

05

## Масштабная инвариантность роста усталостной трещины при гигацикловом режиме нагружения

© В. Оборин, М. Банников, О. Наймарк, Т. Palin-Luc

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия  
E.N.S.A.M. LAMEFIP, EA 2727, Esplanade des Arts et Métiers,  
33405 Talence Cedex, France  
E-mail: oborin@icmm.ru

Поступило в Редакцию 10 июня 2010 г.

Проведено изучение роли коллективного поведения ансамблей дефектов в вершине трещины с закономерностями распространения трещин при усталостном нагружении в гигацикловом диапазоне (частота 20 kHz) для образцов из высокопрочной стали R4 в условиях симметричного растяжения–сжатия. После каждого этапа прорастания трещины снимались реплики с боковой поверхности образцов с последующим анализом 3D профилометрии рельефа (данные интерферометра-профилометра New-View) с целью изучения масштабно-инвариантных закономерностей эволюции структуры, обусловленной дефектами.

Проблема оценки ресурса ответственных машиностроительных конструкций, в частности авиационного моторостроения, поставила ряд качественно новых задач фундаментального характера по оценке надежности материалов для значений, превышающих  $10^6$ – $10^{10}$  циклов нагружения, в области так называемой гигацикловой усталости. Это связано с тем, что ресурс нагружения многих ответственных конструкций, работающих в режиме циклических нагрузок, превышает многоцикловый диапазон. В свою очередь поведение материалов в области гигацикловой усталости обнаруживает ряд закономерностей, относящихся к качественным изменениям, как условий зарождения трещин (в объеме образца), так и их распространения, связанных с качественной сменой механизмов зарождения и развития трещин усталости. На кривой усталости в этой области нагружения образуются разрывы, существенно возрастает роль внешней среды, и проблема оценки ресурса носит междисциплинарный характер.

Стадийность разрушения в гигацикловом диапазоне анализируется на основе структурных признаков поврежденности, относящихся к широкому спектру пространственных масштабов: полосы локализованной пластичности (persistent slip bands — PSB), усталостные бороздки (striations), микротрещины, формируемые при пересечении PSB, зернограничные дефекты. Основная поврежденность относится к масштабам дефектов  $0.1 \mu\text{m} - 1 \text{mm}$ , которые существенно меньше масштабов, регистрируемых методами неразрушающего контроля, применяемых для оценки надежности в процессе эксплуатации изделий.

Количественная фрактография является эффективным методом исследования роли исходной структурной гетерогенности, накопления дефектов различных масштабных уровней (дислокационных ансамблей, микропор, микротрещин) при оценке критических условий перехода от дисперсного к макроскопическому разрушению, учитывая характерные стадии этого перехода — зарождение и развитие трещин, что является основой для оценки временного ресурса изделий в условиях гигацикловой усталости.

Анализ морфологии поверхностей разрушения на основе пространственно-временных инвариантов впервые был предложен в [1] на основе анализа рельефа поверхности разрушения, обнаруживающей свойства самоафинности, которые отражаются в инвариантных характеристиках рельефа поверхности (шероховатости) на широком спектре пространственных масштабов и которые, в свою очередь, отражают коррелированное поведение дефектов различных масштабных уровней.

Универсальность кинетических закономерностей, устанавливающих связь между скоростью роста усталостной трещины  $dl/dN$  и изменением коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K$ , является предметом интенсивных экспериментальных и теоретических исследований. Степенные зависимости, впервые установленные в работах П. Париса (Paris) [2] и известные как закон Париса, отражают автомодельный характер развития усталостных трещин, обусловленный нелинейным характером развития поврежденности в окрестности вершины трещины (process zone — „зона процесса“ [2])

$$dl/dN = C(\Delta K)^m, \quad (1)$$

где  $C$  и  $m$  — экспериментально определяемые константы. Для широкого класса материалов и различных скоростей роста трещин в условиях многоциклового усталости показатель степени  $m$  близок к значениям 3–4.

Интерпретация природы универсальности закона Париса была предложена в [3] на основе автоматических закономерностей развития поврежденности и формирования закономерностей развития диссипативных структур ансамблей дефектов, локализованных на спектре пространственных масштабов. Формирование структур отражает признаки критичности перехода от дисперсного к макроскопическому разрушению — структурно-скейлинговые переходы [4]. Распространение трещин связывается с установлением длиннокорреляционного взаимодействия в многомасштабных ансамблях диссипативных структур, которое может быть охарактеризовано масштабом корреляции, начиная с которого длиннокорреляционные взаимодействия распространяются на масштаб, определяющий очередное приращение длины распространяющейся трещины (размер „зоны процесса“). Это предположение относительно условий критичности использовалось при проведении эксперимента для объяснения автоматического сценария распространения усталостной трещины в стальном образце, нагруженном в режиме гигацикловой усталости.

