

Злобин А.С., Анохин Д.В., Гусева А.С., Матвеева К.Ф.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА
ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ОТ ДЛИНЫ ТРЕЩИНЫ
В УПРОЧНЁННОМ СЛОЕ БОЛТОВ М6 ИЗ СПЛАВА ВТ16**

Известно [1, 2], что остаточные напряжения в поверхностном слое благоприятно влияют на сопротивление деталей малоциклового усталости путём торможения развития трещин (даже с учётом снижения пластичности материала вследствие наклёпа).

Наиболее существенный положительный эффект наличия остаточных напряжений проявляется в деталях с концентраторами, например, после их упрочнения методами поверхностного пластического деформирования. В этом случае релаксация сжимающих остаточных напряжений в области концентратора оказывается затруднённой даже при перегрузке материала за предел упругости [3]. В связи с этим детали с концентраторами, резьбовые детали в частности, представляют наибольший интерес для исследования влияния остаточных напряжений на характеристики усталости.

Одним из широко применяемых подходов к оценке циклической долговечности деталей является определение скорости роста трещины усталости, выраженное через уравнение Пэриса [4]:

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

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

Коэффициент интенсивности напряжений определяет поле напряжений при вершине трещины, а также то, что происходит внутри зоны пластичности. Другими словами, КИН является мерой всех напряжений и деформаций. Когда напряжения и деформации при вершине трещины достигают критических значений, происходит расширение трещины. В качестве условия разрушения детали принимается критерий Ирвина [5]:

$$K_{\max} = K_{1C}. \quad (2)$$

где K_{1C} – критическое значение КИН.

Применение 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.

Следовательно, чем ниже значение КИН, тем дольше (за большее количество циклов нагружения) происходит развитие трещины до достижения ею критического размера, при котором наступает разрушение детали.

В настоящем исследовании расчётным методом оценивалось влияние остаточных напряжений на КИН на примере болта М6 из титанового сплава ВТ16. Для определения напряжённо-деформированного состояния в вершине трещины использовался метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе ANSYS.

Нагружение болта осуществлялось усилием растяжения по асимметричному знакопостоянному циклу (минимальная нагрузка $P_{\min} = 2,0$ кН, максимальная – $P_{\max} = 12,0$ кН).

Распределение остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}}$ по толщине a поверхностного слоя впадин болта принято на основе экспериментальных данных [6] и показано на рис. 1.

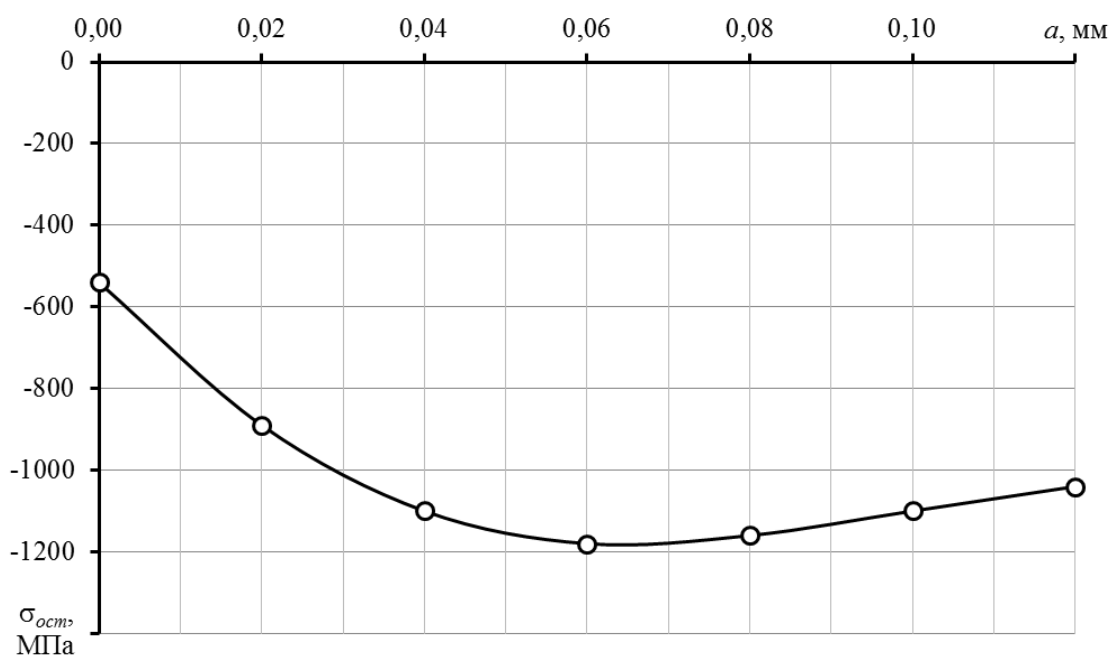


Рис. 1. Распределение остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя впадин болта М6 из сплава ВТ16 после накатывания резьбы и обработки микрошариками

Для моделирования остаточных напряжений применялся метод термоупругости [7-10], основанный на решении задачи о первоначальных деформациях [11].

