

В данной модели за x_{1-3} приняты режимные параметры обработки, а за b_{1-12} ограничения. При этом b_1 – ограничение, связанное со стойкостью шлифовального круга, b_2 – ограничение, связанное с мощностью станка, b_3 – ограничение, связанное с точностью обработки, b_4 – ограничение, связанное с температурой обработки, b_5 – ограничение, связанное с шероховатостью после обработки, b_6 – ограничение, связанное с остаточными напряжениями, b_{7-12} – ограничения, связанные с кинематическими возможностями станка, f_0 – целевая функция оптимизации.

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет отойти от нормативного принципа назначения режимов резания и подобрать наиболее оптимальный режим с точки зрения производительности обработки.

Библиографический список

1. Скуратов, Д.Л. Обработка конструкционных материалов. Процессы резания и режущие инструменты. Ч.1: учеб. пособие / Д.Л. Скуратов, В.Н. Трусов. – Самара: изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. – 196 с.
2. Skuratov D.L., Fedorov D.G. Temperature fields in grinding by abrasive wheels / Russian Engineering Research // Allerton Press Inc., Volume 37, Issue 6, 2017, Pages 557-560.

УДК 621.787:539.319

Злобин А.С., Вакулюк В.С., Кочерова Е.Е., Сургутанов Н.А., Пилипив О.М.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БОЛТОВ М6 ИЗ СПЛАВА ВТ16 В ВЕРШИНЕ КОЛЬЦЕВОЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Под малоцикловой усталостью понимается усталость материала, при которой усталостное повреждение или разрушение происходит при упругопластическом деформировании [1].

Разрушение от малоцикловой усталости – это разрушение в условиях повторного упругопластического деформирования с числом циклов (к моменту образования макротрещины или окончательному разрушению) до $5 \cdot 10^4 \dots 10^5$, которое является условной границей малоцикловой $10 \dots 10^5$ и многоцикловой $10^5 \dots 10^8$ усталости для пластичных материалов и определяет среднее число циклов для зоны перехода от упругопластического к упругому циклическому деформированию. Для высокопрочных материалов переходная зона смещена в сторону большей долговечности, для хрупких – в сторону меньшей долговечности [2].

Существуют различные способы расчётной оценки малоциклового усталости деталей. Среди них широкое применение получил подход на основе концепции безопасного развития повреждения. Данная концепция предполагает наличие исходного дефекта детали уже в начале её эксплуатации. Критерием исчерпания циклической долговечности является развитие макротрещин от мест их образования в процессе нагружения или от исходных дефектов, возникших в процессе изготовления, до критических размеров, приводящих к потере несущей способности или недопустимым деформациям конструкции.

Для определения критического размера трещины (предельного состояния), как правило, используется критерий Дж. Ирвина [3]:

$$K_{\max}(l) \geq K_C, \quad (1)$$

где K_{\max} – максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений (КИН) в вершине трещины за цикл нагружения; K_C – критическое значение КИН, соответствующее разрушению детали K_{1C} или, в запас прочности, окончанию устойчивого роста K_{2-3} .

Расчёт числа циклов до наступления предельного состояния проводится с помощью методов механики разрушения, в частности на основе уравнения Пэриса (и его модификаций) [4]:

$$\frac{dl}{dN} = C \cdot \Delta K^m, \quad (2)$$

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

Использование методов механики разрушения подразумевает выполнение расчётов (определение КИН) в упругой постановке, что, с первого взгляда, не вполне корректно для случая малоциклового усталости, при которой возникают упругопластические деформации материала. Однако при выполнении определённых критериев (условий), определение КИН в упругой постановке допустимо для анализа малоциклового усталости. Рассмотрим некоторые из них.

Если после нескольких циклов нагрузки-разгрузки характеристики упругопластического цикла в зоне концентрации стабилизируются, то материал, получив упрочнение, продолжает работать в условиях упругого напряжённо-деформированного состояния с новым значением предела текучести. Такое допущение справедливо при выполнении следующего условия [5, 6]:

$$\sigma_e < 2\sigma_T, \quad (3)$$

где σ_e – квазиупругие напряжения в полцикле нагружения; σ_T – предел текучести материала.

Другим условием возможности использования механики разрушения является учёт зоны пластичности, которая для плоского деформированного состояния может быть определена по формуле [7]:

$$r_p^* \approx \frac{1}{6\pi} \frac{K_{\max}^2}{\sigma_T^2}, \quad (4)$$

где r_p^* – расстояние от вершины трещины до края зоны пластичности.

