

Злобин А.С., Кочерова Е.Е., Анохин Д.В., Киселёв П.Е.

**ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
НА КОЭФФИЦИЕНТ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ
В РЕЗЬБОВЫХ ДЕТАЛЯХ ИЗ СПЛАВА ВТ16**

Известно, что сжимающие остаточные напряжения значительно увеличивают циклическую долговечность деталей с концентраторами.

В качестве одного из подходов к оценке данной величины можно рассматривать определение циклической долговечности на стадии развития макротрещины, считая что в исходной детали уже присутствует начальный дефект. В этом случае проводится расчётная оценка влияния остаточных напряжений на скорость роста трещины усталости и соответствующее приращение числа циклов до разрушения.

Такой подход оправдан тем, что, во-первых, даёт более консервативную оценку («в запас»), во-вторых, в деталях, как правило, всегда присутствуют исходные повреждения, которые могут не выявляться методами неразрушающего контроля.

Размер начального повреждения (трещины) назначается исходя из минимального размера дефекта, фиксируемого методами неразрушающего контроля. В случае, если данную величину определить затруднительно, то начальная длина трещины принимается равной 50 мкм (в соответствии с методическими рекомендациями ЦИАМ).

В качестве основы методики расчёта циклической долговечности N в области малоциклового усталости (МЦУ) используется линейная механика разрушения, в частности, известное уравнение Пэриса [1]:

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

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.

Использование КИН в качестве параметра, обобщающего условия нагружения материала при вершине трещины, удобно тем, что он позволяет использовать результаты лабораторных испытаний на стандартных образцах при расчёте реальных деталей. В работе [2] установлено, что коэффициенты уравнения Пэриса, определённые на стандартных образцах, не имевших предварительного упрочнения, практически

соответствуют коэффициентам для образцов с остаточными напряжениями, что также позволяет использовать их для расчёта МЦУ реальных деталей.

Таким образом, основная расчётная часть оценки МЦУ деталей с остаточными напряжениями сводится к определению КИН в зоне концентратора.

Исследование влияния остаточных напряжений на КИН проводилось на примере болта М6 из титанового сплава ВТ16 с использованием экспериментальных данных [3], полученных при испытаниях на гидравлической установке ПСУ-2К.

Испытания проводились по следующей технологии. Болты монтировались в цепочку по 10 штук. Нагружение осуществлялось усилием растяжения по асимметричному знакопостоянному циклу (минимальная нагрузка $P_{\min} = 2,0$ кН, максимальная нагрузка $P_{\max} = 12,0$ кН). Все детали доводились до разрушения. Разрушившиеся детали заменяли в цепочке аналогичными деталями. Сопротивление МЦУ оценивалось по числу циклов до разрушения N .

Распределение остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}}$ по глубине a поверхностного слоя показано на рис. 1.

На сегодняшний день наиболее удобным и универсальным инструментом моделирования условий нагружения и вычисления НДС, особенно для деталей сложной формы, является МКЭ, реализованный в различных программных комплексах, таких как ANSYS и NASTRAN. Поскольку задача решается методами линейной механики разрушения в упругой постановке, то для моделирования остаточных напряжений может быть применён метод термоупругости [4-7], основанный на решении задачи о первоначальных деформациях [8].

Зависимости КИН K_1 от длины трещины l , рассчитанные для болта М6 из сплава ВТ16 с остаточными напряжениями (после накатывания резьбы и обработки микрошариками) и без них, показаны на рис. 2. На рисунке также обозначены предел запираания трещины K_{th} и критический КИН K_{1C} .

