

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ ИМ. А.А. БЛАГОНРАВОВА РАН
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,
РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ (МИРЭА)
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. Н.Е. ЖУКОВСКОГО (ЦАГИ)
ФГУП «НПЦ ГАЗОТУРБОСТРОЕНИЯ „САЛЮТ“»
МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОЮЗ НАУЧНЫХ И ИНЖЕНЕРНЫХ ОБЩЕСТВЕННЫХ ОБЪЕДИНЕНИЙ
АССОЦИАЦИЯ ТЕХНОЛОГОВ-МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ
АССОЦИАЦИИ ИНЖЕНЕРОВ-ТРИБОЛОГОВ РОССИИ

НАУЧНЫЕ ТРУДЫ

**IV Международной научной конференции
“Фундаментальные исследования
и инновационные технологии в
машиностроении”**

Москва 2015

РАЗВИТИЕ МИКРО- И МАКРОТРЕЩИН В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ

Э.Б.Завойчинская

МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия; elen@altomira.ru

Аннотация. Обсуждается феноменологическая модель хрупкого усталостного разрушения металлов и сплавов в трехмерных пропорциональных нагружениях. Предлагается система гипотез модели о поэтапном развитии дефектов типа хрупких микро- и макротрещин в металлах на микро-, мезо- и макроуровне с учетом результатов теоретико-экспериментальных исследований по физике и механике разрушения металлов. Вероятность развития дефектов описывается системой рекуррентных автомодельных соотношений. На ее основе получены кривые усталости при различных предельных состояниях металлов и пропорциональных нагружениях.

Ключевые слова: пропорциональное симметричное нагружение, хрупкие усталостные микро- и макротрещины, вязкие трещины, кривая усталости металла

Существующие теории разрушения металлов, описывающие закономерности усталостного разрушения на микро-, мезо- и макроуровнях (структурные, энергетические, статистические), используют структурные параметры физических механизмов разрушения, не идентифицируемые в макроэкспериментах по усталостной прочности.

Гипотеза макрофизической определенности теории пластичности А.А.Ильюшина вводит понятия М-образца и совокупности М-опытов над ним, в которых могут быть изучены физические и механические состояния и процессы, развивающиеся в любом достаточно большом объеме ΔV произвольно нагружаемого тела при неоднородных состояниях. В частности, физические свойства усталостного разрушения, описываемые физическими теориями, могут быть изучены в испытаниях на усталость М-образцов по специальным программам.

В рамках настоящего исследования проведено теоретико-экспериментальное изучение развития усталостных микро- и макротрещин. Согласно гипотезе А.А.Ильюшина предлагаемая феноменологическая модель рассматривает последовательное развитие разрушения на микро-, мезо- и макроуровнях с учетом физических параметров структуры. На основе анализа результатов исследований усталостного разрушения металлов и сплавов по физике разрушения, металловедению, механике деформируемого твердого тела сформулированы следующие основные гипотезы модели.

1. Усталостное разрушение металлов определяется независимыми стохастическими процессами хрупкого и вязкого разрушений. Хрупкие трещины зарождаются и растут внутри зерен, в дальнейшем сливаются, пересекают три-четыре зерна. Вязкие трещины возникают по границам зерен и развиваются скольжением ансамблей зерен средних размеров $4,10 d$ (d – средний размер зерна) и более. Развитие процесса микроразрушения (изменение структуры) при симметричном нагружении в диапазоне $N \in [5 \cdot 10^6, 10^{10}]$ циклов и напряжениях,

меньших предела выносливости металла, происходит при упругом макродеформировании. Разрушение при $N \in [5 \cdot 10^3, 5 \cdot 10^6]$ циклов характеризуется развитием хрупких макротрещин в диапазоне от размера зерна до размера начальной трещины механике разрушения.

В пластичных материалах независимо развиваются вязкие трещины при упругом макродеформировании. Усталостный изгиб имеет хрупкую кристаллическую и вязкую волнистую составляющие. В диапазоне чисел циклов $N \in [10, 5 \cdot 10^3]$ циклов хрупкие макротрещины достигают конечной длины. Вязкие трещины в пластичных материалах определяют разрушение.

