

Злобин А.С., Микушев Н.Н., Сазанов В.В., Кошелев А.С.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РЕЗЬБОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СПЛАВА ВТ16 С УЧЁТОМ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Расчёты и оценка малоциклового усталости (МЦУ) деталей в широком диапазоне параметров эксплуатационной нагруженности по температурам, числам циклов, временам нагружения и частотам, воздействиям окружающих сред и рабочих тел проводятся в настоящее время с использованием двух основных предельных состояний [1]:

- 1) по образованию макротрещин в зонах наибольшей местной нагруженности;
- 2) по развитию макротрещин от мест их образования в процессе нагружения или от исходных дефектов, возникших в процессе изготовления.

В первом случае расчёты сводятся к определению допускаемых чисел циклов нагружения N при заданных эксплуатационных уровнях амплитуд местных упругопластических напряжений (деформаций) или к определению допускаемых амплитуд напряжений (деформаций) при числах циклов, равных эксплуатационным.

Вторая стадия малоциклового повреждения связана с развитием трещин.

Методы расчёта числа циклов до образования макротрещины в целом основаны на эмпирических зависимостях и требуют предварительного проведения достаточно большого количества специфических испытаний, что достаточно трудоёмко и не всегда удобно, особенно на стадии проектирования.

Будем рассматривать циклическую долговечность резьбовых деталей на стадии развития макротрещины, считая что в исходной детали уже присутствует некий начальный дефект.

В качестве основы методики расчёта циклической долговечности N используется известное уравнение Пэриса [2]:

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

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

Для использования уравнения (1) при определении циклической долговечности упрочнённой детали в области МЦУ необходимо определить размах КИН ΔK в вершине

трещины, находящейся в поле сжимающих остаточных напряжений для различных значений длины трещины. После этого строится кинетическая диаграмма скорости роста трещины усталости и определяется число циклов нагружения до разрушения N (циклическая долговечность) в соответствии условием разрушения детали по Ирвину:

$$K_{\max} = K_{IC}, \quad (2)$$

где K_{IC} – критическое значений КИН, при котором происходит разрушение детали.

В общем виде методика расчёта МЦУ деталей с остаточными напряжениями включает в себя следующую последовательность действий: 1 – определение условий нагружения; 2 – определение распределения (эпюры) остаточных напряжений в поверхностном слое детали; 3 – определение характеристик материала (E , μ , C , m , K_{th} , K_{IC}); 4 – построение конечно-элементной модели расчётной области детали; 5 – моделирование остаточных напряжений; 6 – приложение нагрузок; 7 – расчёт НДС и КИН в вершине трещины при различной длине трещины; 8 – определение начального размера трещины; 9 – построение кинетической диаграммы скорости роста трещины усталости; 10 – определение числа циклов до разрушения.

В данной работе по описанной методике определялась циклическая долговечность болта М6 из титанового сплава ВТ16. Условия нагружения и распределение остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя принимались по данным, приведённым в работе [3]. Для моделирования остаточных напряжений применён метод термоупругости [4-6].

На рис. 1 показаны эпюры распределения остаточных напряжений по толщине a упрочнённого слоя болта М6, полученные экспериментально и расчётным методом термоупругости за несколько итераций.

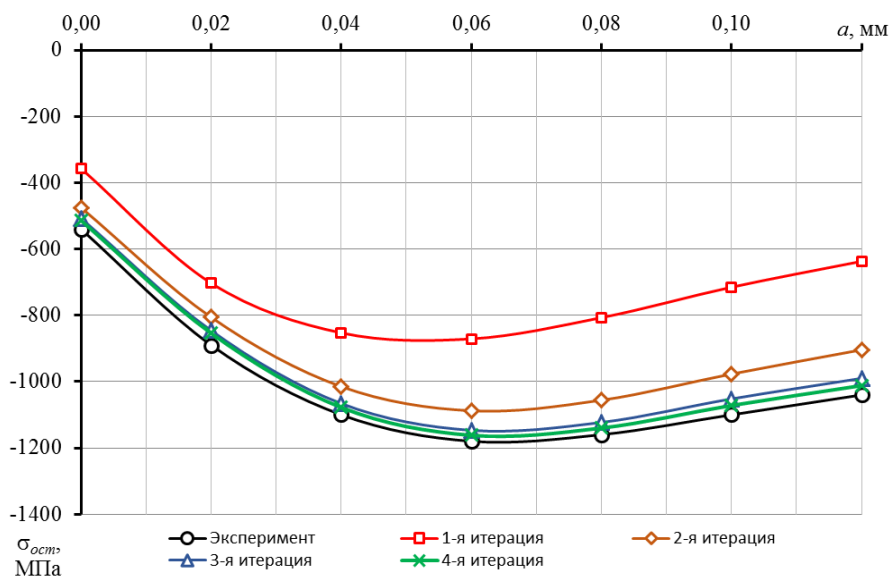


Рис. 1. Экспериментальная и расчётные эпюры распределения остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя болта М6 из сплава ВТ16 после накатывания резьбы и обработки микрошариками

Полученная в результате расчёта зависимость размаха КИН ΔK от длины трещины l для болта М6 из сплава ВТ16 с остаточными напряжениями после накатывания резьбы и обработки микрошариками показана на рис. 2.