Образцы из высокопрочной стали R4 (предел усталости равен 600 МПа при  $10^6$  циклов, 10 Hz, комнатной температуре) подвергались усталостному нагружению в условиях симметричного цикла растяжения–сжатия с частотой 20 kHz (режим гигациклового нагружения) на оригинальной установке [5]. Испытательная машина состоит из следующих основных частей: генератора, преобразующего частоту 50 Hz в ультразвуковой электрический синусоидальный сигнал с частотой 20 kHz; пьезоэлектрического преобразователя, генерирующего продольные ультразвуковые волны и механическое воздействие частотой 20 kHz; ультразвукового волновода, увеличивающего амплитуду механического напряжения в рабочей (средней) части образца.

На начальной стадии эксперимента зарождалась усталостная трещина длиной  $\sim 1.5$  mm. В процессе дальнейшего роста трещины, благодаря вариации амплитуды колебаний, контролировался рост трещины и изменение коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K$  по формуле (2)

$$\Delta K = \frac{E}{1 - \nu^2} \sqrt{\frac{\pi}{l}} U_0 Y(l/w), \quad (2)$$

где  $E$  — модуль Юнга,  $\nu$  — коэффициент Пуассона,  $U_0$  — амплитуда колебаний,  $Y$  — полиномиальный фактор,  $w$  — ширина образца. Для данной геометрии образца (рис. 1)  $Y(l/w) = 0.635(l/w) + 1.731(l/w)^2 - 3.979(l/w)^3 + 1.963(l/w)^4$ .

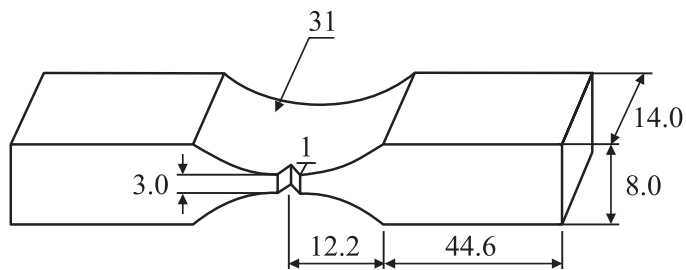


Рис. 1.

После каждого этапа прорастания трещины снимались реплики с поверхности образцов с целью исследования морфологии дефектных структур перед вершиной трещины. Поверхностный рельеф на репликах, представленный на рис. 2, регистрировался с помощью интерферометра-профилометра высокого разрешения New-View (вертикальное разрешение от  $0.1 \text{ nm}$ , горизонтальное разрешение от  $0.5 \mu\text{m}$ ) и затем анализировался методами корреляционного анализа для определения условий „масштабной инвариантности“ в ансамблях дефектных структур, с которым связывается очередная стадия распространения трещины.

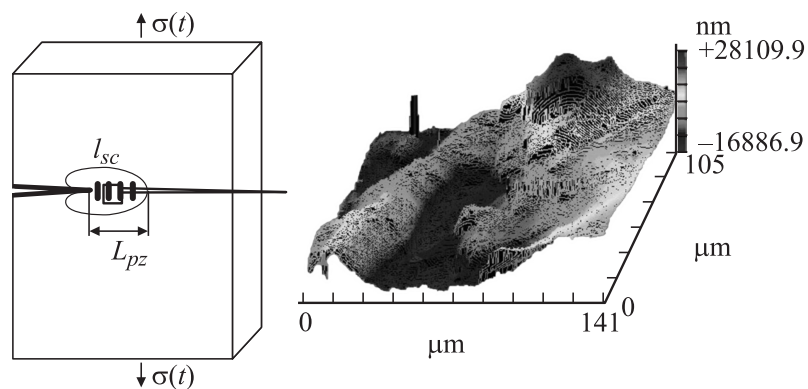


Рис. 2.

Значения переменных для различных этапов роста трещины

$\Delta K$ , (МПа $\sqrt{м}$ )	$\Delta l \cdot 10^4$ , м	$\Delta N \cdot 10^{-5}$	$dl/dN \cdot 10^{12}$	$l_{sc} \cdot 10^4$ , м
6.200	2.398	20.5	117	0.033
5.890	1.997	2.82	708	3.4
5.596	2.200	4.74	464	2.2
5.316	2.505	4.22	593	5.5
4.797	3.003	2.75	1090	2.6
4.558	3.597	7.13	505	2.5
4.330	2.403	433	5.56	2.6

По одномерным профилям рельефа поверхности реплик строилась автокорреляционная функция вида

$$\Psi(r) = \int f(x)f(x-r)dx.$$

Первое нулевое значение автокорреляционной функции принималось за критический масштаб  $l_{sc}$  установления длиннокорреляционных взаимодействий в ансамблях дефектов на масштабе  $L_{pz}$  прорастания трещины (масштаб „зоны процесса“) (рис. 2). Значения критического масштаба  $l_{sc}$  для различных стадий распространения трещины приведены в таблице.