2. Простое гармоническое нагружение в трехмерном напряженном состоянии представляется по главным осям в виде:

$$\sigma_{kk}^t = \alpha_k \sigma_a f^t, k=1,2,3, f^t = \sin \omega t + \theta$$

$$|\sigma_{11}| \geq |\sigma_{22}| \geq |\sigma_{33}|, \alpha_k = \sigma_{kk}/|\sigma_{11}|.$$

Развитие усталостного разрушения зависит вида напряженно-деформированного состояния. Построение модели разрушения при простом нагружении базируется на характеристиках разрушения при трех базовых видах нагружения: одноосном ($|\sigma_{11}| = \sigma_a, \alpha_2 = \alpha_3 = 0$) и равномерном двустороннем ($|\sigma_{11}| = |\sigma_{22}| = \sigma_a, \alpha_3 = 0$) нагружениях и сдвиге ($|\sigma_{11}| = |\sigma_{22}| = \tau_a, \alpha_2 = -1, \alpha_3 = 0$).

3. По методологии теоретической физики классификация хрупкого разрушения включает дефекты i -го вида, $i=1, \dots, 6$, средней длины $l_i = l_i^* \tau$

плотности вида: $q_i \tau = \lim_{\Delta V \rightarrow V_c} \frac{\Delta q_i(\tau)}{\Delta V}$,

$\square q_i = \square q_i(\tau)$ – среднее количество дефектов в объеме

$\square V$ в момент времени $\tau \in [0, t]$; $V_c = L^3$ – характерный объем твердого тела для трещин конечной длины L . Дефекты i -го вида характеризуются предельными длинами $l_{f,i}$, $l_{f,i-1} \leq l_i \tau \leq l_{f,i}$,

$l_{f,0} = 0$ и предельными плотностями в объеме V_c , $q_{f,i-1} \leq q_i \tau \leq q_{f,i}$, $q_{f,0} = 0$. На микроуровне

длины микродефектов ($i=1,2,3$), в среднем, стабильны, с ростом числа циклов возрастает их плотность; на мезоуровне длины макродефектов ($i=4,5,6$) подрастают в процессе нагружения.

4. Образование дефектов i -го вида происходит вследствие последовательного зарождения, развития и слияния дефектов предыдущих видов.

Процесс микроразрушения начинается с инкубационного периода неупругого микродеформирования (изменения микроструктуры внутри зерна и на границах зерен), скопления и роста вакансионных кластеров, дислокаций, межзеренных субмикротрещин и пор (особенно вблизи границ зерен), фасеток скола и т.п. Эти дефекты отнесем к группе дефектов первого вида средней длины $l_1 \leq 10^{-3} d$. С ростом

плотности происходят их слияния и зарождение микротрещин длиной $l_2 \in 10^{-3}, 10^{-2}] d$ – микродефектов второго вида. В результате слияния микротрещин образуются нераспространяющиеся короткие микротрещины длиной $l_3 \in 10^{-2}, 10^{-1}] d$

– третий вид дефектов. Дальнейшее развитие разрушения приводит к зарождению коротких макротрещин длиной $l_4 \in 10^{-1}, 1] d$ (четвертого вида

дефектов), которые формируют усталостный рельеф в виде речного узора (впадины–интрузии и ступеньки–экструзии). При этом линии Френча определяют границу микро- (изменения структуры) и мезоуровней (макротрещин). При пересечении короткими макротрещинами трех–четырех зерен образуются транскристаллитные макротрещины (зернограничные трещины в мелкозернистых сплавах) – дефекты пятого и шестого видов, эволюция которых приводит к кристаллографическим сколам. В пластичных материалах развиваются вязкие трещины по механизмам скольжения и двойникования.

5. Вводится понятие условной трещины i -го вида, $i=1, \dots, 6$ – нитевидной трещины диаметром поперечного сечения $l_i = l_i \tau$ и средней длиной

$l_i^* = l_i^* \tau$, $\tau \in [0, t]$, задаваемой формулой:
 $l_i^* = l_i q_i V_c^\gamma$, $\gamma = \text{const}$. Предельные состояния

определяются достижением длиной $l_i^* = l_i^* \tau$ своего предельного значения $l_{f,i}^*$, при этом $l_{f,1}^* \leq l_{f,2}^* \leq \dots \leq l_{f,6}^* = L$.

