

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ СРЕДНЕИНТЕГРАЛЬНЫХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Злобин А.С.², Селиванова Е.Е.¹, Селищев П.А.¹, Кретов К.С.¹, Хамматов М.Т.¹

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

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

Ключевые слова: остаточные напряжения, сопротивление усталости, резьбовые детали.

В настоящее время вопросам исследования и нормирования остаточных напряжений, возникающих в деталях авиационной техники под воздействием конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, уделяется большое внимание. Это связано с тем, что величина, глубина залегания и характер распределения остаточных напряжений оказывают существенное влияние на характеристики сопротивления усталости.

Научной школой кафедры сопротивления материалов Самарского университета, на основе решения задачи [1] о перераспределении остаточных усилий после нанесения надреза полуэллиптического профиля на упрочнённую поверхность, разработан [2, 3] критерий – среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$, – учитывающий распределение остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя и позволяющий оценивать их влияние на сопротивление усталости резьбовых деталей. В работе [4] установлены закономерности влияния среднеинтегральных остаточных напряжений на малолоцикловую усталость резьбовых деталей. При этом данный критерий имеет чётко выраженный физический смысл – остаточные напряжения на дне трещины с точностью до постоянного коэффициента, зависящего от радиуса у дна трещины и её глубины.

На рис. 1 схематично изображена трещина усталости в резьбовой детали. Здесь

t – глубина трещины, $\nu = \arccos \frac{y}{t}$.

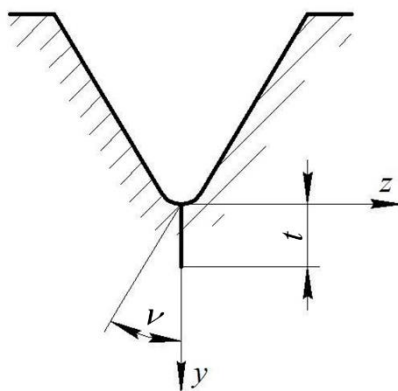


Рисунок 1 – Трещина усталости в резьбовой детали

Зная исходное (до образования трещины) распределение остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}}(y)$ по глубине поверхностного слоя (в сечении $z = 0$), среднеинтегральные остаточные напряжения можно вычислить по формуле:

$$\bar{\sigma}_{\text{ост}} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sigma_{\text{ост}}(\nu) d\nu. \quad (1)$$

Главное преимущество среднеинтегральных остаточных напряжений перед другими критериями влияния заключается в том, что они являются комплексной характеристикой остаточных напряжений в вершине трещины, то есть учитывают их величину, глубину залегания и характер распределения. Таким образом, данный критерий удобно использовать

для исследования влияния остаточных напряжений на характеристики сопротивления усталости.

В монографии [5] для вычисления интеграла (1) предлагается использовать формулу Симпсона:

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sigma_{\text{ост}}(v) dv = \frac{\frac{\pi}{2} - 0}{6n} \left[\sigma_{\text{ост}0} + \sigma_{\text{ост}2n} + 2(\sigma_{\text{ост}2} + \sigma_{\text{ост}4} + \dots + \sigma_{\text{ост}2n-2}) + 4(\sigma_{\text{ост}1} + \sigma_{\text{ост}3} + \dots + \sigma_{\text{ост}2n-1}) \right]. \quad (2)$$

Диапазон $\left[0; \frac{\pi}{2}\right]$ изменения угла v условно разделяется на чётное количество равных частей, границы которых обозначаются как v_j , где $j = 0, 1, \dots, 2n$. Величины остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}j}$ в формуле (2) соответствуют глубинам поверхностного слоя $y_j = t \cdot \cos v_j$.

Однако, если требуется вычислить среднеинтегральные остаточные напряжения для трещины разной глубины t или установить зависимость $\bar{\sigma}_{\text{ост}} = f(t)$, использование формулы (2) будет весьма трудоёмким, поскольку для каждой величины t необходимо каждый раз заново определять значения $2n$, v_j , y_j , и $\sigma_{\text{ост}j}$. В связи с этим вычисление $\bar{\sigma}_{\text{ост}} = f(t)$ с использованием формулы Симпсона (2) практически нельзя автоматизировать.