Проявление автомодельных закономерностей роста трещины исследовалось методами теории подобия и размерностей [6,7]. Определим зависимость скорости роста трещины  $a = dl/dN$  ( $l$  — длина трещины,  $N$  — число циклов) от следующих параметров:  $a_1 = \Delta K$  — коэффициент интенсивности напряжения,  $a_2 = E$  — модуль Юнга,  $a_3 = l_{sc}$  — масштаб корреляции в ансамбле дефектов,  $a_4 = L_{pz}$  — масштаб, связанный с зоной процесса.

Применяя П-теорему, с учетом размерностей переменных  $[dl/dN] = L$ ,  $[\Delta K] = FL^{-3/2}$ ,  $[l_{sc}] = [L_{pz}] = L$ ,  $[E] = FL^{-2}$  кинетическое уравнение для роста трещины

$$\frac{dl}{dN} = \Phi(\Delta K, E, l_{sc}, L_{pz}) \quad (3)$$

может быть записано в виде

$$\frac{dl}{dN} \frac{1}{l_{sc}} = \bar{\Phi} \left( \frac{\Delta K}{E\sqrt{l_{sc}}}, \frac{L_{pz}}{l_{sc}} \right). \quad (4)$$

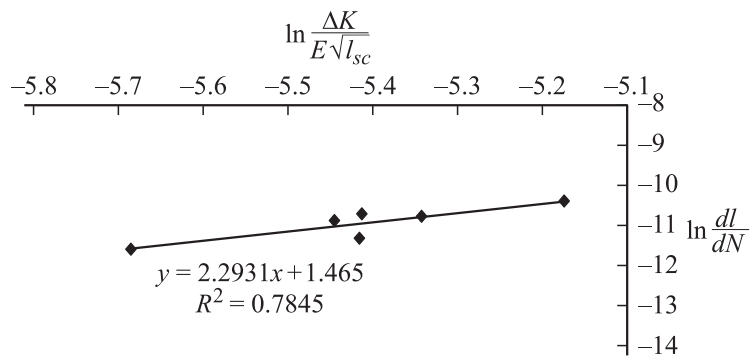


Рис. 3.

Оценка значений  $\Delta K / (E\sqrt{l_{sc}}) \ll 1$  и  $L_{pz} / l_{sc} \gg 1$  позволяет предположить промежуточно-асимптотический характер кинетики роста трещины и записать (4) в виде

$$\frac{d\bar{l}}{dN} = \left( \frac{\Delta K}{E\sqrt{l_{sc}}} \right)^\alpha \left( \frac{L_{pz}}{l_{sc}} \right)^\beta, \quad (5)$$

где  $\bar{l} = l / l_{sc}$ . Введение параметра материала  $C = (L_{pz} / l_{sc})^\beta$  приводит соотношение (3) к виду, аналогичному закону Париса

$$\frac{d\bar{l}}{dN} = C \left( \frac{\Delta K}{E\sqrt{l_{sc}}} \right)^\alpha, \quad (6)$$

где  $\alpha$  — универсальный показатель.

Зависимость (6), построенная по результатам эксперимента по кинетике роста трещины с учетом вычисленных значений  $l_{sc}$ , позволяет оценить значение показателя  $\alpha \sim 2.3$ , соответствующее наклону прямой в логарифмических координатах (рис. 3). Отличие значения показателя  $\alpha \sim 2.3$  от значений, наблюдаемых для режимов многоциклового усталости, позволяет высказать предположение об особенностях закономерностей формирования областей разрушения в окрестности вершины трещины при гигацикловых нагружениях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 08-01-00699, 09-01-92005-ННС\_а, 09-01-92441-КЭ\_а).

## Список литературы

- [1] *Mandelbrot B.B.* The fractal geometry of nature. New York: W.H. Freeman, 1983. P. 468.
- [2] *Paris P., Lados D., Tad H.* // Engineering Fracture Mechanics. 2008. V. 75. P. 299–305.
- [3] *Lataillade J.L., Naimark O.B.* // Physical Mesomechanics. 2004. V. 7. N 4. P. 55–66.
- [4] *Naimark O.B.* Advances in Multifield Theories of Continua with Substructure. Birkhauser Boston. Inc. Eds: G. Capriz, P. Mariano. 2003. P. 75–114.
- [5] *Bathias C.* // International J. Fatigue. 2006. V. 28. P. 1438–1445.
- [6] *Barenblatt G.I.* // Int. J. Fracture. 2006. V. 138. P. 19–35.
- [7] *Ritchie R.O.* // Int.J. Fracture. 2005. V. 132. P. 197–203.