Образование дефекта i -го вида начинается с достижения длиной условной трещины $i-1$ -го вида l_{i-1}^* предельного значения $l_{f,i-1}^*$ в момент времени t_i , $i=1, \dots, 6$. Цепочка приводит к моменту времени t_7 , которое определяет начало развития трещин конечной длины, описываемых механикой разрушения.

Повреждение от развития дефектов i -го вида (разрушение i -го вида) является случайным процессом на интервале времени $\tau \in 0, t$ и определяется так: $\Omega_i \tau = l_i^* \tau / l_{f,i}^*$, $0 \leq \Omega_i \leq 1$, $i=1, \dots, 6$.

6. Вероятность $Q_i = Q_i \tau$, $i=1, \dots, 6$, с которой повреждение Ω_i меньше единицы в каждый момент τ : $Q_i = P_i \Omega_i < 1$ (вероятность, с которой дефект i -го вида достигает своего предельного состояния, а длина условной трещины – предельного значения), называется вероятностью разрушения i -го вида.

Процесс развития хрупкого усталостного разрушения описывается рекуррентной системой соотношений для функций $Q_i = Q_i \tau$, $i=1, \dots, 6$, $\tau \in [0, t]$, в виде ограниченного числа шагов до макроусталостного разрушения, в которые входят моменты времени t_i начала образования дефектов всех предыдущих видов. Для простого нагружения вероятность разрушения $Q_i = Q_i \tau$ по дефекту i -го вида задается таким образом:
от слияния дефектов $i-1$ -го вида, $i=1, 2, 3, 4$:

$$Q_i = \left(\frac{\sigma_a - \sigma_{i-1}}{\sigma_i - \sigma_{i-1}} \right)^\beta \sqrt{\frac{\lg n - \lg n_i \sigma_a}{\lg N_i - \lg n_i \sigma_i}},$$

$$\sigma_{i-1} \leq \sigma_a, \lg n \geq \lg n_i \sigma_a, 0 \leq Q_i \leq Q_i^*, \sigma_0 = 0, n_1 = 1;$$

от слияния дефектов $i-1$ -го вида и роста дефектов i -го вида, $i=5, 6$:

$$Q_i = \left(\frac{\sigma_a - \sigma_{i-1}}{\sigma_i - \sigma_{i-1}} \right)^\chi \sqrt{\frac{\lg n - \lg n_4 \sigma_a}{\lg N_i - \lg n_4 \sigma_i}},$$

$$Q_{i-1} = \left(\frac{\sigma_i - \sigma_a}{\sigma_i - \sigma_{i-1}} \right)^\chi \sqrt{\frac{\lg n - \lg n_4 \sigma_a}{\lg N_i - \lg n_4 \sigma_i}},$$

$$\sigma_{i-1} \leq \sigma_a \leq \sigma_i, \lg n \geq \lg n_4 \sigma_a, 0 \leq Q_i \leq Q_i^*,$$

где числа циклов $n_i = n_i$, σ_a – начало образования дефектов i -го вида, β, χ – константы материала.

Базовые функции σ_i, N_i определяются по данным усталостных испытаний при базовых видах нагружения с учетом отношения $\alpha_k, k = 1, 2$, по критериям усталостной прочности в виде:

$$\sigma_i = \sigma_{a,i} N_i^\omega \tilde{\sigma}_i \left(\alpha_k, \frac{\sigma_{a,i}}{\tau_{a,i}}, \frac{\sigma_{a,i}}{\hat{\sigma}_{a,i}} \right), i = 1, \dots, 6.$$

Построена методика определения системы базовых характеристик модели по сериям макроэкспериментов с обработкой шлифов стандартными исследованиями микроструктуры. Однако для их идентификации имеющихся в литературе данных недостаточно. Поэтому для них строятся аппроксимации, основанные на анализе усталостного поведения металлов и известных характеристиках усталостной прочности.

Из анализа следует, что в области многоцикло-вой усталости развитие микроразрушения приводит к образованию коротких трещин и хрупкому макро-разрушению при упругом макродеформировании. В области ограниченной усталости для пластичных материалов при $N_f \in [5 \cdot 10^4, 10^6]$ циклов неупругие

деформации меньше упругих и тормозят развитие хрупкого разрушения, долговечность металла увеличивается; в диапазоне $N_f \in [5 \cdot 10^3, 5 \cdot 10^4]$ циклов

неупругие деформации соизмеримы с упругими, ускоряют развитие макроразрушения, вследствие этого долговечность уменьшается. На микроуровне заметное изменение физических свойств происходит при изменении числа циклов на порядки. Полагается линейная зависимость предела циклической пропорциональности металла от числа циклов.