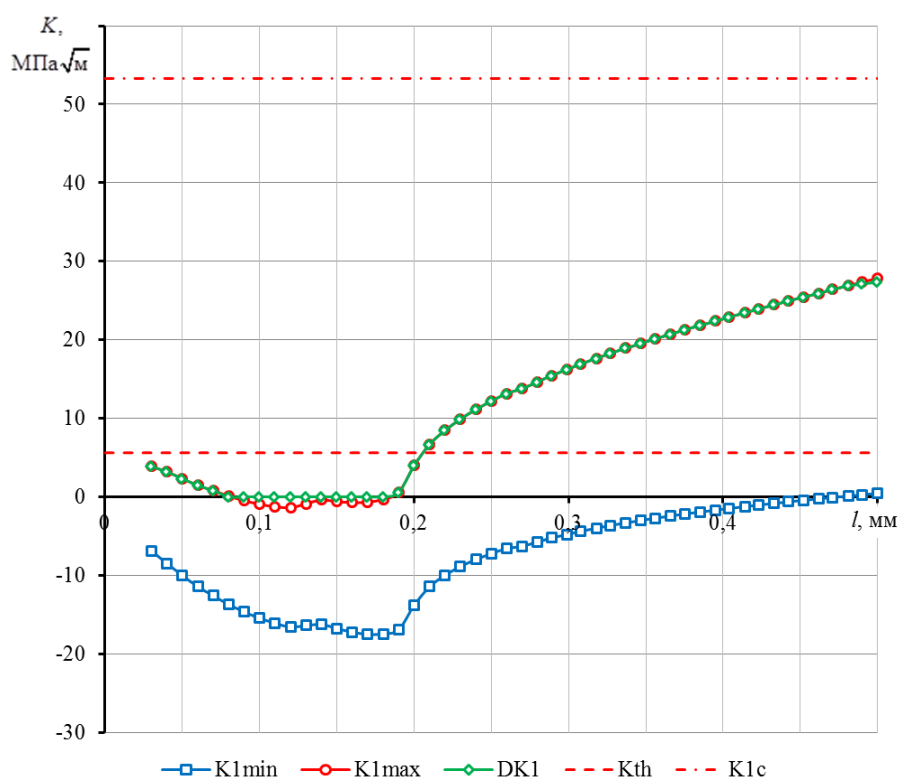


Рис. 2. Зависимость размаха КИН ΔK от длины трещины l для болта М6 из сплава ВТ16 с остаточными напряжениями после накатывания резьбы и обработки микрошариками

В соответствии с критерием Ирвина (2) разрушение наступит при $K_{\max} = K_{1C} = 53,3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, что соответствует $N = 9250$ циклов. По результатам эксперимента [3] данное значение составило $N_{\text{эксн}} = 10147$ циклов. Относительная погрешность расчётного метода составила:

$$\delta N = \left(1 - \frac{N}{N_{\text{эксн}}}\right) \cdot 100 \% = \left(1 - \frac{9250}{10147}\right) \cdot 100 \% = 8,8 \%$$

Таким образом, представленный подход с достаточной точностью позволяет определять циклическую долговечность резьбовых деталей с остаточными напряжениями.

Библиографический список

1. Махутов, Н.А. Механика малоциклового разрушения [Текст] / Н.А. Махутов, М.И. Бурак, М.М. Гаденин. – М.: Наука, 1986. – 264 с.
2. Пэрис, П. Критический анализ законов распространения трещин [Текст] / П. Пэрис, Ф. Эрдоган // Техническая механика. Труды Американского общества инженеров механиков. Серия D. Т. 85. – 1963. – № 4. – С. 60-68.
3. Иванов, С.И. Остаточные напряжения и сопротивление усталости высокопрочных резьбовых деталей [Текст] / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов, Б.В. Минин, В.А. Кирпичёв, Е.П. Кочеров, В.В. Головкин. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2015. – 170 с.
4. Вакулюк, В.С. Применение метода термоупругости при конечно-элементном моделировании остаточного напряжённого состояния в поверхностно упрочнённых деталях [Текст] / В.С. Вакулюк, В.П. Сазанов, В.К. Шадрин, Н.Н. Микушев, А.С. Злобин // Известия СНЦ РАН. – 2014. – Т. 16. – № 4. – С. 168-174.
5. Сазанов, В.П. Исследование влияния первоначальных радиальных деформаций на распределение остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом цилиндре [Текст] / В.П. Сазанов, В.С. Вакулюк, С.А. Михалкина // Известия СНЦ РАН. – 2014. – Т. 16. – № 4. – С. 163-167.
6. Сазанов, В.П. Определение первоначальных деформаций в упрочнённом слое цилиндрической детали методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса PATRAN/NASTRAN [Текст] / В.П. Сазанов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк, В.Ф. Павлов // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19. – №2 (68). – С. 35-40.