

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ С УЧЕТОМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ

Киселев П.Е., Шляпников П.А., Сургутанов Н.А., Швецова А.А.

Научный руководитель: д.т.н., профессор, зав. кафедрой сопротивления материалов В.Ф. Павлов
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34а, 443086

E-mail: dogg199191@mail.ru

Для прогнозирования предела выносливости σ_{-1} поверхностно упрочнённых деталей существует два критерия: критерий σ_z^{nos} , учитывающий влияние остаточных напряжений на поверхности упрочнённой детали, и критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ по толщине упрочнённого слоя [1]. В работе [2] было установлено, что использование первого критерия не является целесообразным из-за большого рассеивания соответствующего коэффициента влияния ψ_σ . Поэтому прогнозирование предела выносливости в данном исследовании будет осуществляться с использованием второго критерия, для чего, помимо остаточных напряжений, необходимо знать две величины: критическую глубину нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$ и коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ влияния поверхностного упрочнения по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$. Значение $t_{кр}$ определяется только размерами поперечного сечения детали [2] и вычисляется по формуле:

$$t_{кр} = 0,0216D, \quad (1)$$

где D – диаметр опасного поперечного сечения детали.

Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости, полученный экспериментальным путём, в общем виде описывается следующим выражением [2]:

$$\bar{\psi}_\sigma = 0,612 - 0,081\alpha_\sigma, \quad (2)$$

где α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений.

Далее рассмотрим влияние некоторых эксплуатационных факторов на работу детали в течение всего жизненного цикла.

1. Тип деформации

В работе [2] было показано, что при $\alpha_\sigma = 2,5 - 3$ в случае изгиба коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ можно принять равным $\bar{\psi}_\sigma \cong 0,36$. Было рассмотрено влияние остаточных напряжений на предел выносливости при растяжении-сжатии. Для чего изготавливались образцы диаметром 10 мм из тех же материалов, что и при кручении, половина из них подвергалась ГДО. Затем, на упрочнённые и неупрочнённые образцы наносились надрезы полукруглого профиля радиусом $\rho_0 = 0,3$ мм.

Испытания доказали, что прогнозирование предела выносливости с использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ для упрочнённых образцов с одинаковой степенью концентрации напряжений приводит к таким же результатам, как и при изгибе, что подтверждается приблизительным равенством коэффициентов влияния поверхностного упрочнения $\bar{\psi}_\sigma$ по данному критерию.

Для большой группы авиационных деталей (валы, рессоры, торсионы) характерной деформацией является переменное кручение. Для исследования влияния остаточных напряжений на предел выносливости при кручении были изготовлены образцы из сталей 30ХГСА, ЭИ961 и алюминиевого сплава В95 [3]. Часть из них подвергалась гидродробеструйной обработке (ГДО). На упрочнённые и неупрочнённые гладкие образцы диаметром $D = 12$ мм из стали ЭИ961 и сплава В95 безнаклёпным способом наносились круговые надрезы полукруглого профиля с $\rho_0 = 0,3$ мм, из стали 30ХГСА – с $\rho_0 = 0,35$ мм.

Проведенные испытания показали, что коэффициент $\bar{\psi}_\tau$ влияния упрочнения на предел выносливости при кручении имеет небольшой разброс и составляет в среднем 0,181, что вдвое меньше значения аналогичного коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ при изгибе и растяжении-сжатии.

2. Рабочая температура

Для учёта влияния рабочей температуры на предел выносливости деталей были проведены испытания на усталость образцов диаметром 7,5 мм после алмазного выглаживания из стали ЭИ961 и диаметром 10 мм из алюминиевого сплава В95 после упрочнения дробью. Далее стальные образцы выдерживались в печи при температуре 400°C, алюминиевые – при температуре 125°C в течение 100 часов. На упрочнённые и неупрочнённые образцы наносились надрезы полукруглого профиля с $\rho_0 = 0,3$ мм. Затем определялись остаточные напряжения и проводились испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла. После обработки результатов испытаний было выявлено, что после термоэкспозиции остаточные напряжения релаксируют. Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$, учитывающий влияние поверхностного упрочнения по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений как для стальных, так и для алюминиевых образцов достаточно близок к значению $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$.

3. Асимметрия цикла нагружения

Многие детали в машиностроении работают в условиях несимметричного цикла нагружения. В связи с этим возникает интерес о применимости критерия $\bar{\sigma}_{ocm}$ для прогнозирования предела выносливости изделий, работающих в условиях асимметрии цикла нагружения.

Для выяснения данного обстоятельства были проведены испытания образцов из стали 45, как упрочнённых, так и неупрочнённых, при растяжении-сжатии со средним напряжением цикла σ_m . Проведённые испытания показали, что с увеличением средних напряжений предельная амплитуда цикла σ_{Ra} уменьшается, как для упрочнённых, так и для неупрочнённых образцов. Также уменьшается коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$, равный 0,36 только при нулевом среднем напряжении. Данные результаты говорят о невозможности напрямую применить критерий $\bar{\sigma}_{ocm}$ в случае асимметрии цикла нагружения.

Однако, если использовать диаграмму Ганна, то можно вывести формулу для коэффициента влияния $\bar{\psi}_\sigma^{(m)}$ через сопротивления разрыву детали с концентратором S_k :

$$\bar{\psi}_\sigma^{(m)} = \bar{\psi}_\sigma - \frac{\sigma_{-1p}(\sigma_m - \sigma_m^T)}{S_k \bar{\sigma}_{ocm}}, \quad (3)$$

где σ_m^T – среднее напряжение, при котором в концентраторе без остаточных напряжений появляются первые пластические деформации. Используя зависимость (3) можно вычислить предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений, что говорит о его применимости при несимметрично действующих напряжениях.

Таким образом, обобщая проведенные исследования влияния различных эксплуатационных факторов, действующих на детали на протяжении всего их жизненного цикла в пределах назначенного ресурса, можно утверждать, что прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей следует вести по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.Ф. Павлов О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.
2. Павлов В. Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
3. Павлов В.Ф., Прохоров А.А. Связь остаточных напряжений и предела выносливости при кручении в условиях концентрации напряжений // Проблемы прочности. – 1991. – №5. – С. 43-46.