Числа циклов n_i начала образования дефектов i -го вида находятся как решение уравнений:

$$Q_i n_{i+1} = Q_i^*, Q_i^* = const, Q_i^* - \text{заданные значения вероятности разрушения } i\text{-го вида, } i = 1, \dots, 6.$$

7. Вероятность хрупкого разрушения $Q = Q \tau$, $\tau \in 0, t$, по дефектам мезоуровня задается выражением:

$$Q = \sum_{i=4}^6 \frac{Q_i}{1 - Q_i} \prod_{j=4}^6 Q_j, 0 \leq Q \leq 1;$$

долговечность металла по дефектам мезоур-
 n_f находится из уравнения: $Q n_f = 1$.

Разработанная модель аттестована для ц-кого ряда металлов, конструкционных сталей, нов; никелевых, алюминиевых, титановых спл Построены области развития микро- и макротр-и кривые усталости при различных простых цессах пропорционального симметричного н-жения.

1. Ботвина Л.Р. Кинетика разрушения конструкционных сталей. М.: Наука, 1989. 230 с.
2. Завойчинский Б.И. Долговечность магистральных и логических трубопроводов (теория, методы расчета, тирование). М.: Недра, 1992. 271 с.
3. Завойчинская Э.Б., Кийко И.А. Введение в теорию цессов разрушения твердых тел. М., МГУ, 2004. 168 с.
4. Завойчинская Э.Б. К проблеме разрушения при цн-ских нагрузках// Проблемы машиностроения и на-сти машин, № 1, 2010. с. 43-52
5. Завойчинская Э.Б. Микромеханика разрушения элем-конструкций при циклическом нагружении //Справ-Инженерный журнал, № 3, 2010. с. 41-46.
6. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Физическая м-ка микро- и макроразрушения сталей и сплавов при ц-ческом нагружении// Приложение к журналу «Справ-Инженерный журнал», 8(173), 2011. 32 с.
7. Завойчинская Э.Б. Процесс микроразрушения ме-при сложном напряженном состоянии //Механика м-механизмов и материалов, № 3(16), 2011. с.34-37.
8. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Механик-роскопических трещин при сложном напряженно-стоянии // Справочник. Инженерный журнал. № 3. 2011. с. 37-43.
9. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Микроме-разрушения металлов при сложном напряженном-янии // Проблемы машиностроения и надежности м-№ 2, 2011. с. 31-39.
10. Завойчинская Э.Б. Процесс микроразрушения ме-при сложном напряженном состоянии //Механика м-механизмов и материалов, № 3(16), 2011.с.34-37.
11. Завойчинский Б.И. Долговечность магистральных и логических трубопроводов (теория, методы расчета, тирование). М.: Недра, 1992. 271 с.
12. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Микроме-разрушения металлов при сложном напряженном-янии // Справочник. Инженерный журнал, № 3. 2011. с. 52-56.
13. Завойчинская Э.Б. Микро- и макромеханика разру-элементов конструкций // Механика твердого тела 2012. с. 54-77.
14. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости ме-М.: Металлургия, 1975. 456 с.
15. Иванова В.С., Шанявский А.А. Количественная фра-фия. Усталостное разрушение. Челябинск: Метал 1988. 397 с.
16. Клевцов Г.В., Ботвина Л.Р., Клевцова Н.А., Лима-Фрактодиагностика разрушения металлических мат-и конструкций. М.: МИСиС, 2007. 264 с.
17. Махутов Н.А. Пермяков В.Н., Ботвина Л.Р., Кравцов-Комплексный анализ механических свойств матери-обоснования ресурса и безопасности продуктопр-Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2011. С. 65-76.
18. Прочность материалов и конструкций //Трошенко В. Киев: Академперіодика, 2005. 1088 с.
19. 6. Miller K.J., de Los Rios E.R. The Behaviour of Short Cracks. John Wiley&Sons Inc., 2005. 560 p.