

05.1  
©1995

## К ВОПРОСУ О СВЯЗИ МИКРО- И МАКРОПАРАМЕТРОВ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ

*Т.Б.Петерсен*

Последнее время в механике разрушения активно развивается направление, связанное с исследованием начальной стадии усталостного разрушения в металлах. Эта стадия обычно описывается с помощью эмпирических  $S - N$  кривых усталости, характеризующих зависимость числа циклов, необходимых для зарождения макротрещины определенной длины, от величины приложенного напряжения. В то же время многочисленные исследования (см., например, [1-5]) позволили установить, что макротрещина формируется в результате необратимых структурных процессов, связанных с зарождением, развитием и накоплением малых трещин. В связи с этим возникает проблема физической интерпретации кривых усталости, определения параметров множественной повреждаемости и прогнозирования долговечности материала в терминах микромеханических параметров разрушения.

В работе [6] для анализа начальной стадии разрушения был предпринят статистический подход, позволяющий учитывать как неоднозначность роста индивидуальных микротрещин, так и закономерности развития ансамбля трещин в целом. В настоящей работе в кратком виде сформулированы основные положения статистической модели, приведены соотношения, описывающие взаимосвязь различных параметров микроразрушения, даны законы распределения параметров, введена характеристика множественной повреждаемости, позволяющая практически оценивать степень повреждаемости материала в процессе нагружения.

Положения модели основаны на наблюдаемых закономерностях зарождения и накопления микротрещин при усталостном нагружении: микротрещины зарождаются постепенно, в течение всей начальной стадии разрушения с постоянной скоростью зарождения [1,7]. С момента зарождения микротрещин и до достижения условий, при которых начинается их взаимодействие и слияние, микротрещины развиваются независимо [8]. Это служит основанием для предположения о том, что на начальной стадии накопление

происходит в соответствии с пуассоновским законом распределения, определяющим вероятность  $P(n/T)$  возникновения  $n$  трещин через время  $T$ :

$$P(n, T) = [\exp(-\lambda T)(\lambda T)]/n!, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — скорость зарождения трещин.

Закон роста единичной 1-й микротрещины в соответствии с результатами работ [1-3] представляется в виде

$$da/dt = C \Delta \varepsilon^m a, \quad (2)$$

где  $\Delta \varepsilon$  — размах сдвиговой деформации, определяемый по петле гистерезиса,  $C$  и  $m$  — константы материала.

Размер 1-й трещины через интервал времени  $T$  получается путем интегрирования выражения (2)

$$a_1 = a_0 \exp(C \Delta \varepsilon^m (T - t_1)). \quad (3)$$

Здесь  $a_0$  — начальный размер трещины, который обычно полагают равным 3 мкм, что соответствует среднему размеру поверхностных дефектов при тщательной обработке поверхности материала [2,3],  $t_1$  — момент зарождения 1-й трещины.

Ниже приведены соотношения, описывающие средние значения параметров и распределения, характеризующие систему трещин. Следует отметить, что все рассматриваемые параметры можно оценить экспериментально путем использования методов и средств электронной микроскопии.

Учитывая равномерность распределения периодов роста трещин с вероятностью  $P(T - t_1) = 1/T$ , что является следствием пуассоновского закона, с помощью правил получения среднего можно получить среднюю длину трещин через время  $T$  после начала действия нагрузки:

$$\langle a \rangle = \frac{a_0 \exp(C \Delta \varepsilon^m T)}{TC \Delta \varepsilon^m}, \quad (4)$$

где знак  $\langle \rangle$  означает среднее статистическое.

Величина среднего расстояния между трещинами  $\langle L \rangle$  может быть получена путем использования представлений интегральной геометрии на плоскости [9] в виде

$$\langle L \rangle = \frac{\pi d^2}{2 \langle a \rangle \langle n \rangle}, \quad (5)$$

где  $d$  — размер наблюдаемой квадратной площадки с растущими трещинами,  $\langle n \rangle = \lambda T$  — среднее число трещин,

зародившихся к моменту времени  $T$ . Ниже будет показано, что параметр  $\langle L \rangle$  может служить основой для оценки времени формирования макротрещины.

Важнейшей характеристикой начальной стадии разрушения является параметр повреждаемости. В механике разрушения функция повреждаемости оценивается эвристически, путем использования соотношения  $f(N/N_f)$ , где  $N$  — число циклов нагружения,  $N_f$  — число циклов до разрушения. Такой подход удобен для практических целей, однако не дает физической трактовки повреждаемости.

