

Павлов В.Ф., Букатый А.С., Кочерова Е.Е., Шляпников П.А.

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
НА МНОГОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ ДЕТАЛЕЙ
С РАЗЛИЧНЫМИ КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ**

После упрочнения различными методами в поверхностном слое деталей изменяется структура, возникают наклёп и сжимающие остаточные напряжения. Основную роль в повышении сопротивления усталости упрочнённых деталей с концентраторами играют сжимающие остаточные напряжения [1]. Для оценки влияния остаточных напряжений на предел выносливости таких деталей применяются два критерия. Первым критерием являются остаточные напряжения на поверхности концентратора. Зависимость для определения приращения предела выносливости $\Delta P_R(\Delta\sigma_R, \Delta\tau_R)$ упрочнённой детали в этом случае имеет вид

$$\Delta P_R = \psi_P \cdot |\sigma_z^{нов}|, \quad (1)$$

где $\psi_P(\psi_\sigma, \psi_\tau)$ – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию $\sigma_z^{нов}$; $\sigma_z^{нов}$ – осевые (меридиональные) остаточные напряжения на поверхности концентратора опасного сечения детали. Другие компоненты остаточного напряжённого состояния в соответствии с теорией наибольших касательных напряжений не участвуют, так как радиальные остаточные напряжения на поверхности концентратора равны нулю, а окружные остаточные напряжения являются промежуточными главными напряжениями [2].

При достаточно больших переменных напряжениях, близких к пределу выносливости, в упрочнённых деталях с концентраторами всегда возникают нераспространяющиеся усталостные трещины [3]. В связи с этой особенностью сопротивления усталости в работе [4] было предложено принять за критерий остаточные напряжения на дне нераспространяющейся трещины, в качестве которых рассматриваются дополнительные остаточные напряжения, возникающие за счёт перераспределения остаточных усилий упрочнённой детали в результате образования трещины.

Для определения второго критерия в работе [4] использовалось решение задачи [5] о дополнительных остаточных напряжениях в наименьшем сечении поверхностно упрочнённой детали после нанесения на неё надреза полуэллиптического профиля. Выделив основную часть решения [5], можно получить второй критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ – критерий среднеинтегральных остаточных напряжений – влияния остаточных напряжений на предел выносливости упрочнённой детали в виде

$$\bar{\sigma}_{ocm} = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad (2)$$

где $\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в опасном сечении детали; $\xi = y/t_{кр}$ – расстояние от дна концентратора до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$; $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе детали на пределе выносливости.

Приращение предела выносливости $\Delta P_R(\Delta\sigma_R, \Delta\tau_R)$ упрочнённой детали с концентратором напряжений при использовании критерия $\bar{\sigma}_{ocm}$ определяется по следующей формуле:

$$\Delta P_R = \bar{\psi}_P \cdot |\bar{\sigma}_{ocm}|, \quad (3)$$

где $\bar{\psi}_P(\bar{\psi}_\sigma, \bar{\psi}_\tau)$ – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{ocm}$.

В работах [6, 7] для упрочнённых различными методами поверхностного упрочнения деталей и образцов из различных материалов с различными концентраторами напряжений при растяжении-сжатии, изгибе и кручении было экспериментально установлено, что критическая глубина $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости зависит только от размеров опасного поперечного сечения и для цилиндрических деталей определяется соотношением

$$t_{кр} = 0,0216D, \quad (4)$$

где D – диаметр опасного сечения детали.

По результатам большого числа экспериментов, проведённых в НИЛ-31 и на кафедре сопротивления материалов Самарского университета [7], установлено:

– для различных методов поверхностного упрочнения, степенях наклёпа, размерах и формах концентраторов, асимметриях цикла напряжений для оценки предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами обосновано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений, вычисляемого по толщине поверхностного слоя опасного сечения, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости;

– критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости в опасном сечении упрочнённых деталей с концентраторами напряжений определяется только размерами поперечного сечения и не зависит от вида поверхностного упрочнения, материала, последовательности изготовления и упрочнения концентратора, наклёпа, типа и размеров концентратора, величины сжимающих остаточных напряжений, типа деформации и асимметрии цикла напряжений;

– для исследованных видов поверхностного упрочнения (гидро- и пневмодробеструйная обработка, обкатка роликом, алмазное выглаживание, обработка

микрошариками, азотирование, цементация, борирование), различных материалов (сталь, сплавы на основе никеля, титан, алюминии), степеней равномерного и неравномерного наклёпа, величин (-29 – -2200 МПа) и характера распределения сжимающих остаточных напряжений, типов и размеров концентраторов, поперечных размеров деталей критерий среднеинтегральных остаточных напряжений хорошо отражает связь между остаточными напряжениями и приращением предела выносливости;

– коэффициент $\bar{\psi}_p(\bar{\psi}_\sigma, \bar{\psi}_\tau)$ влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений зависит от типа деформации (изгиб, растяжение-сжатие и кручение), асимметрии цикла и степени концентрации напряжений. По результатам исследования предложены методики учёта влияния этих факторов при определении коэффициента $\bar{\psi}_p(\bar{\psi}_\sigma, \bar{\psi}_\tau)$;

– критерий среднеинтегральных остаточных напряжений может быть использован и в случае работы детали при повышенной температуре, но при этом в расчёт необходимо брать остаточные напряжения детали в конце её ресурса, то есть с учётом релаксации. Эти напряжения можно определить путём термоэкспозиции;

– оценка предела выносливости упрочнённых деталей по величине сжимающих остаточных напряжений на поверхности опасного сечения не представляется возможной, так как соответствующий коэффициент влияния $\bar{\psi}_p(\bar{\psi}_\sigma, \bar{\psi}_\tau)$ в проведённых экспериментах при симметричном цикле изменяется в широких пределах – до 38 раз.

Библиографический список

1. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений и наклёпа на усталостную прочность [Текст] / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов // Проблемы прочности. – 1976. – №5. – С. 25-27.
2. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений на выносливость ненаклёпанного материала [Текст] / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов // Вопросы прикладной механики в авиационной технике. – Куйбышев: КуАИ, 1973. – Вып. 66. – С. 70-73.
3. Кудрявцев, П.И. Нераспространяющиеся усталостные трещины [Текст] / П.И. Кудрявцев. – М.: Машиностроение, 1982. – 171 с.
4. Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений [Текст] / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.
5. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом [Текст] / С.И. Иванов, М.П. Шатунов, В.Ф. Павлов // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1974. – Вып.1. – С. 88-95.
6. Павлов, В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение I. Сплошные детали [Текст] / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. 1988. №8. С. 22-26.
7. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулук. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.