

УДК 621.001

**АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ ПИТУХИН**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
технологии металлов и ремонта, декан лесинженерного фа-  
культета ПетрГУ  
pitukhin@psu.karelia.ru

### **ОЦЕНКА ПЕРИОДА ЗАРОЖДЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ ОТ РИСКОВ ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

Приведены зависимости для определения числа циклов, после которого усталостная трещина начнет свое развитие из микродефекта при воздействии циклических напряжений, заданных в виде блока и в виде плотности распределения размахов. Рассмотрен случай наличия на поверхности детали рисков после механической обработки и предложены зависимости для определения периода зарождения усталостной трещины в зависимости от параметров шероховатости поверхности.

Ключевые слова: период зарождения усталостной трещины, риски от механической обработки, параметр шероховатости поверхности

Под действием переменных напряжений в материалах происходит процесс постепенного накопления повреждений, приводящий к образованию трещин, их развитию и разрушению. Различают малоцикловое и многоцикловое разрушения. При малоциклового усталости имеет место образование петель гистерезиса, поскольку циклическое деформирование происходит в упруго-пластической области. Число циклов до разрушения обычно не превосходит  $10^5$ . Элементы конструкций во многих областях машиностроения проектируются на значительно большую циклическую долговечность. Это изделия станкостроительной и автотракторной промышленности, нефтехимического и бумагоделательного машиностроения, подъемно-транспортного и лесного машиностроения, судостроения и многих других отраслей. В связи с вышесказанным мы в дальнейшем будем рассматривать только многоцикловую усталость.

Процесс накопления повреждений делят на несколько стадий: создание характерной микро-

структуры и изменение механических свойств, зарождение микротрещин в пределах устойчивых полос скольжения, распространение микротрещин и развитие их в макротрещины, образование магистральной трещины, окончательное разрушение. В расчетной практике обычно ограничиваются двумя укрупненными стадиями: стадией рассеянных повреждений и стадией развития усталостной трещины.

Продолжительность стадий зависит от материала, наличия концентраторов напряжений, размеров дефектов, степени стеснения деформаций, уровня нагруженности. В зонах местных напряжений в условиях стеснения пластических деформаций продолжительность стадии роста магистральной трещины может существенно превышать продолжительность стадии рассеянных повреждений. Так, по данным В. С. Ивановой с соавт. [1], микроскопические трещины наблюдаются уже после 0,1 числа циклов нагружения до разрушения. Относительное время развития микротрещины для образцов с

концентраторами достигает 0,2...0,5 и более от общей долговечности.

В настоящее время предложено достаточно много как структурных, так и феноменологических моделей первой и второй стадии усталостного разрушения. Феноменологические (полумпирические) модели основаны на обобщении результатов наблюдений и не ставят целью объяснение или полное описание существа явлений. Структурные модели позволяют описать и объяснить явления исходя из внутренней структуры рассматриваемых объектов. Используются энергетический, деформационный и силовой подходы. Силовые модели нашли наиболее широкое распространение. Заслуживают внимания кинетические уравнения повреждений силового типа и расчеты на их основе, предложенные П. А. Павловым в работе [2]. В. В. Болотиным [3] рекомендуется определять число циклов зарождения  $N_3$ , после которого трещина начнет свое развитие при воздействии циклических напряжений постоянного размаха по формуле:

$$N_3 = \frac{N_C}{[(\chi\Delta\sigma - \sigma_{th})/\sigma_\psi]^{m_3}}, \quad \chi\Delta\sigma \geq \sigma_{th}, \quad (1)$$

где  $N_C$  - постоянная времени;

$\chi$  - коэффициент концентрации напряжений от микродефектов;

$\sigma_\psi, \sigma_{th}, m_3$  - константы материала (при заданных условиях внешней среды). Константа  $\sigma_\psi$  характеризует сопротивление материала накоплению микроповреждений;

$\sigma_{th}$  - порог этого сопротивления;

$\Delta\sigma$  - размах напряжений в цикле;

$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ ;

$\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$  - максимальное и минимальное напряжения в цикле нагружения.