По аналогии со стадией макроразрушения, когда за основную характеристику повреждаемости принимают длину трещины, в качестве параметра множественной повреждаемости начальной стадии разрушения можно рассмотреть интегральную характеристику системы микротрещин — среднюю суммарную длину микротрещин  $^{[10]}$  как функции времени и нагрузки. Значение  $a_{\text{sum}}$  можно получить умножением среднего числа трещин на их среднюю длину

$$a_{\text{sum}} = \langle a \rangle \langle n \rangle = \frac{a_0 \exp(C \Delta \varepsilon^m T)}{C \Delta \varepsilon^m}. \quad (6)$$

Дифференцирование (6) по времени дает закон роста суммарной повреждаемости

$$da_{\text{sum}}/dt = C \Delta \varepsilon^m a_{\text{sum}}. \quad (7)$$

Данное выражение имеет вид, аналогичный закону роста макротрещины, что позволяет оценивать множественную повреждаемость материала графическим способом с помощью кривой зависимости скорости повреждаемости ( $da_{\text{sum}}/dt$ ) от эффективного коэффициента интенсивности напряжений ( $\Delta K_{\text{ef}} = \Delta \varepsilon \sqrt{\pi a_{\text{sum}}}$ ). Перегибы данного графика, построенного в логарифмическом масштабе, должны свидетельствовать об изменении механизма множественного разрушения.

Экспериментально суммарная повреждаемость в различные моменты времени может быть получена путем оцифровки и компьютерного анализа изображений поверхности материала, получаемых периодически в процессе циклического нагружения с помощью электронного микроскопа. Обработка данных может быть основана на принципе различия интенсивности изображений от поврежденных и нетронутых разрушением участков материала. При этом неразвивающиеся затемненные участки поверхности, соответствующие структурным неоднородностям — таким, как зерна, включения, дислокационные скопления или шероховатости поверхности — будут создавать неменяющийся фон изобра-

жения. Разница в интенсивности окрашивания изображения поверхности материала в процессе испытаний может служить информацией о развитии повреждаемости. Таким образом, в отличие от общепринятого подхода, при котором исследуются размеры индивидуальных микротрещин, часто плохо различимых из-за своего малого размера или высокой концентрации, предлагается анализировать динамику развития суммарного размера всех трещин. Такой способ обработки информации позволит автоматизировать процесс оценки множественной повреждаемости.

Закон распределения размеров микротрещин выводится из (2) с помощью правила, позволяющего получать распределение случайной функции (длины трещины), при известном распределении параметра (периода роста трещин):

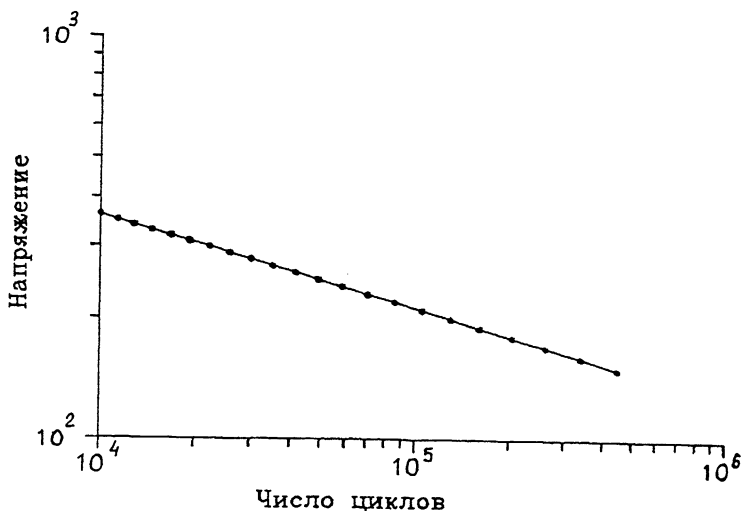
$$P(a) = \frac{a^{-1}}{C' \Delta \varepsilon^m T}. \quad (8)$$

