

## МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КРИТИЧЕСКОЙ ДЛИНЫ ТРЕЩИНЫ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РЕЗЬБОВЫХ ДЕТАЛЕЙ

Злобин А. С., Кочерова Е. Е., Лунин В. В., Прохоров А. А., Анисимов С. А.  
Самарский университет, г. Самара, [as.zlobin@mail.ru](mailto:as.zlobin@mail.ru)

*Ключевые слова: критическая длина трещины, остаточные напряжения, малоцикловая усталость, резьбовая деталь, трещина, коэффициент интенсивности напряжений*

При оценке циклической долговечности  $N$  деталей, в частности малоцикловой усталости, важным вопросом является выбор предельного состояния материала, при достижении которого конструкция теряет работоспособность.

Потеря работоспособности при циклическом нагружении, как правило, связана с возникновением и ростом усталостных макротрещин. Принято выделять три основных стадии развития трещины:

- зарождение;
- стабильный рост;
- достижение критического размера, вызывающее разрушение.

В зависимости от подхода к прогнозированию малоцикловой усталости в качестве предельного состояния может приниматься завершение (верхняя граница) одной из перечисленных стадий развития трещины. Предельное состояние, соответствующее третьей стадии, используется в концепции безопасного развития трещины (КБРТ). Данная концепция предполагает, что в наиболее напряжённых зонах любой детали сразу после изготовления присутствуют начальные дефекты (трещины), соответствующие технологии изготовления и разрешающей способности методов неразрушающего контроля. Таким образом, с началом работы детали начальный дефект сразу переходит во вторую стадию стабильного роста.

В процессе эксплуатации детали на каждом цикле нагружения длина трещины постепенно увеличивается до тех пор, пока не достигнет критического значения  $l_c$ . Суть КБРТ заключается в том, чтобы ограничить количество циклов нагружения (циклическую долговечность) детали предельным значением, до которого трещина ещё не достигнет критической длины  $l_c$ . Таким образом, критический размер дефекта наряду с прочими факторами определяет циклическую долговечность детали, вследствие чего его корректная оценка является важной задачей при прогнозировании прочности конструкции.

Рассмотрим возможные подходы к оценке критической длины трещины  $l_c$  для резьбовых деталей:

1) Экспериментальное определение критической длины трещины  $l_c$ , [1-3], соответствующей верхней границе третьей стадии (разрушение) или, в запас прочности, верхней границе второй стадии (окончание устойчивого роста). Этот способ наиболее предпочтителен, однако требует проведения трудоёмких испытаний, что не всегда возможно и целесообразно на начальном этапе проектирования.

2) Расчётное определение критической длины трещины  $l_c$ , соответствующей условию потери несущей способности опасного сечения детали:

$$\frac{F}{\pi(r-l_c)^2} \geq \sigma_b, \quad (1)$$

где  $F$  – нагрузка, действующая в опасном сечении;  $r$  – радиус впадины резьбы;  $\sigma_b$  – предел прочности материала детали.

3) Начало ускоренного (неустойчивого) роста КИИ.

Определим величину  $l_c$  перечисленными способами на примере болта М6 из сплава ВТ16, резьба которого сформирована методом накатывания и упрочнена микрошариками. На болт действует растягивающее усилие, изменяющееся за один цикл нагружения от 2000 до 12000 Н.

Нагрузки и распределение остаточных напряжений по глубине упрочнённого слоя приняты в соответствии с монографией [4].

Вначале с помощью программного комплекса ANSYS определялась зависимость КИН от длины трещины. В связи с тем, что в нашем случае трещина является кольцевой, то под её длиной понимается глубина. Остаточные напряжения моделировались с применением метода термоупругости [5-7]. КИН определялся с помощью блока команд CINT [8]. В расчётах принимались следующие характеристики материала: модуль упругости  $E = 1,03 \cdot 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ .

В связи с отсутствием доступных источников информации об экспериментально определённых значениях  $l_c$  или  $K_c$  для титанового сплава ВТ16, воспользуемся данными по сплаву ВТ9, для которого экспериментально определено значение  $K_{23} = 1016$  МПа·мм<sup>0,5</sup>, соответствующее верхней границе второй стадии роста трещины. По результатам расчёта данному значению КИН соответствует длина трещины 0,530 мм. Её можно принять в качестве критической. Исходя из условия (1), болт М6 потеряет прочность при длине трещины, равной:

$$l_c = r - \sqrt{\frac{F}{\pi \sigma_b}} = 2,3866 - \sqrt{\frac{12000}{\pi \cdot 1180 \cdot 10^6}} \cdot 10^3 = 0,587 \text{ мм.}$$

Начало ускоренного роста КИН, когда каждое следующее его значение на порядки превышает предыдущее, соответствует длине трещины 1,419 мм. В табл. 1 приведены значения циклической долговечности  $N$  болта, рассчитанной на основе уравнения Пэриса [9], для полученных критических длин трещин.

