

Злобин А.С., Вакулюк В.С., Кочерова Е.Е., Анохин Д.В.

**ВЛИЯНИЕ СПОСОБА УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ
ДЕТАЛИ НА КОЭФФИЦИЕНТ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ
В ВЕРШИНЕ ТРЕЩИНЫ**

Упрочнение деталей, основанное на пластическом деформировании их поверхностного слоя и, как следствие, возникающих в нём сжимающих остаточных напряжений, широко используется в машиностроении для увеличения ресурсных показателей изделий, в первую очередь циклической долговечности [1, 2]. При этом наиболее значительный положительный эффект от упрочнения проявляется в деталях с концентраторами напряжений (проточками, переходами между участками с разными диаметрами, отверстиями и т.п.). Характерными представителями деталей такого типа являются резьбовые. Проведённые исследования [3] показали, что упрочнение поверхности впадин резьбы позволяет добиться существенного повышения характеристик малоциклового усталости болтов и шпилек из различных конструкционных материалов.

Распределение остаточных напряжений в упрочнённом слое можно определить расчётным способом через первоначальные деформации [4]. При этом осевые ε_{0z} , окружные $\varepsilon_{0\theta}$ и радиальные ε_{0r} компоненты первоначальных деформаций могут находиться в различных соотношениях между собой в зависимости от способа пластического деформирования поверхности (пневмо- и гидродробеструйная обработка, обработка микрошариками, обкатка роликами, алмазное выглаживание и т. д.).

Так, например, пневмо- и гидродробеструйной обработке, а также обработке микрошариками соответствует следующее соотношение между компонентами деформаций [5]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{0z} &= \varepsilon_{0\theta} = \varepsilon_0; \\ \varepsilon_{0r} &= -2\varepsilon_0.\end{aligned}$$

На практике для определения циклической долговечности методами механики разрушения широко применяется уравнение Пэриса [6]:

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

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 коэффициента интенсивности напряжений за цикл нагружения

соответственно; C, m – коэффициенты уравнения Пэриса, являющиеся характеристиками материала.

Коэффициент интенсивности напряжений K является параметром, обобщающим условия нагружения материала в вершине трещины, а величина ΔK , как видно из уравнения (1), определяет скорость роста трещины.

В качестве критерия достижения предельного состояния материала при определении циклической долговечности деталей применяют критерий Ирвина [7]:

$$K_{\max} \geq K_C, \quad (2)$$

где K_C – критическое значение КИН, при достижении которого начинается ускоренный (неустойчивый) рост трещины и происходит потеря работоспособности детали.

Проведём анализ влияния остаточных напряжений, возникающих в болте М6 из титанового сплава ВТ16, на КИН в зависимости от длины трещины при различных способах обработки поверхности впадин резьбы.

Рассмотрим четыре расчётных случая, приведённых в табл. 1.

Таблица 1 – Расчётные случаи

№ расчётного случая	Вид обработки впадин болта	Остаточные напряжения (осевая компонента)
1	накатывание резьбы и отжиг при температуре 500 °С	отсутствуют
2	накатывание резьбы и обработка микрошариками	соответствуют эпюре 2 (рис. 1)
3	накатывание резьбы, отжиг при температуре 500 °С и обработка микрошариками	соответствуют эпюре 3 (рис. 1)
4	накатывание резьбы и отжиг при температуре 780 °С	соответствуют эпюре 4 (рис. 1)

Эпюры остаточных напряжений, соответствующие расчётным случаям 2, 3 и 4 показаны на рис. 1. Вертикальная ось соответствует осевым остаточным напряжениям σ_z , горизонтальная – глубине поверхностного слоя a .

