

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОГО РАЗМЕРА ДЕФЕКТА НА МАЛОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ УПРОЧНЁННЫХ БОЛТОВ М6 ИЗ СПЛАВА ВТ16

Злобин А.С.

Самарский университет, г. Самара, as.zlobin@mail.ru

Ключевые слова: остаточные напряжения, малоцикловая усталость, резьбовая деталь, трещина, коэффициент интенсивности напряжений

Наличие сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое упрочнённых деталей приводит к повышению их циклической долговечности [1, 2]. Это справедливо как для многоциклового, так и для малоциклового усталости (даже с учётом снижения пластичности материала вследствие наклёпа).

При оценке циклической долговечности деталей, работающих в области малоциклового усталости, как правило, используют одно из двух (либо совокупность) предельных состояний:

- образование макротрещины в наиболее напряжённой зоне детали;
- достижение макротрещиной критического размера l_c , влекущее потерю несущей способности и недопустимую деформацию детали.

Второе предельное состояние относится к концепции безопасного развития трещины (КБРТ). В рамках данного подхода предполагается, что в любой детали, в наиболее напряжённых зонах, сразу после изготовления присутствуют начальные дефекты (трещины). До начала эксплуатации эти трещины имеют размер l_0 , который назначается исходя из технологии изготовления и разрешающей способности методов неразрушающего контроля.

В процессе эксплуатации детали на каждом цикле нагружения длина трещины постепенно увеличивается. 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 . Чем больше начальный размер трещины l_0 , тем быстрее она достигнет, при прочих равных условиях, критической длины l_c . Таким образом, размер начального дефекта напрямую влияет на циклическую долговечность.

Рассмотрим это влияние 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 [3]. Вначале с помощью программного комплекса ANSYS определялась зависимость коэффициента интенсивности напряжений (КИН) от длины трещины. В связи с тем, что в нашем случае трещина является кольцевой, здесь под её длиной понимается глубина. Остаточные напряжения моделировались с применением метода термоупругости [4-6]. КИН определялся с помощью блока команд SINT [7]. В расчётах принимались следующие характеристики материала: модуль упругости $E = 1,03 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$. Циклическую долговечность N болта будем определять на основе уравнения Пэриса [8]:

$$\frac{dl}{dN} = C \cdot \Delta K^m, \quad (1)$$

где l – длина трещины; N – количество циклов нагружения; $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ – размах коэффициента интенсивности напряжений. Здесь K_{\max} и K_{\min} – максимальное и минимальное значения коэффициента интенсивности напряжений за цикл нагружения соответственно; C, m – коэффициенты уравнения Пэриса, являющиеся характеристиками материала.

Для определения количества циклов нагружения до разрушения N при различных значениях l_0 преобразуем уравнение (1) и проинтегрируем его методом трапеций:

$$N = \int_{l_0}^{l_c} \frac{1}{C \cdot \Delta K^m} dl. \quad (2)$$

Результаты расчёта показаны на рис. 1. Там же отмечены результаты экспериментального определения циклической долговечности болта, приведённые в монографии [3].

