющий энергетическую концепцию механики трещин и концепцию механики непрерывной поврежденности [1, 2]. Идея выбора процесса накопления повреждений на фронте трещины в качестве основной движущей силы для растущей усталостной трещины, сформулированная в [1, 2], получила дальнейшее развитие в работах [3-5]. В этих работах построена двухстадийная модель роста усталостных трещин в тонких изотропных бесконечных пластинах при одноосном растяжении-сжатии, а в работах [6, 7] получены разрешающие соотношения модели для тонких пластин конечных размеров. Модель апробирована экспериментально на задачах расчета кинетики роста усталостных трещин в тонких бесконечных и конечных пластинах из алюминиевых сплавов при одноосном симметричном и асимметричном растяжении-сжатии.

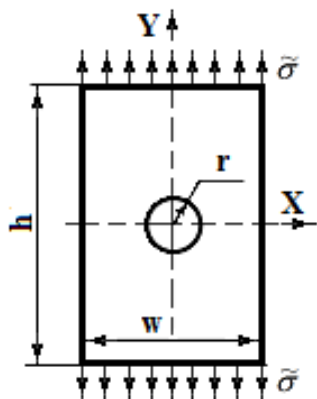


Рис. 1.

В настоящей работе рассматриваются задачи о длительности инкубационной стадии роста усталостной трещины в тонких изотропных пластинах с гладкими концентраторами напряжений в виде центрального кругового отверстия. Актуальность и необходимость решения такого класса задач определяет тот факт, что период накопления усталостных повреждений и зарождение микротрещин в материале элементов конструкций может составлять около 70% их долговечности.

1. Постановка задачи. Рассматривается изотропная прямоугольная пластина шириной w и высотой h с центральным гладким круговым отверстием (рис. 1) радиуса r . Пластина находится в условиях одноосного асимметричного многоциклового растяжения-сжатия

$$\tilde{\sigma} = \sigma_m + \sigma_a g(ft) \quad (1.1)$$

где σ_a – амплитудное, σ_m – среднее значения напряжений асимметричного цикла; $g(ft)$ – периодическая функция закона нагружения; f, t – частота и физическое время нагружения; $n = ft$ – число циклов нагружения.

Циклические напряжения $\tilde{\sigma}$ распределены равномерно по краям пластин перпендикулярно оси x . Контур кругового отверстия свободен от нагрузок.

В течение инкубационной стадии в пластинах с гладкими концентраторами напряжений происходит накопление усталостной поврежденности и зарождаются макротрещины некоторой исходной длины.

Длительность инкубационной стадии определяем на основе метода, изложенного в работах [3, 7]. Совместное рассмотрение силовой концепции механики трещин и концепции механики непрерывной поврежденности сводит задачу к решению эволюционного уравнения накопления усталостных повреждений

$$\frac{d\omega(x, n)}{dn} = D \left[\frac{(\Delta\sigma_{yy}(x, n))}{1 - \omega(x, n)} \right]^q \quad (1.2)$$

с начальными условиями в точке x_*

$$\omega(x_*, n) = \begin{cases} 0 & n = 0 \\ 1 & n = n_* \end{cases}, \quad (1.3)$$

Интегрируя (1.2) с начальными условиями (1.3) и с учетом двухстадийности роста усталостной трещины, запишем уравнение движения усталостной трещины

$$\int_0^1 [1 - \omega(x_*, n)]^q d\omega = (1 + q)D \left\{ \int_0^{n_*} [(\Delta\sigma_{yy})(x_*, \tau)]^q d\tau + \int_{n_*}^n [(\Delta\sigma_{yy})(x_*, \tau)]^q d\tau \right\}, \quad (1.4)$$

