

УДК 539.375

ОБЪЕДИНЕННАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ И РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В КОНЦЕНТРАТОРАХ НАПРЯЖЕНИЙ

В.М. Волков, А.А. Миронов

Нижний Новгород

На основе единого подхода к описанию процесса накопления усталостных повреждений в металлах, использующего представление о деформационном разрыхлении, получены согласованные уравнения, описывающие стадии образования и роста усталостной трещины в циклически поврежденном материале. Переход от стадии образования к стадии роста трещины определяется начальным размером макротрещины, который находится из условия равенства скоростей распространения усталостного разрушения на основе феноменологических моделей образования и роста трещины. Результаты расчета по объединенной модели согласуются с данными эксперимента по развитию разрушения в концентраторе напряжений в условиях малоциклового нагружения.

Введение

Процесс усталостного разрушения элементов конструкций с концентраторами напряжений включает в себя две стадии – образования и роста трещины. Для описания первой стадии усталостного разрушения используются расчетные модели много- и малоциклового усталости (МЦУ). Описание роста усталостной трещины (РУТ) выполняется в рамках расчетных моделей механики разрушения. Границей раздела использования указанных моделей служит начальный размер усталостной трещины. В настоящее время в рамках механики сплошных сред за начальный размер макроскопической трещины предложено принимать:

– протяженность области циклических пластических деформаций или области, в которой размах напряжений превышает удвоенное значение предела усталости металла [1];

– длину трещины, равную ~ 1 мм [2];

– расстояние от вершины концентратора, на котором локальные напряжения контролируют процесс усталости металла [3].

Указанные предложения носят интуитивный и опытный характер и, по мнению авторов приведенных работ, требуют дальнейших исследований.

Определение начального размера трещины не исчерпывает всей проблемы расчета ресурса конструкции, включающего в себя обе стадии усталостного разрушения. Стадии образования и роста трещины не являются независимыми. Развитие усталостной трещины на начальном этапе происходит в циклически поврежденном на первой стадии материале, и, следовательно, модель, описывающая кинетику трещины, должна учитывать данный эффект [4].

Таким образом, объединенная модель усталостного разрушения должна включать в себя:

- модель много- и малоциклового усталости;
- модель докритического роста усталостной трещины в поврежденном материале;
- условие, определяющее начальный размер макротрещины.

Согласование составляющих объединенной модели может быть достигнуто на основе использования единого подхода к описанию процесса накопления усталостных повреждений, в основу которого положено представление о деформационном разрыхлении, обусловленном микро- и макропластическими деформациями [5].

1. Модель усталости металла

В качестве меры повреждения металла при циклическом деформировании используется разрыхление, равное относительной остаточной объемной макро- и микродеформации $\theta = \theta^p + \theta^M$. В концентраторе напряжений на расстоянии x от его вершины величина разрыхления, накапливаемая с числом циклов нагружения N , для линейно упрочняющегося материала (рис. 1) определяется выражением [6]:

$$\theta(x, N) = \theta_0(x) + \theta^p(x, N) + \theta^M(x, N), \quad (1)$$

где $\theta_0 = \theta_0^p(x) = AH\lambda_{\max}^2(x)/2$ – разрыхление в нулевом полуцикле нагружения; $\theta^p(x, N) = \theta^p(x, 1)N^{1-\beta}/(1-\beta)$ – макропластическое разрыхление за N циклов; $\theta^p(x, 1) = AH[2\lambda_{\max}(x) - \Delta_1(x)]\Delta_1(x)$ – макропластическое разрыхление в первом цикле нагружения; $\theta^M(x, N) = C[1 + \sigma_m(x)/\sigma_a(x)]^m \sigma_\Gamma^s(x)N$ – микропластическое разрыхление; $\lambda_{\max}(x)$ – интенсивность макропластических деформаций в нулевом полуцикле нагружения; $\Delta_1(x)$ – ширина петли макропластического гистерезиса в первом цикле нагружения; $\sigma_m(x)$, $\sigma_a(x)$, $\sigma_\Gamma(x) = \sigma_a/\sigma_T$ – среднее, амплитуда и гомологическое напряжения цикла; A, H, C, β, m, s – постоянные материала (A, C – коэффициенты пропорциональности в выражениях для макропластического и микропластического разрыхлений, H – модуль упрочнения материала, β – показатель циклического разупрочнения, m – показатель зависимости θ^M от среднего напряжения, s – показатель кривой А. Велера, ρ – остаточные микронапряжения) [5].

