

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДНЕИНТЕГРАЛЬНЫХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КИН В ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЯХ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ

Злобин А.С.², Вакулюк В.С.¹, Сазанов В.П.¹, Сургутанов Н.А.¹, Исаев Н.Е.¹

¹Самарский университет, г. Самара, as.zlobin@mail.ru

²ПАО «ОДК-Кузнецов», г. Самара, as.zlobin@uec-kuznetsov.ru

Ключевые слова: коэффициент интенсивности напряжений, остаточные напряжения, сопротивление усталости, резьбовые детали.

Остаточные напряжения существенно влияют на характеристики сопротивления усталости деталей. Особенно это влияние проявляется в элементах конструкции с концентраторами напряжений. При этом для осесимметричных деталей данный эффект удобно оценивать с помощью среднеинтегральных остаточных напряжений.

В работах [1–3] было показано, что существует зависимость между среднеинтегральными остаточными напряжениями $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ и циклической долговечностью резьбовых деталей N . Кроме того отмечено, что остаточные напряжения влияют на величину коэффициента интенсивности напряжений (КИН) K у вершины трещины.

Исходя из этого, можно сделать предположение, что должна существовать зависимость $K = f(\bar{\sigma}_{\text{ост}})$ между КИН и среднеинтегральными остаточными напряжениями. Если такая зависимость существует, то для упрощения расчёта циклической долговечности деталей возможно вычислять КИН без учёта остаточных напряжений (обозначим его K_0) и, зная зависимость среднеинтегральных остаточных напряжений от глубины трещины $\bar{\sigma}_{\text{ост}} = f(t)$, корректировать полученное значение КИН с учётом наличия остаточных напряжений. В этом случае процесс определения циклической долговечности схематично можно представить следующим образом:

$$\left. \begin{array}{l} K_0(t, \sigma_{\text{ост}} = 0) \\ \sigma_{\text{ост}}(t) \rightarrow \bar{\sigma}_{\text{ост}}(t) \end{array} \right\} \rightarrow K[t, \sigma_{\text{ост}}(t)] \rightarrow N.$$

Полученную Дж. Р. Ирвином [4] связь между напряжениями и КИН в зоне вершины трещины в простейшем виде можно записать следующим образом:

$$K = \sigma \sqrt{\pi a}, \quad (1)$$

где a – характерный размер трещины.

Предположим, что величина КИН включает две составляющие:

$$K = K_0 + K_{\text{ОН}}, \quad (2)$$

где K_0 – составляющая от напряжений, вызванных рабочими нагрузками на деталь; $K_{\text{ОН}}$ – составляющая от остаточных напряжений.

Поскольку среднеинтегральные остаточные напряжения – это остаточные напряжения на дне трещины с точностью до постоянного коэффициента, зависящего от радиуса у дна трещины и её глубины, с учётом (1) запишем:

$$K_{\text{ОН}} = \bar{\sigma}_{\text{ост}} \sqrt{\pi t}. \quad (3)$$

Для примера рассмотрим напряжённое состояние резьбовой части болта М6 из титанового сплава ВТ16, нагруженного осевым усилием 12 кН. В поверхностном слое действуют сжимающие остаточные напряжения, вызванные накатыванием резьбы и её последующей обработкой микрошариками. Распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя впадины резьбы показано на рис. 1. Данные приведены из монографии [5].

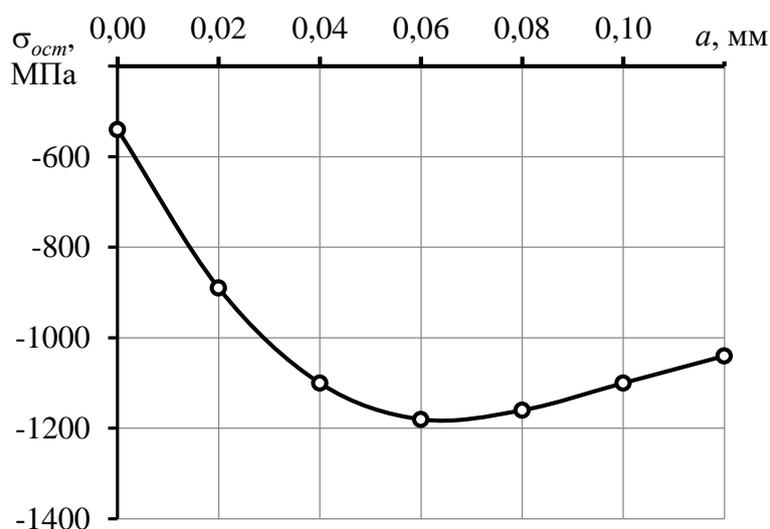


Рисунок 1 – Распределение остаточных напряжений по глубине a поверхностного слоя болта М6 из сплава ВТ16 после накатывания резьбы и обработки микрошариками