на основании которого получаем выражение для оценки длительности инкубационной стадии в пластинах с гладкими концентраторами напряжений

$$n_* = \frac{1}{(1 + q)D(\sigma_{yy})_{\max}^q}. \quad (1.5)$$

Максимальное нормальное напряжение $(\sigma_{yy})_{\max}$ у контура отверстия вдоль оси x с учетом коэффициента концентрации напряжений, согласно работы [8], определяется соотношением

$$(\sigma_{yy})_{\max} = \left[3 - 3,14 \left(\frac{2r}{w} \right) + 3,667 \left(\frac{2r}{w} \right)^2 - 1,527 \left(\frac{2r}{w} \right)^3 \right] \left(1 - \frac{2r}{w} \right)^{-1} \sigma_{a,eqv}, \quad (1.6)$$

где $\sigma_{a,eqv}$ – амплитуда эквивалентных циклических напряжений, позволяющих асимметричный цикл свести к эквивалентному по числу циклов до разрушения симметричному циклу [9]; n_* – длительность инкубационной стадии; q, D – экспериментально определяемые коэффициенты, характеризующие интенсивность накопления усталостных повреждений.

Выражение (1.5) для прямоугольной пластины с гладким круговым отверстием при одноосном асимметричном циклическом растяжении-сжатии преобразуется к виду

$$n_* = \frac{\left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B} \right)^2 + \frac{1}{24} \left(\frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B} \right)^4 \right]^{n_* q}}{(1 + q)D \left\{ \left[3 - 3,14 \left(\frac{2r}{w} \right) + 3,667 \left(\frac{2r}{w} \right)^2 - 1,527 \left(\frac{2r}{w} \right)^3 \right] \sigma_a \right\}^q} \left(1 - \frac{2r}{w} \right)^q, \quad (1.7)$$

2. Оценка длительности инкубационной стадии. Определим длительность инкубационного периода в тонких пластинах с центральным круговым отверстием из алюминиевых сплавов 2024-T3 и 7075-T6 при одноосном асимметричном многоцикловом растяжении-сжатии. Характеристики механических свойств материалов определены на основании экспериментальных данных [10] и приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики механических свойств в пластинах из алюминиевых сплавов

Материал	σ_Y , МПа	D , (МПа ^q ·цикл.) ⁻¹	q	η
Сплав 2024-T3	353	$7,45 \cdot 10^{-26}$	8,28	2,37
Сплав 7075-T6	523	$3,33 \cdot 10^{-29}$	9,23	3,57

На рис. 2 представлена зависимость длительности инкубационной стадии n_* от величины $2r/w$ отношения диаметра отверстия к ширине пластины, а на рис. 3

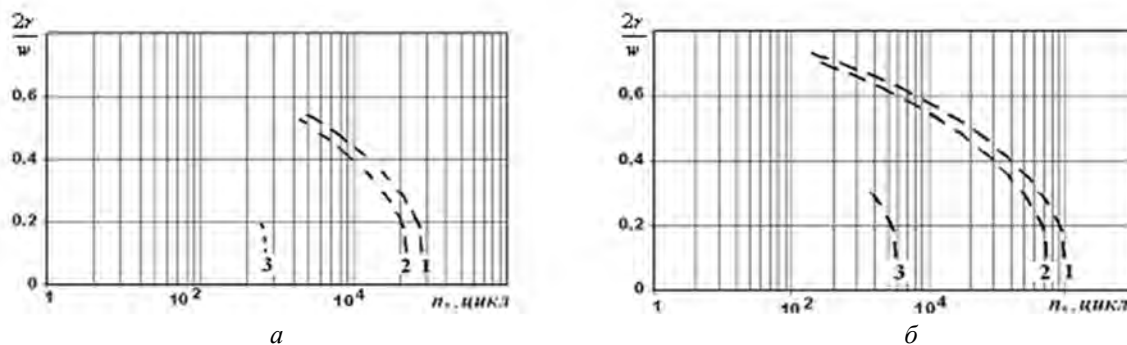


Рис. 2. Зависимость длительности инкубационной стадии n_* от величины $2r/w$ отношения диаметра отверстия к ширине пластины в пластинах из алюминиевых сплавов 2024-T3 (а) и 7075-T6 (б) при $R = -1$: $\sigma_m = 0$; $\sigma_a = 69$ МПа (1); $R = 0$: $\sigma_m = \sigma_a = 69$ МПа (2); $R = 0,5$: $\sigma_m = 207$; $\sigma_a = 69$ МПа (3)