Степенной вид данной зависимости согласуется с экспериментальными данными [11,12], что говорит об адекватности предложенной модели. Кроме того, данное соотношение подтверждает предположение [13] об автомодельности накопления повреждаемости при усталостном разрушении. Как известно, автомодельность процесса заключается в том, что распределение его параметров в различные моменты времени может быть получено одно из другого с помощью преобразования подобия. Из соотношения (8) следует, что в процессе развития системы трещин сохраняется геометрическая картина их распределения в материале при изменении линейного масштаба. При этом в качестве безразмерного параметра подобия можно принять отношение средних расстояний между трещинами, выбранных через определенный интервал времени  $\Delta t$ :

$$L(t)/L(t + \Delta t) = \exp(\Delta t) = \text{const.}$$

Вывод об автомодельности усталостного разрушения согласуется с тем, что пуассоновскому распределению обычно подчиняются процессы, развивающиеся в рамках одного закона.

При переходе от множественного разрушения к локализованному происходит изменение законов роста и накопления микротрещин. Вследствие увеличения числа и размеров микротрещин уменьшается расстояние между ними, трещины начинают взаимодействовать друг с другом и сливаться. Начальная стадия завершается формированием макротрещины (одной или нескольких в зависимости от свойств материала и условий нагружения), имеющей длину и скорость на порядок выше, чем в среднем по ансамблю.



Расчетная  $S - N$  кривая усталости, полученная с помощью представлений о накоплении множественной повреждаемости по формуле (9).

В рамках рассматриваемой модели переход к макроразрушению можно описать с помощью геометрического критерия — среднего критического расстояния между микротрещинами  $L$ . Данный критерий позволяет оценить время, необходимое для перехода к стадии макроразрушения путем подстановки в (5) значения средней длины трещин (4)

$$T = \ln \left( \frac{\pi d^2 C \Delta \varepsilon^m}{2a L_c \lambda} \right) C^{-1} \Delta \varepsilon^{-m}. \quad (9)$$

С помощью выражения (9) проанализирована зависимость долговечности от размаха приложенной нагрузки. Соответствующий график приведен на рисунке. Полученная зависимость может быть аппроксимирована законом Коффина–Мэнсона, который используется для описания кривых усталости. Таким образом, известный эмпирический закон, устанавливающий зависимость между макропараметрами разрушения, может быть выведен на основании представлений о развитии микроповреждаемости в металлах, что свидетельствует о наличии функциональной связи между параметрами, относящимися к различным уровням разрушения.

В заключение необходимо подчеркнуть, что основные достоинства приведенного статистического подхода заключаются, во-первых, в формулировании законов начальной стадии разрушения и анализе процесса в общем виде; во-вторых, в возможности выработки эффективных способов обработки экспериментальных данных для решения задачи оценки множественной повреждаемости.

## Список литературы

- [1] *Suh C.M., Kitagawa H.* Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. 1986. V. 9. P. 409-424.
- [2] *Miller K.J.* // Fatigue Fract. Engng. Mater. 1987. V. 10. P. 75-91.
- [3] *Miller K.J.* // Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. 1987. V. 10. P. 93-113.
- [4] *Suh C.M., Yuuki R., Kitagawa H.* // Fatigue Fract. Engng. Mater. 1985. V. 8. P. 193-203.
- [5] *De Los Rios E.K., Tang Z., and Miller K.J.* / Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. 1984. V. 7. P. 97-108.
- [6] *Петерсен Т.Б., Ботеина Л.Р.* // Заводская лаборатория. 1993. В. 1. С. 39-43.
- [7] *Салганик Р.Л.* // Изв. АН СССР. ММТ. 1973. В. 4. С. 149-158.
- [8] *Vasek A., Polak J.* // Fatigue Fract. Engng Mater. Struct. 1991. V. 14. N 2/3. P. 193-204.
- [9] *Сантало Л.* Интегральная геометрия и геометрические вероятности. М.: Наука, 1983. 358 с.
- [10] *Ботеина Л.Р., Опарина И.Б.* // ФХММ. 1993. В. 4. С. 13-23.
- [11] *Sun Ig Hong, Campbell Laird.* // Engng. Mater. Struct. 1991. V. 14. P. 143-169.
- [12] *Page R., Weertman J.R.* // Scr. Met. 1989. V. 14. P. 773-777.
- [13] *Баренблатт Г.И., Ботеина Л.Р.* // Изв. АН СССР. МТТ. 1983. В. 2. С. 88-92.

Российский научный центр  
"Курчатовский институт"

Поступило в Редакцию  
6 ноября 1994 г.