Табл. 1 – Результаты расчёта циклической долговечности при различных значениях критической длины трещины

Способ определения $l_c$	1	2	3
$l_c$ , мм	0,530	0,587	1,419
$N$ , циклов	9136	9219	9538
$\delta N$	–	+ 0,9 %	+ 4,4 %

Из данных табл. 1 видно, что хотя критические длины трещины отличаются весьма существенно, однако определённые на их основе значения циклической долговечности достаточно близки между собой. При этом критическая величина дефекта, полученная с использованием третьего способа, не соответствует физике процесса: болт разрушится раньше, чем трещина достигнет указанной длины. Но близкие результаты расчёта малоциклового усталости говорят о том, что этот способ также может быть применён для предварительной оценки  $l_c$  при отсутствии возможности использования первого и второго способов.

Следует отметить, что небольшая разница между полученными значениями циклической долговечности объясняется тем, что при достижении длины, близкой к критической, возникает ускоренное развитие трещины, которая начинает значительно прирастать за каждый цикл нагружения. Противоположная ситуация наблюдается для начального размера дефекта, когда небольшое его увеличение существенно снижает циклическую долговечность детали.

### Список литературы

1. Потапов С.Д., Перепелица Д.Д. Способ обработки результатов испытаний образцов на трещиностойкость с целью определения коэффициентов уравнения Пэриса / Вестник Московского авиационного института, 2010. Т. 17. № 6. С. 49-54.
2. Потапов С.Д., Перепелица Д.Д. Способ обработки результатов испытаний образцов на скорость роста трещины при постоянной амплитуде нагружения / Вестник Московского авиационного института, 2012. Т. 19. № 2. С. 94-100.

3. Потапов С.Д., Перепелица Д.Д. Способ определения скорости роста трещины от циклических нагрузок / Патент РФ № 2469290, 2012. Бюл. № 34.
4. Иванов С.И., Павлов В.Ф., Минин Б.В., Кирпичёв В.А., Кочеров Е.П., Головкин В.В. Остаточные напряжения и сопротивление усталости высокопрочных резьбовых деталей. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2015. 170 с.
5. Сазанов В.П., Чирков А.В., Семёнова О.Ю., Иванова А.В. Моделирование остаточного напряжённого состояния детали в условиях концентрации напряжений с использованием программного комплекса PATRAN/ NASTRAN / Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки, 2012. № 1 (33). С. 106-114.
6. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С., Сазанов В.П. Влияние поверхностного упрочнения на предел выносливости цилиндрических деталей различного диаметра / Известия вузов. Авиационная техника, 2014. № 3. С. 79-81.
7. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1979. 341 с.
8. Морозов Е.М., Муйземнек А.Ю., Шадский А.С. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения. – М.: ЛЕОНАД, 2010. 456 с.
9. Пэрис П., Эрдоган Ф. Критический анализ законов распространения трещин / Техническая механика. Труды Американского общества инженеров механиков, 1963. Серия D. Т. 85. № 4. С. 60-68.

#### Сведения об авторах

Злобин Андрей Сергеевич, аспирант кафедры сопротивления материалов Самарского университета. Область научных интересов: малоцикловая усталость деталей газотурбинных двигателей с остаточными напряжениями.

Кочерова Евгения Евгеньевна, аспирант. Область научных интересов: динамика и прочность деталей ГТД, циклическая долговечность деталей с остаточными напряжениями.

Лунин Валентин Валериевич, канд. техн. наук, ассистент. Область научных интересов: механика остаточных напряжений, механика разрушения.

Прохоров Андрей Александрович, канд. техн. наук, доцент. Область научных интересов: механика остаточных напряжений, механика разрушения.

Анисимов Сергей Алексеевич, аспирант. Область научных интересов: механика остаточных напряжений, механика разрушения.

### **THE METHODS OF CRACK CRITICAL LENGTH EVALUATION UNDER TREADED PARTS CYCLIC DURABILITY DEFINITION**

Zlobin A.S., Kocherova E.E., Lunin V.V., Prohorov A.A., Anisimov S.A.  
Samara National Research University, Samara, Russia, [as.zlobin@mail.ru](mailto:as.zlobin@mail.ru)

*Keywords: crack critical length, residual stresses, low-cycle fatigue, threaded part, crack, stress intensity coefficient*

On the example of bolts M6 made of titanium alloy BT16 three methods of a crack critical depth calculation under cyclic durability of treaded parts definition have been approved. It's been shown that the cyclic durability calculated by three methods differ no more than 4,4% despite the fact that the difference of crack critical lengths was essential.