Определение периода зарождения усталостной трещины из различных концентраторов напряжений для получения расчетных оценок показателей надежности является важной задачей, так как в большинстве случаев трещина образуется именно на дефектах, являющихся концентраторами напряжений.

Формула (1) определяет число циклов, после которого трещина начнет свое развитие из микродефекта при воздействии циклических напряжений постоянного размаха  $\Delta\sigma$ . При задании нагрузки в виде блока при предположении о справедливости гипотезы линейного суммирования усталостных повреждений и условия начала роста трещины

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_{3i}} = 1,$$

используя зависимость (1), получим

$$N_3 = n_0 \frac{N_C \sigma_\psi^{m_3}}{\sum_{i=1}^m n_i (\chi\Delta\sigma_i - \sigma_{th})^{m_3}}. \quad (2)$$

Инкубационный период, выраженный в единицах наработки, определится по аналогии с (2) как

$$T_3 = T_0 \frac{N_C \sigma_\psi^{m_3}}{\sum_{i=1}^m n_i (\chi\Delta\sigma_i - \sigma_{th})^{m_3}}. \quad (3)$$

Наработка до отказа с учетом двух стадий развития усталостной трещины запишется в виде:

$$T = T_3 + T_p; \quad N = N_3 + N_p. \quad (4)$$

Число циклов  $N_p$ , называемое остаточным ресурсом, определяет период распространения усталостной трещины, или живучесть.

В случае задания нагруженности в виде плотности распределения размахов действующих напряжений не представляет трудности на основе формулы (2) получить зависимость:

$$N_3 = \frac{N_C \sigma_\psi^{m_3}}{\int_{\sigma_{th}}^{\sigma_B} f(\Delta\sigma) (\chi\Delta\sigma - \sigma_{th})^{m_3} d\Delta\sigma}. \quad (5)$$

Определим период зарождения трещины от риска после механической обработки. Для этого необходимо найти выражение для коэффициента концентрации напряжений  $\chi$ , вызванных этими рисками. В работе В. А. Пальмова с соавторами [4] решена задача теории упругости о напряженном состоянии тела со случайной шероховатой поверхностью. Решение для коэффициента концентрации при растяжении полуплоскости с синусоидальной границей, образованной системой периодически повторяющихся выступов и впадин, получено в виде:

$$\chi = 1 + 4\pi \frac{A}{T},$$

где  $A$  - высота выступов;

$T$  - шаг.

В той же работе [4] рекомендуется для практических расчетов более грубая оценка коэффициента концентрации, которая хорошо согласуется с экспериментальными данными по усталости стальных образцов:

$$\chi = 1 + 4\pi\sqrt{2} \frac{A}{T}. \quad (6)$$

В рабочих чертежах на детали и элементы конструкций оговариваются параметры шероховатости поверхности и проставляется предельно допустимая высота неровностей профиля по десяти точкам  $R_z$  или среднеарифметическое значение отклонения профиля от средней линии  $R_a$ . Поэтому выразим коэффициент концентрации через  $R_z$ .  $R_z$  определяется как среднее расстояние между пятью высшими и пятью низшими точками профиля в пределах базовой длины  $l_0$  [5]. ГОСТ 2789-73 распространяется на шероховатость поверхностей с интервалами  $R_z = 1600-0,025$  мкм;  $R_a = 100...0,008$  мкм;  $l_0 = 25...0,01$  мм. При этом для точения, строгания и фрезерования можно принять  $R_{\max} = 6 R_a$ ;

**Таблица 1**  
Расчетные коэффициенты  
концентрации напряжений  
для обработанных поверхностей

| Класс<br>шероховатости | $R_z$ , мкм   | $\chi$          |
|------------------------|---------------|-----------------|
| 4                      | от 40 до 20   | от 3,22 до 2,11 |
| 5                      | от 20 до 10   | от 2,11 до 1,56 |
| 6                      | от 10 до 6,3  | от 1,56 до 1,35 |
| 7                      | от 6,3 до 3,2 | от 1,35 до 1,18 |
| 8                      | от 3,2 до 1,6 | от 1,18 до 1,09 |

$R_z = 5 R_a$  [6]. Здесь  $R_{max}$  – наибольшая высота неровностей профиля. Полагая профиль шероховатостей синусоидальным со случайным значением амплитуды  $R_z/2$  и постоянным шагом  $l_\sigma/5$ , получим

$$\chi = 1 + 44,4 \frac{R_z}{l_\sigma}. \quad (7)$$

Здесь  $R_z$  входит в мм.