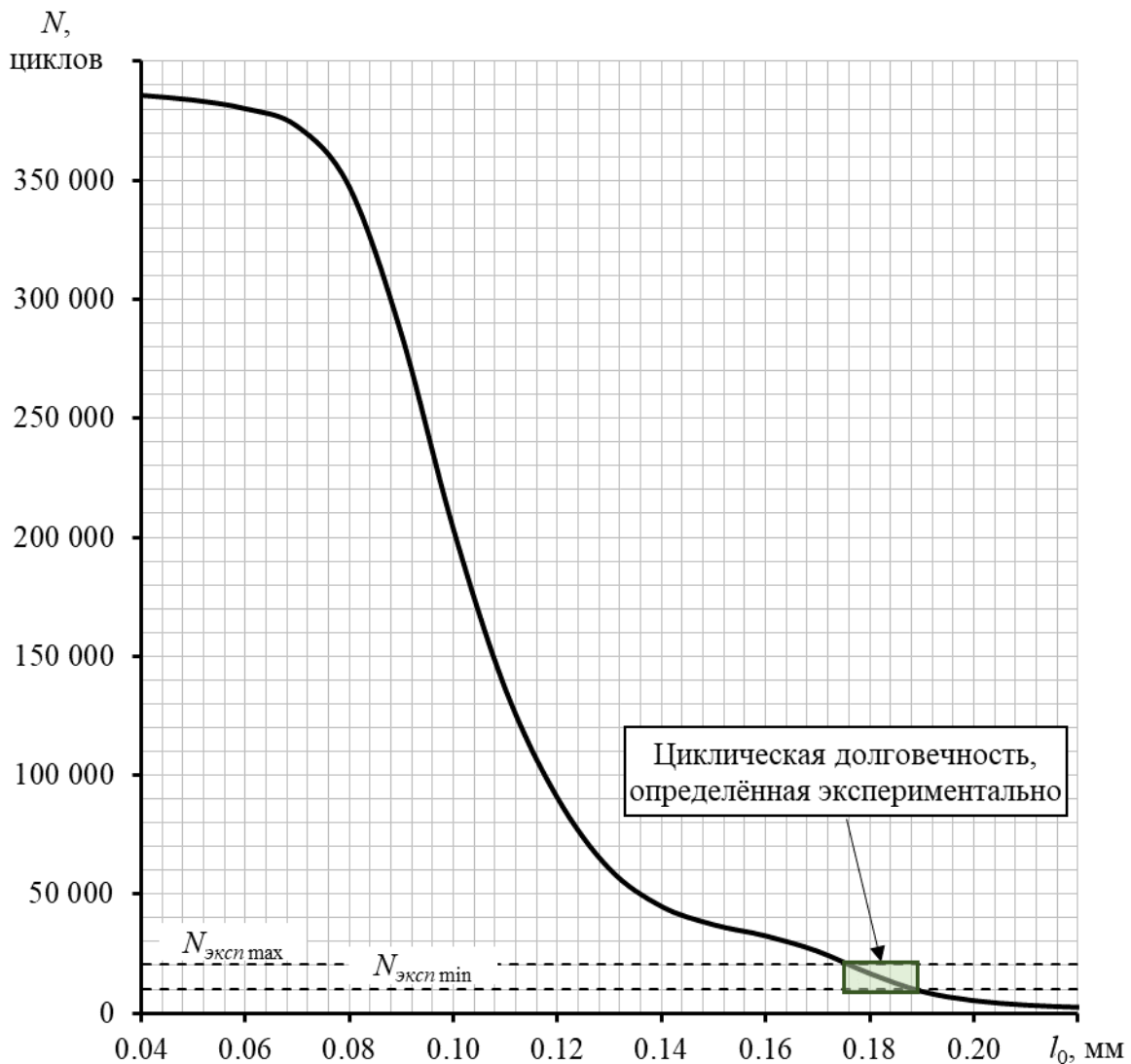


Рис.1 – Зависимость циклической долговечности N от начальной длины трещины l_0

Из рис. 1 видно сильное влияние начальной длины трещины l_0 на циклическую долговечность болта N . При этом малоцикловая усталость, определённая при испытаниях партии болтов, находится в относительно узком диапазоне значений от $N_{\text{эксп min}} = 10147$ до $N_{\text{эксп max}} = 20734$ циклов. Начальные длины трещин при этих испытаниях не определялись. Однако из результатов расчёта следует, что данному диапазону значений циклической долговечности соответствуют весьма существенные размеры начальных дефектов, на порядок превышающие разрешающую способность методов неразрушающего контроля. Это может являться следствием наличия в поверхностном слое резьбы сжимающих остаточных напряжений, которые снижают уровень КИН в вершине трещины.

В то же время маловероятно, что после изготовления болты имели трещины таких размеров. Можно предположить, что начальным дефектом являлась не трещина в явном виде, а перенаклёпанный после упрочнения материал поверхностного слоя резьбы, который начинает

интенсивно разрушаться при циклическом нагружении. Данный вопрос требует дополнительного исследования.

Таким образом, проблема выбора начального размера дефекта при определении малоциклового усталости деталей с остаточными напряжениями является весьма сложной и до настоящего момента окончательно не решённой. Как показали результаты анализа, влияние начального размера дефекта на циклическую долговечность деталей является существенным. Применение в расчётах некорректных значений начальных длин трещин приводит к получению значительно завышенной циклической долговечности. Это следует учитывать при определении ресурсных показателей деталей с использованием изложенного подхода.

Список литературы

1. Карпенко Г.В., Пистун И.П., Куслицкий А.Б. Повышение малоциклового долговечности стальных деталей в рабочих средах методом поверхностного наклёпа / Вестник машиностроения, 1977.+ № 5. С. 65-67.
2. Кудрявцев П.И. Нераспространяющиеся усталостные трещины. – М.: Машиностроение, 1982. 171 с.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1979. 341 с.
7. Морозов Е.М., Муйземнек А.Ю., Шадский А.С. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения. – М.: ЛЕОНАД, 2010. 456 с.
8. 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 авторе

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

THE INFLUENCE OF DEFECT INITIAL SIZE ON THE LOW – CYCLE FATIGUE OF HARDENED BOLTS M6 MADE OF ALLOY BT16

Zlobin A.S.

Samara National Research University, Samara, Russia, as.zlobin@mail.ru

Keywords: residual stresses, low-cycle fatigue, threaded parts, crack, stress intensity coefficient

On the example of bolts M6 made of titanium alloy BT16 it's been shown that the influence of initial defect in a thread on cyclic durability of treaded parts is rather essential. The employment of incorrect values of cracks initial lengths leads to incorrect values of cyclic durability as a result.