

Павлов В. Ф., Букатый А. С., Семёнова О. Ю., Михалкина С. А., Щербаков И. В.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ

После поверхностного пластического деформирования (ППД) в поверхностном слое деталей изменяется структура, возникают наклёп и сжимающие остаточные напряжения. Известно [1], что основную роль в повышении сопротивления усталости упрочнённых деталей с концентраторами играют сжимающие остаточные напряжения. Для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости таких деталей используются два критерия. Первым критерием являются остаточные напряжения на поверхности опасного сечения детали. Зависимость для определения предела выносливости в этом случае имеет вид

$$P_R = P_R^0 - \psi_P \cdot \sigma_z^{ног}, \quad (1)$$

где $P_R^0(\sigma_R^0, \tau_R^0)$ – предел выносливости неупрочнённой детали, $\psi_P(\psi_\sigma, \psi_\tau)$ – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости, $\sigma_z^{ног}$ – осевые (меридиональные) остаточные напряжения на поверхности концентратора в опасном сечении детали. Другие компоненты остаточного напряжённого состояния в соответствии с третьей теорией предельных напряжённых состояний не участвуют, так как радиальные напряжения на поверхности концентратора $\sigma_\rho = 0$, а окружные σ_θ являются промежуточными главными напряжениями [2].

Обычно зависимость (1) записывается для приращения предела выносливости в виде

$$\Delta P_R = \psi_P \cdot \left| \sigma_z^{ног} \right|, \quad (2)$$

На практике, при упрочнении деталей ППД, часто наблюдается подповерхностный максимум сжимающих остаточных напряжений, то есть к поверхности деталей напряжения уменьшаются. Этот спад бывает весьма существенным. Иногда остаточные напряжения снижаются к поверхности до нуля и даже становятся растягивающими [3], однако увеличение предела выносливости наблюдается и в этих случаях. Так, например, авторами исследования [4] определялись остаточные напряжения и сопротивление усталости азотированных и упрочнённых роликом стальных цилиндрических образцов. После нагрева и выдержки этих образцов при температуре 150°C и 200°C наблюдалось уменьшение сжимающих остаточных напряжений на поверхности и их увеличение на некотором расстоянии от неё, в результате чего повышался предел выносливости.

Вышеизложенное говорит о том, что критерий оценки влияния поверхностного упрочнения деталей с концентраторами по остаточным напряжениям должен базироваться на учёте остаточных напряжений не только на поверхности, но и по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали.

При достаточно больших переменных напряжениях, близких к пределу выносливости, в упрочнённых деталях с концентраторами всегда возникают нераспространяющиеся усталостные трещины. В связи с этой особенностью сопротивления усталости в [5] 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. При этом исходные остаточные напряжения детали на дне трещины не учитываются в силу их малости по сравнению с дополнительными.

Для определения второго критерия в [5] использовалось решение задачи [6] о дополнительных остаточных напряжениях в наименьшем сечении поверхностно упрочнённой детали после нанесения на неё надреза полуэллиптического профиля. Выделив основную часть решения [6], был получен второй критерий $\bar{\sigma}_{ocm}$ влияния остаточных напряжений на предел выносливости упрочнённой детали в виде

$$\bar{\sigma}_{ocm} = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad (3)$$

где $\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в наименьшем 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.

Критерий $\bar{\sigma}_{ocm}$ имеет чётко выраженный физический смысл – это остаточное напряжение на дне трещины с точностью до постоянного коэффициента, зависящего от радиуса у дна трещины и её глубины. 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:

$$\Delta P_R = \bar{\psi}_P \cdot |\bar{\sigma}_{ocm}|, \quad (4)$$

где $\bar{\psi}_p (\bar{\psi}_\sigma, \bar{\psi}_\tau)$ – коэффициент влияния остаточных напряжений по критерию $\bar{\sigma}_{ocm}$ на предел выносливости. В дальнейшем критерий $\bar{\sigma}_{ocm}$ будем называть критерием среднеинтегральных остаточных напряжений.

В работе [7] для упрочнённых различными методами ППД деталей и образцов из различных материалов с различными концентраторами напряжений при растяжении-сжатии, изгибе и кручении было экспериментально установлено, что критическая глубина t_{kp} нераспространяющейся трещины усталости зависит только от размеров опасного поперечного сечения и для полый цилиндрической детали определяется соотношением

$$t_{kp} = 0,0216D \left[1 - 0,04 \left(\frac{d}{D} \right)^2 - 0,54 \left(\frac{d}{D} \right)^3 \right], \quad (5)$$

где D – диаметр опасного поперечного сечения детали, d – диаметр отверстия.

В последние годы на кафедре сопротивления материалов Самарского государственного аэрокосмического университета с целью проверки возможности использования обоих критериев (σ_z^{nog} и $\bar{\sigma}_{ocm}$) для прогнозирования влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости при изгибе были проведены исследования на полых и сплошных цилиндрических образцах из стали 20 диаметром от 10 мм до 50 мм с различными концентраторами: надрезами и галтелями различного радиуса, а также втулкой, напрессованной на вал. В исследованиях использовались такие методы поверхностного пластического деформирования как пневмодробеструйная обработка и обкатка роликом на различных режимах.

Проведённые исследования показали, что при оценке влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию осевых σ_z^{nog} остаточных напряжений на поверхности опасного сечения образцов соответствующий коэффициент ψ_σ (формулы (1) и (2)) изменялся от 0,050 до 0,333, то есть в 6,5 раз. При оценке влияния упрочнения по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ocm}$ соответствующий коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ изменялся от 0,321 до 0,390, то есть в 1,2 раза.

Таким образом, прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых образцов и деталей с концентраторами напряжений по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ocm}$ приводит к существенно более точным значениям предела выносливости, чем прогнозирование по критерию осевых σ_z^{nog} остаточных напряжений на поверхности опасного сечения, на что указывается и в работе [7].

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 Школьник, Л.М. Повышение прочности шестерён дробеструйным наклёпом [Текст] / Л.М. Школьник, В.П. Девяткин // Вестник машиностроения. – 1950. – №12. – С. 7-12.
- 4 Туровский, М.Л. Упрочняющая обкатка роликами азотированных стальных деталей [Текст] / М.Л. Туровский, Р.А. Новик // Вестник машиностроения. – 1970. – №1. – С. 39-42.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям [Текст] / В.Ф. Павлов В.А., Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.