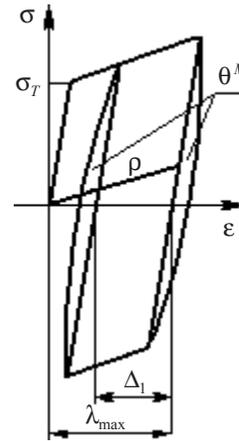


Рис. 1

Критерий разрушения локального объема металла с образованием макро-неплотности записывается в виде

$$\theta(x, N_*) = \theta_*, \quad (2)$$

где $\theta_* = AH\epsilon_f^2/2$ – критическая величина разрыхления; ϵ_f – деформация растяжения при разрушении. При жестком нагружении в вершине концентратора для условий МЦУ $\lambda_{\max} = \Delta_1$, $\theta^M \ll \theta^p$ и критерий (2) запишется в виде:

$$\Delta_1^2 N_*^{1-\beta} = 0,5(1-\beta)(\epsilon_f^2 - \Delta_1^2). \quad (3)$$

2. Модель роста усталостной трещины в поврежденном материале

Дискретное приращение длины трещины l на величину ζ_* после n_* циклов нагружения происходит при выполнении в области вершины трещины $0 < \zeta \leq \zeta_*$

критерия локального разрушения (2), имеющего вид [6]:

$$\theta(\zeta_*, n_*) = \theta_*, \quad (4)$$

где $\theta(\zeta_*, n_*) = \theta_0 + \theta_0^p(\zeta_*) + \theta^p(\zeta_*, n_*)$; причем θ_y – разрыхление, накопленное в результате циклического деформирования в концентраторе напряжений на первой стадии усталостного разрушения, определяемое по зависимости (1) для точки с координатой $x = l + \zeta_*$:

$$\theta_0^p = \frac{AH}{2} \left(\frac{\varepsilon_T}{(\zeta_* + \delta)} \cdot \frac{\pi}{8\sigma_T^2} \right)^2 (K_{\max}^2 - K_{th}^2)^2$$

– макропластическое разрыхление в нулевом полуцикле нагружения [6]; $\theta(\zeta_*, n_*) = \theta^p(\zeta_*, 1)n_*^{1-\beta} / (1 - \beta)$ – макропластическое разрыхление за n_* циклов нагружения;

$$\theta^p(\zeta_*, 1) = 4AH \left(\frac{\varepsilon_T}{(\zeta_* + \delta)} \cdot \frac{\pi}{8\sigma_T^2} \right)^2 \eta (K_{\max}^2 - K_{th}^2)^2 \cos^2 \pi R / 2$$

– разрыхление в первом цикле нагружения; ε_T – деформация на пределе текучести материала; K_{\max} – максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений (КИН) в цикле нагружения; K_{th} – пороговое значение КИН; η – коэффициент отношения размера области циклических пластических деформаций в вершине трещины к размеру монотонной зоны пластических деформаций; δ – малый параметр, определяемый из равенства критического разрыхления при разрушении образца с концентратором напряжений и образца с трещиной при монотонном нагружении;

$$\theta_* = \frac{AH}{2} \varepsilon_f^2 = \frac{AH}{2} \left(\frac{\varepsilon_T}{(\zeta_* + \delta)} \cdot \frac{\pi}{8\sigma_T^2} \right)^2 K_{fc}^4$$

– критическое разрыхление; $R = K_{\min} / K_{\max}$ – коэффициент асимметрии цикла нагружения, K_{fc} – циклическая трещиностойкость металла.

Скорость роста усталостной трещины $v = dl/dn$ в рамках рассматриваемой модели определяется отношением $v = \zeta_*/n_*$ и, с учетом (4), уравнением

$$v = \zeta_* \left\{ (1 - \beta) \frac{\theta_* - \theta_y - \theta_0^p(\zeta_*)}{\theta^p(\zeta_*, 1)} \right\}^{-1/(1-\beta)}. \quad (5)$$

При $\theta_0 = 0, K_{th} \ll K_{fc}, 8\eta \approx 1$ уравнение (5) принимает вид, описывающий три участка диаграммы РУТ:

$$v = \zeta_* \left[\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{K_{fc}^4 - (K_{\max}^2 - K_{th}^2)^2}{(K_{\max}^2 - K_{th}^2)^2 \cos^2 \pi R / 2} \right]^{-\alpha}, \quad (6)$$

где $\alpha = 1/(1 - \beta)$.

3. Условие, определяющее начальный размер макротрещины

На первой стадии усталостного разрушения приращение размеров макронесплошности в вершине концентратора с увеличением числа циклов нагружения

будет определяться координатами точек, в которых последовательно выполняется критерий (2), и характеризоваться скоростью dx/dN . С ростом макронесплошности в ее вершине будет формироваться напряженно-деформированное состояние (НДС), характерное для макротрещины и определяющее скорость роста трещины по уравнению (5). Критерием образования макротрещины является равенство

$$dx/dN = v. \quad (7)$$

Решение уравнения (7) относительно расстояния x дает начальный размер трещины $l_0 = x$.