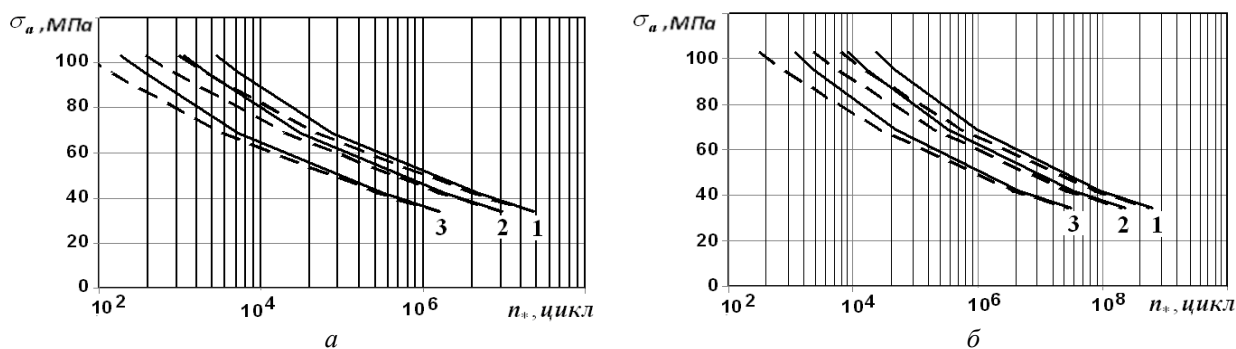


Рис.3. Зависимость длительности инкубационной стадии n_* от амплитуды циклических напряжений σ_a в пластинах из алюминиевых сплавов 2024-T3 (а) и 7075-T6 (б) при $R = -1$: $\sigma_m = 0$ (—) и $R = 0$: $\sigma_m = \sigma_a$ (- -) и $2r/w = 0,16$ (1); 0,3 (2); 0,50 (3)

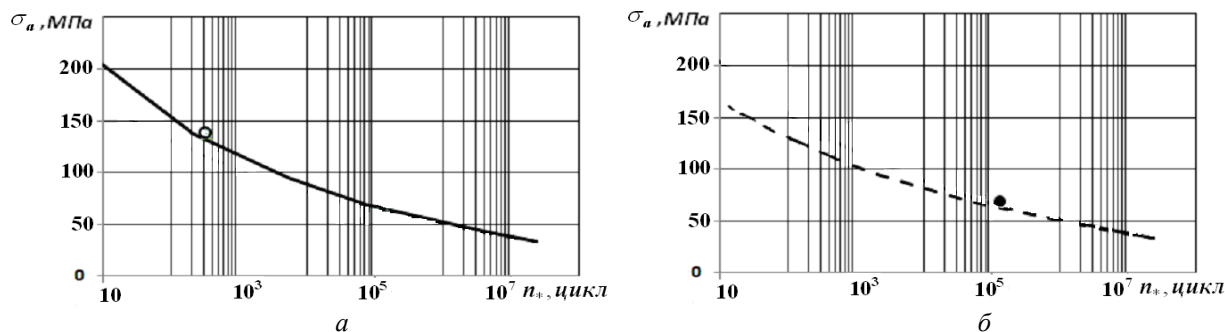


Рис. 4 Зависимость инкубационной стадии от амплитуды циклических напряжений для сплава 2024-T3 для соотношения $2r/w = 0,16$ при (а) $\sigma_a = 138$ МПа, $R = -1$ (—)-расчетные данные, (○)-эксперимент); (б) при $\sigma_m = \sigma_a = 69$ МПа, $R = 0$ (---)-расчетные данные, (●)-эксперимент);

зависимость длительности инкубационной стадии от амплитуды циклических напряжений σ_a в пластинах из алюминиевых сплавов 2024-T3 и 7075-T6 при одноосном асимметричном растяжении-сжатии по параметру отношения диаметра отверстия $2r$ к ширине пластины w и коэффициента асимметрии R . Как видно из рис. 2 и рис. 3 длительность инкубационной стадии зависит от свойств материала, геометрии концентратора напряжений и приложенного напряжения.