В таблице 1 приведены значения коэффициентов концентрации напряжений, подсчитанные по зависимости (7) при  $l_\sigma = 0,8$  мм. Они достаточно хорошо совпадают с результатами, приведенными в работе [4, с. 292, 293], где рекомендуется для 5-го класса шероховатости при обработке шлифованием коэффициент концентрации 2,44, а для восьмого класса – 1,44.

Используя (3) с учетом (7), получим зависимость для определения периода зарождения трещины от рисков механической обработки:

$$T_3 = T_0 \cdot \frac{N_c \sigma_\Psi^m}{\sum_{i=1}^m n_i \left[ \left( 1 + 44,4 \frac{R_z}{l_\sigma} \right) \Delta \sigma_i - \sigma_{th} \right]^m}. \quad (8)$$

Оценивание статистических характеристик наработки до отказа в этом случае осуществляем в следующем порядке.

1. Задаем число испытаний  $N_1$ , внешнюю нагрузку и другие необходимые данные.

2. Моделируем на ЭВМ по соответствующим законам распределения случайную реализацию вектора начальных параметров. Полагаем  $l_0 = R_{max}/2 \cong R_z/2$ .
3. Располагаем уровни нагрузок в блоке нагружения в случайном порядке.
4. Подсчитываем период зарождения  $T_K$  по зависимости (8).
5. Подсчитываем по рекуррентным формулам (4.47) и (4.50), полученным в работе [7], текущие значения длины трещины и коэффициента интенсивности напряжений (КИН), сравнивая его с предельным значением  $K_{fc}$  (или  $K_{IC}$ ).
6. Вычисления на 5-м шаге осуществляем до выполнения условия  $\Delta K_I \geq \Delta K_{fc} \vee l \geq l_c$ , после чего определяем остаточный ресурс  $T_p$ .
7. Определяем наработку до отказа  $T = T_3 + T_p$ .
8. Повторяем вычисления по пунктам 2-6  $N_1$  раз для получения последовательности (выборки)  $\{T\}$  объемом  $N_1$ .
9. Обработка выборки с использованием программ статистической обработки из математического обеспечения ЭВМ для оценивания средней наработки до отказа  $\bar{T}$ , среднего квадратического отклонения  $\sigma_T$ , вероятности безотказной работы.

При использовании аналитических зависимостей (4.40), (4.41), (4.44) и (4.45) из работы [7] для оценки длительности периода распространения усталостной трещины вместо пунктов 5 и 6 приведенного алгоритма следует применить какую-либо из вышеуказанных аналитических зависимостей.

Предложенной моделью можно пользоваться и при наличии других микродефектов. В этом случае необходимо в зависимости от них определять коэффициент концентрации  $\chi$  и использовать формулу (2).

Разработанные методы рекомендуется использовать при оптимальном проектировании, для задач технической диагностики, а также непосредственно в расчетах. Кроме того, они могут входить как составная часть в пакеты САПР, в экспертные системы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванова В. С., Терентьев В. Ф. Природа усталости металлов. М.: Металлургия, 1975. 455 с.
2. Павлов П. А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность. Л.: Машиностроение, 1988. 252 с.
3. Болотин В. В. Механика зарождения и начального развития усталостных трещин // Физико-химическая механика материалов. 1986. № 1. С. 18–23.
4. Хусу А. П., Витемберг Ю. Р., Пальмов В. А. Шероховатость поверхностей. Теоретико-вероятностный подход / М.: Наука, 1975. 344 с.
5. Комбаров В. С. Оценка триботехнических свойств контактирующих поверхностей. М.: Наука, 1983. 136 с.
6. Справочник технолога-машиностроителя: В 2 т. / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986. Т.1. 655 с.
7. Питухин А. В. Вероятностно-статистические методы механики разрушения и теории катастроф в инженерном проектировании. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1998. 304 с.