Для условий жесткого малоциклового нагружения в концентраторе использование уравнения (3) при $\Delta_1(x) \ll \varepsilon_f$ и уравнения (5) при $n_* \ll N_*$ позволяет в рамках модели дискретного приращения длины трещины на величину ζ_* записать уравнение (7) в виде

$$\frac{\zeta_*}{N_*[\Delta_1(x + \zeta_*)] - N_*[\Delta_1(x)]} = \zeta_* \left[\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\varepsilon_f^2 (1 - \Delta_1^2(x + \zeta_*) / \Delta_1^2(x)) - \Pi (K_{\max}^2 - K_{th}^2)^2}{8\eta \Pi (K_{\max}^2 - K_{th}^2)^2 \cos^2 \pi R / 2} \right]^{-\alpha}, \quad (8)$$

где $\Pi = [\pi \varepsilon_T / 8 \sigma_T^2 (\zeta_* + \delta)]^2$.

4. Экспериментальное исследование зарождения трещины в концентраторе напряжений в условиях МЦУ

Для экспериментального исследования процесса зарождения и развития усталостного разрушения принят прямоугольный компактный образец, имеющий в вершине краевого надреза концентратор напряжений в виде круглого отверстия с проточкой. Принятая форма образца позволяет получить протяженную зону циклических пластических деформаций, что облегчает наблюдение за процессом развития усталостного разрушения.

Исследования проводились на стали Ст3. По результатам предварительных механических испытаний, включающих в себя построение диаграммы РУТ с последующей ее аппроксимацией зависимостью (6), получены характеристики материала: $\sigma_T = 225$ МПа, $\sigma_{0,2} = 250$ МПа, $K_{th} = 12$ МПа·м^{0,5}, $K_{fc} = 90$ МПа·м^{0,5}, $\zeta_* = 0,0093$ мм, $\delta = 0,0088$ мм, $\alpha = 0,9$.

Параметры НДС в вершине концентратора, полученные расчетным путем, характеризовались следующими значениями: $\sigma_{\max} = 322$ МПа, $\Delta_1 = 2,24\%$, протяженность зоны циклических пластических деформаций $d_c = 6,5$ мм.

На рис. 2 представлен характер изменения длины трещины, развивающейся от кромки отверстия, в зависимости от числа циклов нагружения. На рис. 3 кривая I характеризует зависимость скорости развития трещины от ее длины. Из полученных данных следует, что после замедленного распространения усталостного разрушения на расстоянии от вершины концентратора $x = 1,1$ мм происходит скачкообразное подрастание трещины и последующее ее ускоренное развитие. Замедление процесса приращения протяженности зоны разрушения в вершине концентратора характерно для МЦУ. В связи с этим за начальный размер макротрещины по данным эксперимента следует принять длину $l_0 = 1,1$ мм.

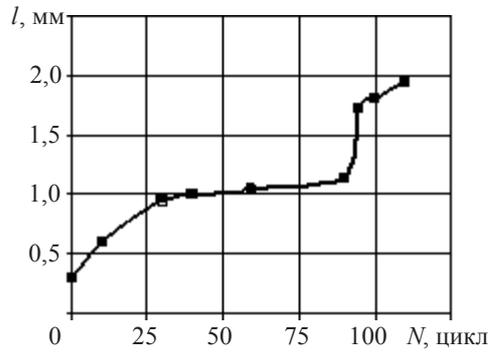


Рис. 2

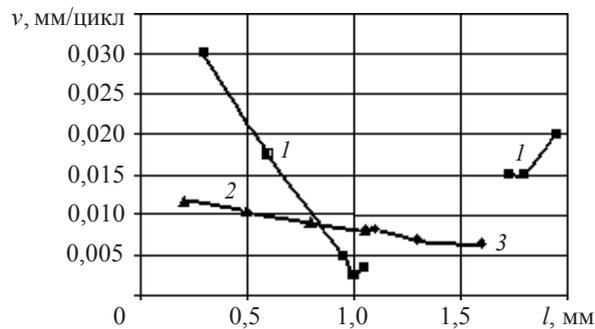


Рис. 3

При использовании построенной модели для описания процесса усталостного разрушения на этапе роста трещины в пределах зоны циклических пластических деформаций d_c , формирующейся в вершине концентратора напряжений, приняты следующие дополнительные гипотезы:

а) в упругой части цикла нагружения в вершине концентратора НДС и в вершине трещины описывается КИН, а пластическая часть цикла приводит к накоплению повреждений по механизму МЦУ;

б) с ростом трещины КИН изменяется по зависимости $K = \chi K_{\Pi} + (1 - \chi) K_{Л}$, где $K_{\Pi} = 1,12 \sigma_{\max} \sqrt{\pi l}$ – значение КИН для условий жесткого нагружения в зоне d_c ; $K_{Л}$ – значение КИН, определяемое в рамках линейной механики разрушения; $\chi = \sqrt{1 - (l/d_c)^2}$ – переходная функция.