Определим КИН для разных глубин трещины t двумя способами: «прямым» расчётом с использованием метода конечных элементов и с использованием формул (1–3). В первом случае остаточные напряжения моделируются с помощью метода термоупругости (подробно методика и примеры расчёта изложены в работе [3]). Во втором случае с использованием метода конечных элементов определяются только значения K_0 , остаточные напряжения при этом не моделируются, а учитываются за счёт добавления соответствующих величин K_{OH} в соответствии с формулой (2). Результаты расчётов и их сравнение приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты расчёта КИН

t , мм	«Прямой» расчёт МКЭ	Расчёт с учётом формул (1–3)				Δ , %
	K , МПа $\sqrt{мм}$	K_0 , МПа $\sqrt{мм}$	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	K_{OH} , МПа $\sqrt{мм}$	K , МПа $\sqrt{мм}$	
0,03	158,5	427,0	-862,5	-264,8	162,2	-2,4
0,04	125,6	458,4	-934,8	-331,4	127,0	-1,1
0,05	90,2	481,6	-990,5	-392,6	89,0	1,3
0,06	56,3	500,4	-1030,1	-447,2	53,2	5,5
0,07	25,4	516,5	-1055,2	-494,8	21,7	14,6
0,08	-10,3*	531,1	-1068,1	-535,4	-4,3*	–
0,09	-28,8*	544,8	-1071,8	-569,9	-25,1*	–
0,10	-35,3*	557,9	-1069,6	-599,5	-41,6*	–
0,11	-37,1*	570,7	-1064,1	-625,6	-54,9*	–
0,12	-32,8*	583,3	-1056,2	-648,5	-65,2*	–

* При $K < 0$, исходя из физического смысла КИН, принимается $K = 0$.

Из табл. 1 видно, что использование формулы (2) для вычисления КИН даёт хорошее совпадение с результатами «прямого» расчёта. При этом вычисление КИН существенно упрощается, так как отпадает необходимость моделирования остаточных напряжений. Значения КИН, меньшие нуля, не имеют физического смысла и при определении циклической долговечности приравниваются к нулю. Для повышения точности предложенного способа в дальнейшем необходимо провести дополнительные исследования по уточнению формулы (3) с учётом сложного напряжённо-деформированного состояния в зоне вершине трещины осесимметричных деталей с концентраторами.

Список литературы

1. Злобин, А.С. Оценка влияния остаточных напряжений на малоцикловую усталость резьбовых деталей / Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва, 2015. Т. 14. № 4. С. 118-125.
2. Злобин А.С. Связь характеристик малоциклового и многоциклового усталости резьбовых деталей с остаточными напряжениями / Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение, 2018. Т.17. № 1. С. 128-136
3. Злобин А.С. Влияние остаточных напряжений на малоцикловую усталость резьбовых деталей: диссертация кандидата технических наук: 01.02.06 / Злобин Андрей Сергеевич. Самара, 2022. 138 с.
4. Irwin G.R. Analysis of stresses and strain near the end of a crack traversing a plate / J. Appl. Mech. 1957. V. 24. № 3. PP. 361-364.
5. Иванов С.И., Павлов В.Ф., Минин Б.В., Кирпичёв В.А., Кочеров Е.П., Головкин В.В. Остаточные напряжения и сопротивление усталости высокопрочных резьбовых деталей. Самара: Издательство СНЦ РАН, 2015. 170 с.

Сведения об авторах

Злобин Андрей Сергеевич, к.т.н., главный конструктор. Область научных интересов: динамика и прочность деталей авиационных газотурбинных двигателей.

Вакулюк Владимир Степанович, д.т.н., доцент, профессор кафедры сопротивления материалов. Область научных интересов: механика остаточных напряжений, механика разрушения.

Сазанов Вячеслав Петрович, к.т.н., без звания, доцент кафедры сопротивления материалов. Область научных интересов: механика остаточных напряжений, механика разрушения.

Сургутанов Николай Андреевич, к.т.н., без звания, доцент кафедры сопротивления материалов. Область научных интересов: механика остаточных напряжений, механика разрушения.

Исаев Никита Евгеньевич, студент гр. 2301 Самарского университета. Область научных интересов: механика остаточных напряжений, механика разрушения.

THE USE OF AVERAGE INTEGRAL RESIDUAL STRESSES FOR THE DETERMINATION OF SIF IN AXISYMMETRIC PARTS WITH CONCENTRATORS

Zlobin A.S.², Vakulyuk V.S.¹, Sazanov V.P.¹, Surgutanov N.A.¹, Isaev N.E.¹

¹Samara University, Samara, Russia, as.zlobin@mail.ru

²JSC «UEC-Kuznetsov», Samara, Russia, as.zlobin@uec-kuznetsov.ru

Keywords: stress intensity factor, residual stresses, fatigue resistance, threaded parts.

The paper proposes a method for calculating the stress intensity factor in axisymmetric parts with concentrators using average integral residual stresses. This method doesn't require to modeling residual stresses for evaluate its effect of residual stresses on the fatigue resistance.