На рис. 4 для сплава 2024-T3 линиями представлены расчетные зависимости длительности инкубационной стадии от амплитуды циклических напряжений σ_a в пластинах из алюминиевого сплава 2024-T3 для соотношения $2r/w = 0,16$. Расчетное значение длительности инкубационного периода при $R = -1$ (—) равно $n_* = 2,15 \cdot 10^2$ циклов, а при $R = 0$ (---) — $n_* = 0,46 \cdot 10^5$ циклов. Точками нанесены экспериментальные данные из работы [12], где при $R = -1$ (○), $\sigma_m = 0$, $\sigma_a = 138$ МПа, инкубационный период составил $n_* = 3,13 \cdot 10^2$ циклов и для $R = 0$ (●) при напряжениях $\sigma_m = \sigma_a = 69$ МПа, $n_* = 1,29 \cdot 10^5$ циклов. Получено, как видно, вполне удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных по числу циклов.

Список литературы

1. Болотин В.В. Уравнения роста усталостных трещин // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1983. – №7. – С. 153-160.
2. Bolotin V.V. A unified approach to damage accumulation and fatigue crack growth // Engineering Fracture Mechanics. – 1985. – Vol. 22, N3, pp. 387-398.
3. Голуб В.П., Плащинская А.В. Модель усталостного разрушения тонких изотропных пластин с трещинами при осевом нагружении // Прикл. механика. – 1994. – Том 30, №7. – С. 53-63.
4. Golub V.P., Panteleyev E.A. Fatigue damage and cyclic life-time of cracked isotropic plates considering two-stage fracture // Fatigue 93. Proc. of the Intern. Cong. on Fatigue: EMAS. – 1993. – Vol. 1, pp. 275-281.
5. Golub V.P. Modelling of fatigue cracks growth in thin plates with stress concentrators // Numerical Methods in Engineering'96. Proc. of the Second ECCOMAS Conference on Numerical Methods in Engineering, 9-13 September 1996. – Paris - New-York: John Wiley & Sons. – 1996, pp. 129-135.
6. Плащинская А.В. Усталостное разрушение тонких пластин с концентраторами напряжений при одноосном асимметричном нагружении // Вісник НТУУ „КПІ”. Серія Машинобудування, Київ, НТУУ-КПІ, 2013, №2 (68). – С.78-83.
7. Голуб В.П., Плащинская А.В. К теории роста усталостных трещин в тонких изотропных пластинах конечных размеров при одноосном растяжении-сжатии // Прикл. механика. – 2018. – Том 54, №2. – С. 79-99.
8. Kirsch E.G. Die theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der festigkeitslehre // Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure. – 1988. – Vol. 42. – P. 797-807.
9. Голуб В.П., Плащинская А.В., Кочеткова Е.С. Усталостное разрушение тонких алюминиевых пластин с трещинами при одноосном асимметричном нагружении // Надежность и долговечность машин и сооружений. Сб. статей. – Вып. 31. – Киев: Изд-во ИПП НАНУ. – 2008. – С. 73-81.
10. Grover H.J., Hyler W.S., Kuhn P., Landers C.B., Hawell F.N. Axial-load fatigue properties of 24S-T and 75S-T aluminum alloys as determined in several laboratories // NASA TN 2928. – 1953. – 64 p.
11. Grews John H., Jr, The role of stress concentrations in structural fatigue //Dissertation submitted to the Graduate Faculty of the Virginia Polytechnic Institute, N69-41185, TMX-61969, May 1969, 155p.