Результаты расчета скорости развития усталостного разрушения приведены на рис. 3, где кривая 2 соответствует стадии МЦУ, кривая 3 – стадии РУТ.

Начальный размер трещины, полученный на основе расчетной модели, составляет $l_0 = 1,05$ мм. Значение скорости РУТ для полученной начальной длины трещины составляет 0,008 мм/цикл, что превышает критическое значение скорости РУТ, соответствующее долому образца на кинетической диаграмме РУТ и, следовательно, определяет возможность скачкообразного подрастания трещины.

На основе построенной модели выполнено моделирование процесса усталостного разрушения в пластине с эллиптическим вырезом при нагружении пульсирующим циклом с $\sigma_{\max} = 0,7 \sigma_{0,2}$. Расчеты выполнены для вырезов с различным отношением полуосей, дающим изменение коэффициента концентрации напряжений в пределах от $k_t = 3$ (круглое отверстие) до $k_t = 7$. На рис. 4 представлена зависимость

изменения начального относительного размера усталостной трещины $\bar{l}_0 = l_0 / d_c$ от значения коэффициента концентрации напряжений. На рис. 5 приведены графики изменения отношения скорости РУТ, рассчитанные по предложенной модели, к значению скорости, определенному в рамках линейной механики разрушения (ЛМР), в зависимости от относительной длины трещины. Номера кривых на рис. 5 соответствуют значениям коэффициентов концентрации напряжений.

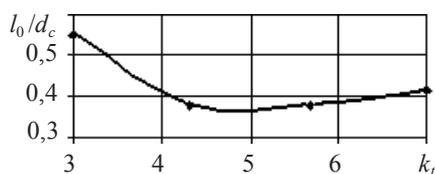


Рис. 4

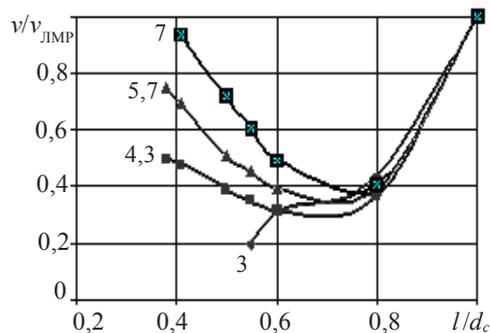


Рис. 5

Из полученных результатов следует, что в расчетной практике для консервативной оценки ресурса работы конструкции в качестве начального размера макротрещины может быть принято значение $l_0 = d_c/2$, а описание кинетики роста трещины может быть выполнено в рамках ЛМР.

Заключение

Предложенная объединенная модель усталостного разрушения в концентраторах напряжений описывает экспериментально наблюдаемые закономерности: замедленный характер разрушения на первой стадии; возможность скачкообразного подрастания макротрещины.

Модель позволяет: определить начальный размер усталостной макротрещины; описать процесс развития макротрещины в поврежденном материале; выполнить расчет ресурса конструкции, включающий в себя стадии образования и роста трещины.

Литература

1. Петин, С.В. Основы инженерных расчетов усталости судовых конструкций / С.В. Петин. – Л.: Судостроение, 1990.
2. Казаков, Д.А. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций / Д.А. Казаков, С.А. Капустин, Ю.Г. Коротких. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 1999.
3. Панасюк, В.В. Зарождение усталостных трещин у концентраторов напряжений / В.В. Панасюк, О.П. Осташ, Е.М. Костык // ФХММ. – 1985. – №6. – С. 3–10.
4. Бойцов, Г.В. О взаимосвязи стадии зарождения и кинетики развития усталостного разрушения / Г.В. Бойцов // Механика разрушения, надежность и техническая диагностика тонкостенных конструкций: Межвуз. сб. / Н. Новгород: Изд-во НГТУ, 1996. – С. 9–16.
5. Волков, В.М. Разрыхление металлов и разрушение конструкций машин / В.М. Волков // Надежность и ресурс в машиностроении: Вестник ВГАВТ / Н. Новгород. – 2004. – Вып. 4. – С. 50–69.
6. Волков, В.М. Прочность корабля / В.М. Волков. – Н. Новгород: Изд-во НГТУ, 1994.

[17.05.2005]