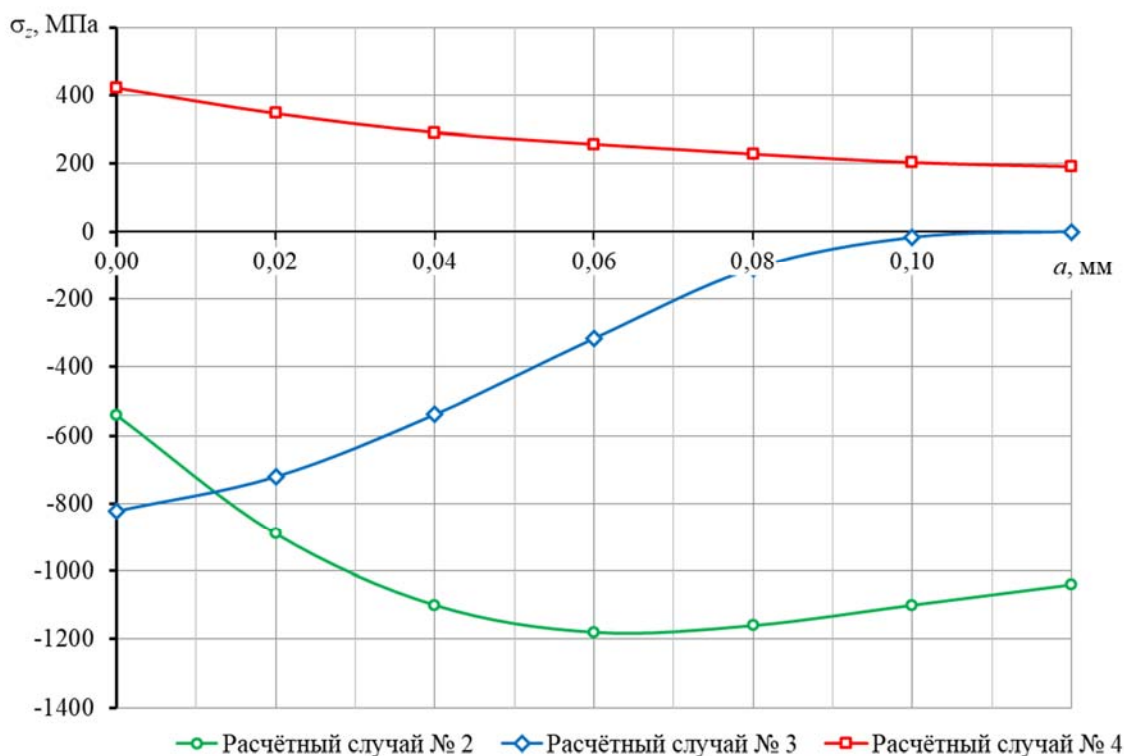


Рис. 1. Эпюры осевых остаточных напряжений, соответствующие расчётным случаям 2, 3 и 4

Болт нагружается растягивающим усилием, изменяющимся за цикл нагружения от 2000 до 12000 Н.

Для определения КИН использовался блок команд CINT [8] программного комплекса ANSYS. Остаточные напряжения моделировались с применением метода термоупругости [9-11]. В расчётах принимались следующие характеристики материала: модуль упругости $E = 1,03 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

На рис. 2 показаны полученные в результате расчёта зависимости величины K_{max} от длины трещины l . Видно, что в зависимости от способа упрочнения поверхностного слоя изменяется длина трещины, при которой K_{max} достигает критического значения K_c в соответствии с критерием Ирвина (2). Таким образом, чем выше уровень сжимающих напряжений, тем до бóльшей длины должна развиваться трещина, чтобы материал достиг предельного состояния (потерял работоспособность).

Кроме того, расчётные зависимости величины ΔK от длины трещины l , отображённые на рис. 3, показывают, что в области упрочнённого слоя сжимающие остаточные напряжения снижают скорость роста трещины. При этом растягивающие остаточные напряжения не приводят к увеличению скорости роста трещины относительно случая, когда упрочнение поверхностного слоя отсутствует.

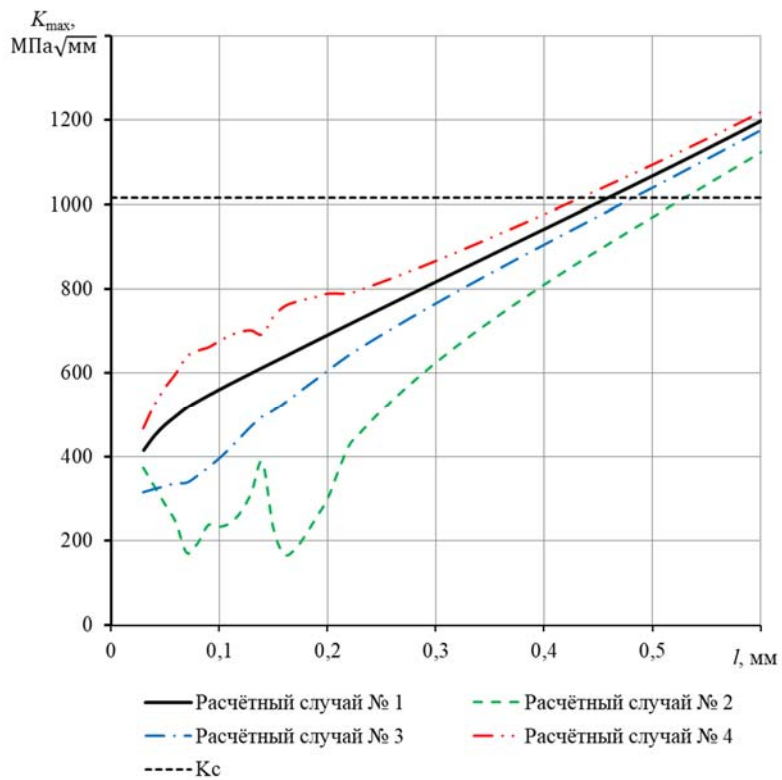


Рис. 2. Зависимости величины K_{\max} от длины трещины l , соответствующие расчётным случаям 2, 3 и 4