В работе [4] показано, что зависимость остаточных напряжений от глубины поверхностного слоя детали удобно представлять в виде полинома:

$$\sigma(y) = \sum_{i=0}^k b_i \cdot y^i. \quad (3)$$

Коэффициенты b_i (формула (3)) определяются с помощью аппроксимирования экспериментальных данных методом наименьших квадратов. Тогда можно записать:

$$\sigma(v) = \sum_{i=0}^n b_i \cdot (t \cdot \cos v)^i. \quad (4)$$

С учётом формулы (4) запишем выражение для вычисления среднеинтегральных напряжений в следующем виде:

$$\bar{\sigma}_{\text{ост}} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sigma(v) dv = \frac{2}{\pi} \sum_{i=0}^n \int_0^{\frac{\pi}{2}} b_i \cdot t^i \cdot \cos^i v dv = \frac{2}{\pi} \cdot \sum_{i=0}^n b_i \cdot t^i \cdot I_i, \quad (5)$$

где $I_i = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^i v dv$.

В работе [4] показано, что в большинстве случаев $k = 6$ обеспечивает достаточную точность аппроксимации. С учётом этого в табл. 1 приведены вычисленные аналитическим способом значения определённых интегралов I_i (формула (5)), где $i = 0, 1, \dots, 6$.

Таблица 1 – Значения интегралов I_i

I_0	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6
$\frac{\pi}{2}$	1	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{3\pi}{16}$	$\frac{8}{15}$	$\frac{5\pi}{32}$

Используя данные табл. 1, запишем формулу зависимости среднеинтегральных остаточных напряжений от глубины трещины $\bar{\sigma}_{\text{ост}}(t)$ при известном исходном

(до образования трещины) распределении остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя (3):

$$\bar{\sigma}_{\text{ост}} = b_0 + \frac{2}{\pi} \cdot b_1 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot b_2 \cdot t^2 + \frac{4}{3\pi} \cdot b_3 \cdot t^3 + \frac{3}{8} \cdot b_4 \cdot t^4 + \frac{16}{15\pi} \cdot b_5 \cdot t^5 + \frac{5}{16} \cdot b_6 \cdot t^6. \quad (6)$$

Полученное выражение (6) позволяет напрямую, без выполнения дополнительных действий, вычислять среднеинтегральные остаточные напряжения для любого значения t и, следовательно, автоматизировать эту процедуру при исследовании влияния остаточных напряжений на характеристики усталости резьбовых деталей.

Список литературы

1. Иванов С.И., Шатунов М.П., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом / Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. Куйбышев: КуАИ, 1974. Вып. 1. С. 88-95.
2. Павлов В.Ф. Влияние характера распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя детали на сопротивление усталости / Известия вузов. Машиностроение, 1987. № 7. С. 3-6.
3. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений / Известия вузов. Машиностроение, 1986. № 8. С. 29-32.
4. 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.
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.

Селиванова Евгения Евгеньевна, аспирант кафедры сопротивления материалов. Область научных интересов: динамика и прочность деталей ГТД, циклическая долговечность деталей с остаточными напряжениями.

Селищев Павел Александрович, аспирант кафедры сопротивления материалов. Область научных интересов: механика остаточных напряжений, механика разрушения.

Кретов Кирилл Сергеевич, студент гр. 2301 Самарского университета. Область научных интересов: механика остаточных напряжений, механика разрушения.

Хамматов Марсель Тагирович, студент гр. 2303 Самарского университета. Область научных интересов: механика остаточных напряжений, механика разрушения.

AUTOMATION OF CALCULATIONS AVERAGE INTEGRAL RESIDUAL STRESSES

Zlobin A.S.², Selivanova E.E.¹, Selishchev P.A.¹, Kretov K.S.¹, Hammatov M.T.¹

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

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

Keywords: residual stresses, fatigue resistance, threaded parts.

The subject of this paper is automation of calculations average integral residual stresses. This criterion allows us to evaluate the effect of residual stresses on the fatigue resistance of threaded parts. The paper proposes a method for calculating the average integral residual stresses, which requires a minimum number of actions and allows automating this procedure.