При возникновении значительных пластических деформаций на процесс разрушения существенное влияние оказывает концентрация деформаций у вершины трещины, в результате чего происходит притупление трещины. В этом случае для определения раскрытия трещины используется приём «увеличения» длины трещины на величину зоны пластической деформации r_p^* .

Рассмотрим напряжённо-деформированное состояние болта М6 из сплава ВТ16 в вершине кольцевой трещины при малоцикловом нагружении и оценим возможность применения механики разрушения для расчёта его циклической долговечности. Примем, что нагружение осуществляется усилием растяжения по асимметричному знакопостоянному циклу (минимальная нагрузка $P_{\min} = 2,0$ кН, максимальная – $P_{\max} = 12,0$ кН). Критическая глубина трещины, при которой произойдёт разрушение болта составляет 0,451 мм. Предел текучести материала $\sigma_T = 920$ МПа.

На рис. 1 показана зависимость квазиупругих напряжений σ_e от глубины трещины l . Видно, что в нашем случае условие (3) выполняется.

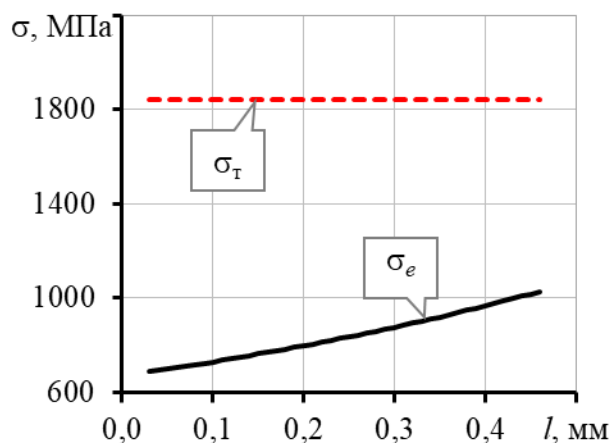


Рис. 1. Зависимость квазиупругих напряжений σ_e от глубины трещины l

На рис. 2 показаны зависимости радиуса зоны пластичности r_p^* от глубины трещины l в абсолютном и относительном видах. Считается, что если радиус зоны пластичности не превышает 20 % от глубины трещины, то расчёт КИН можно выполнять без поправки на эту зону. В нашем случае данное условие выполняется для основного диапазона глубин трещины.

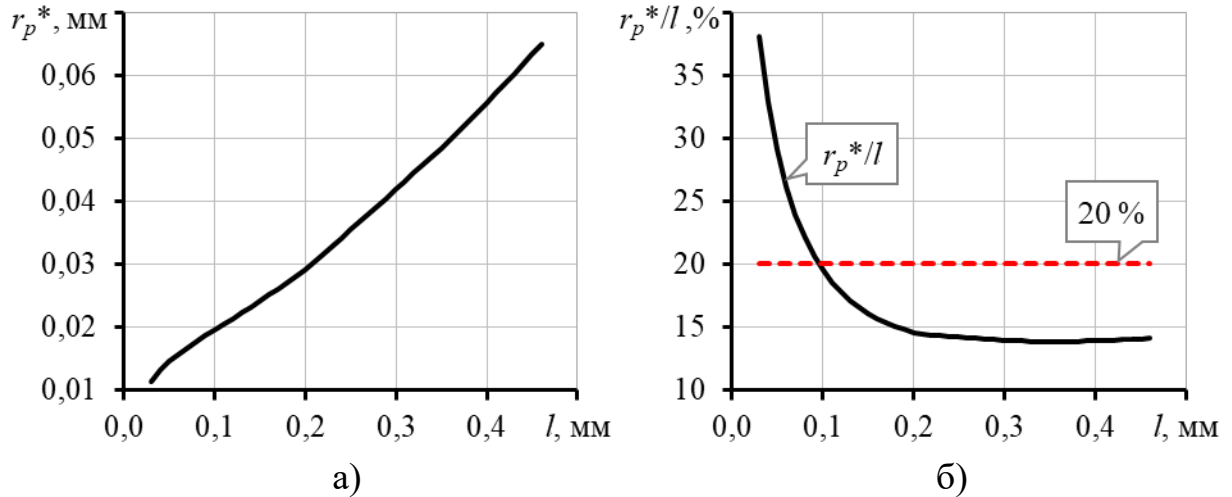


Рис. 2. Зависимости радиуса зоны пластичности r_p^* от глубины трещины l :
 а) – в абсолютном выражении; б) – в относительном выражении