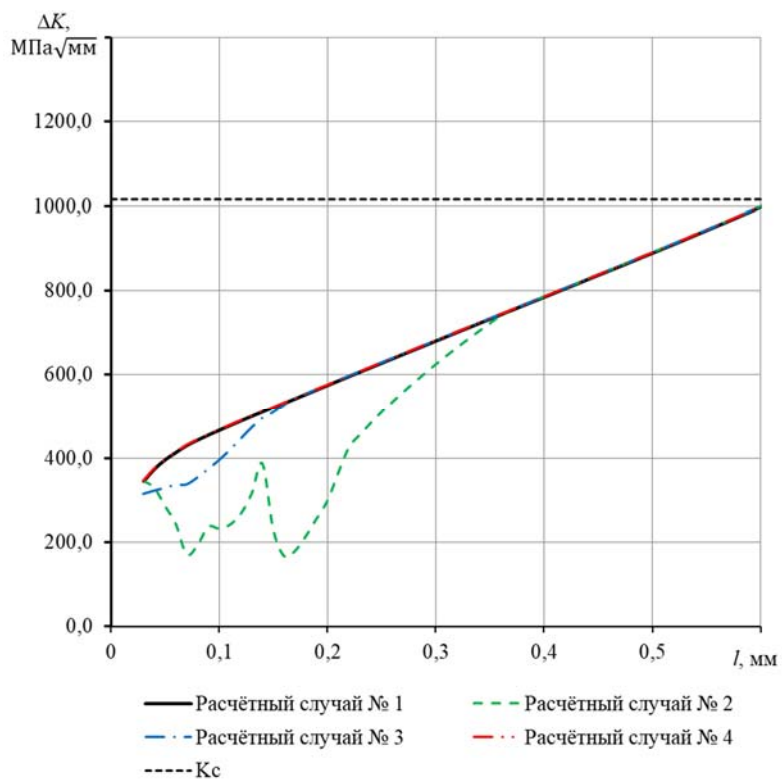


Рис. 3. Зависимости величины ΔK от длины трещины l , соответствующие расчётным случаям 2, 3 и 4

Это объясняется тем, что при сочетании значительных сжимающих напряжений и небольшого растягивающего усилия величина K_{\min} в упрочнённом слое является отрицательной. Соответственно размах КИН в этом случае будет равен $\Delta K = K_{\max} - 0$, то есть уменьшится, что приведёт в соответствии с уравнением (1) к снижению скорости роста трещины относительно случая, когда остаточные напряжения отсутствуют или являются растягивающими.

Тогда как в одинаковых условиях внешнего нагружения, для всех уровней растягивающих остаточных напряжений одинаковым остаётся и размах КИН $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$, а следовательно, и скорость роста трещины.

Также из рис. 3 следует, что после того, как длина трещины превышает толщину упрочнённого слоя, скорость роста трещины становится одинаковой для всех расчётных случаев.

Выводы

1. Чем выше уровень сжимающих остаточных напряжений, тем больше должна быть длина трещины, чтобы величина K_{\max} достигла критического значения K_c , то есть с увеличением сжимающих остаточных напряжений увеличивается критическая длина трещины. При действии растягивающих остаточных напряжений критическая длина трещины уменьшается.

2. Если внешние нагрузки не превышают сжимающие остаточные напряжения, то скорость роста трещины снижается в связи с уменьшением размаха КИН, так как K_{\min} принимается равным нулю.

3. Размах КИН, а следовательно, и скорость роста трещины, остаются одинаковыми для случаев, когда остаточные напряжения отсутствуют, являются растягивающими, а также если они являются сжимающими, но минимальные нагрузки цикла нагружения превышают (преодолевают) их.

4. Сжимающие остаточные напряжения увеличивают циклическую долговечность деталей за счёт одновременного действия двух факторов:

- снижения скорости роста трещины в области упрочнённого слоя;
- увеличения критической длины трещины.

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. 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.
4. Биргер, И.А. Остаточные напряжения [Текст] / И.А. Биргер. М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
5. Сазанов, В.П. О влиянии первоначальных радиальных деформаций на развитие усталостной трещины упрочнённых деталей из конструкционных сталей [Текст] / В.П. Сазанов, О.Ю. Семёнова, А.В. Письмаров, Д.С. Чуриков // Материалы XI Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи». – 2019. – Т. 1. – С. 168-171.
6. 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.
7. 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.
8. Морозов, Е.М. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения [Текст]/ Е.М. Морозов, А.Ю. Муйземнек, А.С. Шадский. М.: ЛЕОНАД, 2010. – 456 с.
9. Сазанов, В.П. Моделирование остаточного напряжённого состояния детали в условиях концентрации напряжений с использованием программного комплекса PATRAN/ NASTRAN [Текст]/ В.П. Сазанов, А.В. Чирков, О.Ю. Семёнова, А.В. Иванова // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки, 2012. – № 1 (33). – С. 106-114.
10. Павлов, В.Ф. Влияние поверхностного упрочнения на предел выносливости цилиндрических деталей различного диаметра [Текст]/ В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичев, В.С. Вакулюк, В.П. Сазанов // Известия вузов. Авиационная техника, 2014. – № 3. – С. 79-81.
11. Тимошенко, С.П. Теория упругости [Текст]/ С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. М.: Наука, 1979. – 341 с.