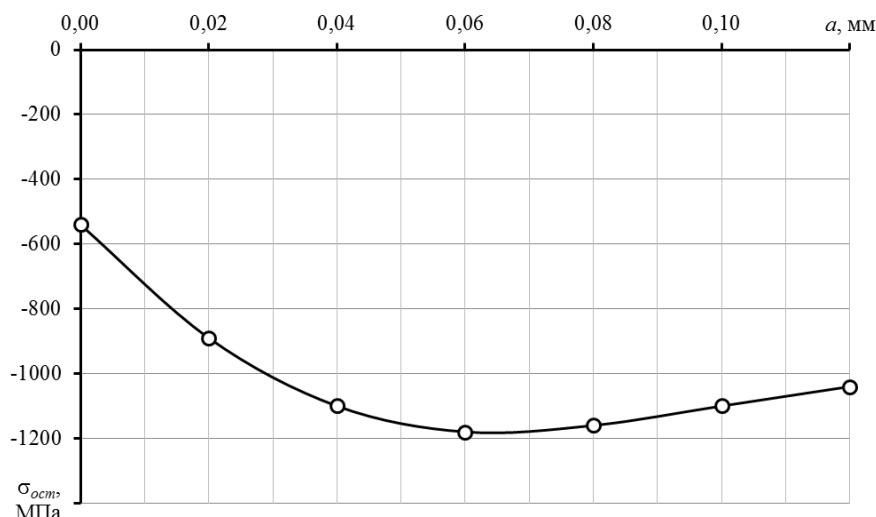


Рис. 1. Распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя болта М6 из сплава ВТ16 после накатывания резьбы и обработки микрошариками

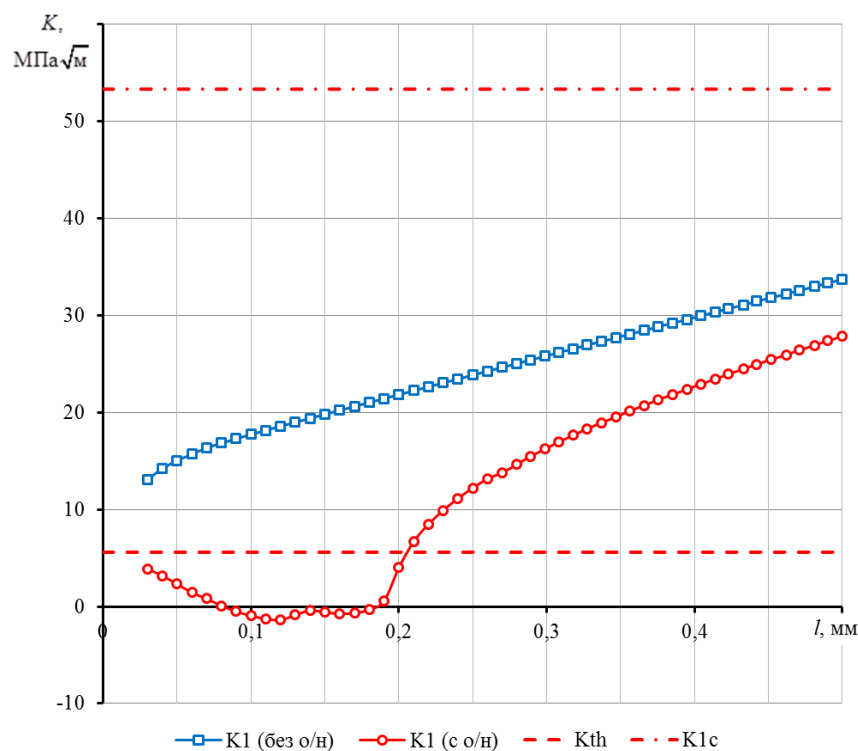


Рис. 2. Зависимость КИН K_1 от длины трещины l для болта М6 из сплава ВТ16

Из рис. 2 видно, что наличие остаточных напряжений приводит к изменению характера распределения КИН в поверхностном слое и снижению его величины ниже уровня K_{th} . В данном случае рост трещины возможен при размере начального дефекта $l \geq 0,2$ мм ($K_{max} \geq K_{th}$). Такой размер начального повреждения может быть вызван перенаклёпом материала поверхностного слоя после упрочнения.

Таким образом, в результате исследования показано, что сжимающие остаточные напряжения существенно снижают величину КИН, а соответственно и скорость развития

трещины вплоть до её полной остановки. Данные результаты подтверждают возможность повышения циклической долговечности деталей при упрочнении даже в области МЦУ.

Библиографический список

1. 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.

2. Потапов, С.Д. Исследование влияния остаточных напряжений в зоне расположения трещины на скорость её роста при циклическом нагружении [Текст] / С.Д. Потапов, Д.Д. Перепелица // Вестник Московского авиационного института. – 2014. – Т. 21. – № 1. – С. 104-110.

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.

7. Саушкин, М.Н. Конечно-элементное моделирование распределения остаточных напряжений в сплошных упрочнённых цилиндрических образцах с полукруглым надрезом [Текст] / М.Н. Саушкин, А.Ю. Куров // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. Науки. – 2011. – № 3 (24). – С. 72-78.

8. Биргер, И. А. Остаточные напряжения [Текст] / И.А. Биргер. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.