Дополнительно пластические деформации в области вершины трещины были вычислены методом конечных элементов. На рис. 3 показано распределение пластических деформаций для трещины глубиной 0,03 мм (а) и 0,50 мм (б). Длина зоны пластичности в направлении роста трещины составила приблизительно 0,005 и 0,010 мм, соответственно, то есть 17 % и 2 % относительно глубин трещины, что в обоих случаях удовлетворяет заданному критерию (менее 20 %).

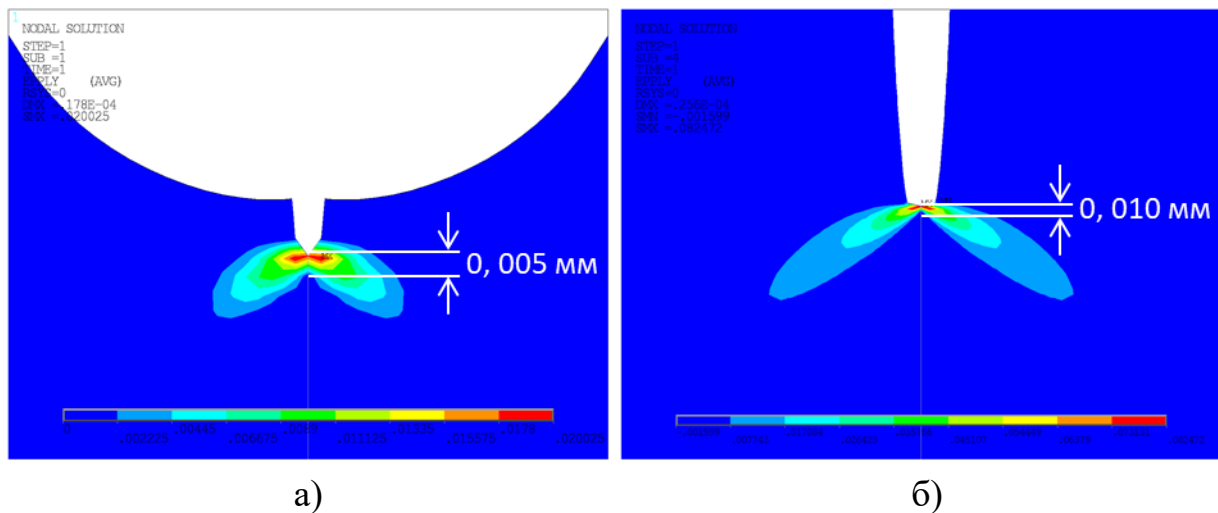


Рис. 3. Распределение пластических деформаций в области вершины трещины глубиной: а) 0,03 мм; б) 0,50 мм

Таким образом, в результате проведённого анализа напряжённо-деформированного состояния болта М6 из сплава ВТ16 в вершине кольцевой трещины при различных значениях её глубины подтверждена возможность применения методов механики разрушения, а следовательно, и концепции безопасного развития повреждения, для расчёта малоциклового усталости резьбовых деталей.

Библиографический список

1. ГОСТ 23207-78. Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения. – Введ. 1978–07–07. М.: Издательство стандартов, 1981. – 48 с.
2. Махутов, Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: В 2 ч. / Н.А. Махутов; отв. ред. К.В. Фролов, В.В. Москвичев. – Новосибирск: Наука, 2005. – Ч. 1: Критерии прочности и ресурса. – 494 с.
3. 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.
4. Пэрис, П. Критический анализ законов распространения трещин / П. Пэрис, Ф. Эрдоган // Техническая механика. Труды Американского общества инженеров механиков – 1963. – Серия D. – Т. 85. – № 4. – С. 60-68.
5. Биргер, И.А. Сопротивление материалов / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлютов. – М: Наука, 1986. – 560 с.
6. Потапов, С.Д. Исследование влияния остаточных напряжений в зоне расположения трещины на скорость её роста при циклическом нагружении / С.Д. Потапов, Д.Д. Перепелица // Вестник Московского авиационного института. – 2014. – Т. 21. – № 1. – С. 104-110.
7. Броек, Д. Основы механики разрушения / Д. Броек. – М.: Высшая школа, 1980. – 368 с.