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

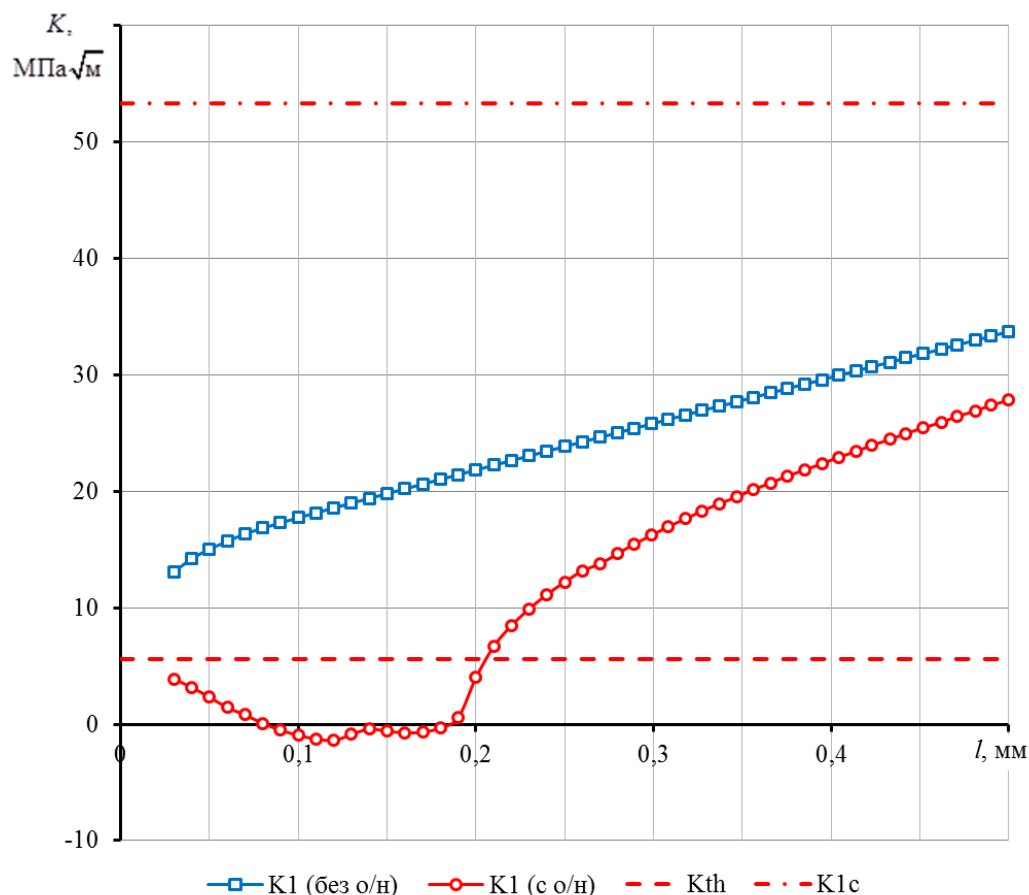


Рис. 2. Зависимость КИН K_1 от длины трещины l для болта М6 из сплава ВТ16

Из рис. 2 видно, что наличие сжимающих остаточных напряжений приводит к изменению характера распределения КИН в поверхностном слое и снижению его величины ниже уровня K_{th} , то есть к прекращению роста трещины.

Таким образом, 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 поверхностном упрочнении даже в области малоциклового усталости.

Библиографический список

1. Карпенко, Г.В. Повышение малоциклового долговечности стальных деталей в рабочих средах методом поверхностного наклёпа [Текст] / Г.В. Карпенко, И.П. Пистун, А.Б. Куслицкий и др. // Вестник машиностроения. – 1977. – № 5. –С. 65-67.

2. Кудрявцев, П.И. Нераспространяющиеся усталостные трещины. [Текст] / П.И. Кудрявцев. – М.: Машиностроение, 1982. – 171 с.
3. Тарасов, В.П. Исследование влияния поверхностного пластического деформирования на малоцикловую прочность конструкционных металлов [Текст]: дисс. канд. техн. наук: 01.02.03. – Волгоград, 1979. – 185 с.
4. Пэрис, П. Критический анализ законов распространения трещин [Текст] / П. Пэрис, Ф. Эрдоган // Техническая механика. Труды Американского общества инженеров механиков. – 1963. – Серия D. – Т. 85. – № 4. – С. 60-68.
1. 5 Irwin G.R. Analysis of stresses and strain near the end of a crack traversing a plate // J. Appl. Mech. 1957. V. 24, No 3. P. 361-364.
5. 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: Издательство СНЦ РАН, 2015. – 170 с.
6. Вакулук, В.С. Применение метода термоупругости при конечно-элементном моделировании остаточного напряжённого состояния в поверхностно упрочнённых деталях [Текст] / В.С. Вакулук, В.П. Сазанов, В.К. Шадрин, Н.Н. Микушев, А.С. Злобин // Известия СНЦ РАН. –2014. – Т. 16. – № 4. – С. 168-174.
7. Сазанов, В.П. Исследование влияния первоначальных радиальных деформаций на распределение остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом цилиндре [Текст] / В.П. Сазанов, В.С. Вакулук, С.А. Михалкина // Известия СНЦ РАН. – 2014. – Т. 16. – № 4. – С. 163-167.
8. 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. Вакулук, В.Ф. Павлов // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19. – № 2 (68). – С. 35-40.
9. Саушкин, М.Н. Конечно-элементное моделирование распределения остаточных напряжений в сплошных упрочнённых цилиндрических образцах с полукруглым надрезом [Текст] / М.Н. Саушкин, А.Ю. Куров // Вестник СамГТУ. Серия Физ.-мат. Науки, 2011. – № 3 (24). – С. 72-78.
10. Биргер, И.А. Остаточные напряжения [Текст] / И.А. Биргер. М.: Машгиз, 1963. – 232 с.