

7. Радченко, В.П. Методика расчёта предела выносливости упрочнённых цилиндрических образцов с концентраторами напряжений при температурных выдержках в условиях ползучести / В.П. Радченко, О.С. Афанасьева // Вестник Самарск. госуд. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. – 2009. – №2 (19). – С. 264–268.

УДК 621.787:539.319

*Павлов В.Ф., Шадрин В.К., Прохоров А.А.,
Богданова И.В., Кonychova А.С.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА МНОГОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ УПРОЧНЁННЫХ ОБРАЗЦОВ

Одним из определяющих параметров ресурса техники является предел выносливости $P_R(\sigma_R, \tau_R)$ поверхностно упрочнённых деталей. Зависимость для определения предела выносливости в общем виде записывается как

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

где $P_R^0(\sigma_R^0, \tau_R^0)$ – предел выносливости неупрочнённой детали; $\psi_P(\psi_\sigma, \psi_\tau)$ – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по остаточным напряжениям на поверхности опасного сечения детали; $\sigma_{осм}$ – осевые (меридиональные) остаточные напряжения в наименьшем сечении детали [1]. Остальные компоненты остаточного напряжённого состояния в соответствии с теорией наибольших касательных напряжений не учитываются.

Для прогнозирования предела выносливости P_R поверхностно упрочнённых деталей используются два критерия: критерий, учитывающий влияние осевых остаточных напряжений $\sigma_z^{ног}$ на поверхности упрочнённой детали, и критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ по толщине упрочнённого слоя [2]. В настоящем исследовании изучалась возможность прогнозирования предела выносливости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений по распределению остаточных напряжений в поверхностном слое с учётом таких эксплуатационных факторов, как тип деформации и рабочая температура.

Первый критерий $\sigma_z^{ног}$ учитывает лишь остаточные напряжения на поверхности опасного сечения упрочнённых деталей. Однако, на практике, при обработке деталей механическими способами, в том числе и при поверхностном упрочнении, наблюдается подповерхностный максимум сжимающих остаточных напряжений с уменьшением до нуля к поверхности. Этот спад часто бывает весьма значительным, иногда остаточные напряжения даже становятся растягивающими [3], но несмотря на это наблюдается увеличение предела выносливости. Поэтому критерий $\sigma_z^{ног}$ является применимым лишь при прогнозировании предела выносливости упрочнённых деталей в тех случаях, когда максимум сжимающих остаточных напряжений находится на поверхности детали.

Второй критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ был получен в работе [2] при использовании решения задачи [4] о дополнительных остаточных напряжениях в наименьшем сечении упрочнённой детали после нанесения надреза полуэллиптического профиля в виде:

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

где $\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении детали; $\xi = y/t_{кр}$ – расстояние от дна концентратора до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$ (рис. 1); $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей в случае работы детали на пределе выносливости.

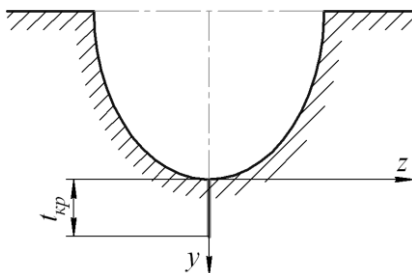


Рис. 1. Нераспространяющаяся трещина усталости

Из формулы (2) следует, что критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ учитывает влияние остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя, равной $t_{кр}$.

Для прогнозирования предела выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ необходимо определить две величины: критическую глубину нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$ и коэффициент $\bar{\psi}_P(\bar{\psi}_\sigma, \bar{\psi}_\tau)$ влияния поверхностного упрочнения по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$.

На основании многочисленных экспериментальных исследований [5] установлено, что значение $t_{кр}$ определяется только размерами опасного поперечного сечения детали и вычисляется по формуле:

$$t_{кр} = 0,0216D, \quad (3)$$

где D – диаметр поперечного сечения детали.

Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости при изгибе и растяжении-сжатии, полученный на основании экспериментов, определяется по следующей зависимости [6]:

$$\bar{\psi}_\sigma = 0,612 - 0,081\alpha_\sigma, \quad (4)$$

где α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений.

В работе [5] было установлено, что при $\alpha_\sigma = 2,5 - 3$ в случае изгиба коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ можно принять равным $\cong 0,36$. Для значительной группы авиационных деталей (валы, рессоры, торсионы) характерной деформацией является переменное кручение. Для исследования влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости при кручении были изготовлены образцы из сталей 30ХГСА, ЭИ961 и алюминиевого сплава В95 [7]. На неупрочнённые и упрочнённые образцы диаметром $D_1 = 12$ мм из стали ЭИ961 и сплава В95 наносились круговые надрезы полукруглого профиля с радиусом $R = 0,3$ мм, из стали 30ХГСА – с $R = 0,35$ мм. Результаты испытаний на усталость по определению предела выносливости образцов в случае кручения τ_{-1} приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты испытаний на усталость при кручении

Материал	Размеры образцов и концентраторов			Неупрочнённые образцы	Упрочнённые образцы				
	D_1 , мм	D , мм	R , мм		τ_{-1} , МПа	τ_{-1} , МПа	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\tau$
30ХГСА	12	11,3	0,35	180,7	222,5	0,235	-233	0,179	
ЭИ961	12	11,4	0,30	244	300	0,240	-293	0,191	
В95	12	11,4	0,30	37,5	72,5	0,250	-193	0,180	

Из данных табл. 1 видно, что коэффициент $\bar{\psi}_\tau$ влияния упрочнения на предел выносливости при кручении имеет небольшой разброс и составляет в среднем значение 0,183, что вдвое меньше значения аналогичного коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ при изгибе. Также было исследовано влияние остаточных напряжений на предел выносливости при растяжении-сжатии σ_{-1p} образцов диаметром $D_l = 10$ мм из сталей 30ХГСА, ЭИ961 и сплава Д16Т. Половина образцов подвергалась гидродробеструйной обработке. Затем на неупрочнённые и упрочнённые образцы наносились круговые надрезы полукруглого профиля с радиусом $R = 0,3$ мм. Результаты испытаний на усталость представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты испытаний на усталость при растяжении-сжатии

Материал	Неупрочнённые образцы σ_{-1p} , МПа	Упрочнённые образцы			
		σ_{-1p} , МПа	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
30ХГСА	146	198	0,200	-144	0,361
ЭИ961	151,3	233,4	0,198	-258	0,357
Д16Т	78,4	105	0,200	-75,3	0,353

Из данных табл. 2 видно, что прогнозирование предела выносливости упрочнённых образцов при растяжении-сжатии с использованием критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ при одинаковой степени концентрации напряжений приводит к таким же результатам, как и при изгибе, что подтверждается примерным равенством коэффициентов влияния поверхностного упрочнения $\bar{\psi}_\sigma$ по данному критерию.

Значительное количество деталей в газотурбинных двигателях работают при высоких температурах. Для исследования влияния температуры на предел выносливости деталей были проведены испытания на усталость образцов диаметром 7,5 мм из

стали ЭИ961 после алмазного выглаживания и диаметром 10 мм из алюминиевого сплава В95 после пневмодробеструйной обработки. Далее образцы из стали ЭИ961 выдерживались в печи в течение 100 часов при температуре 400°С, а из сплава В95 – при температуре 125°С. На неупрочнённые и упрочнённые образцы наносились надрезы полукруглого профиля с $R = 0,3$ мм. Затем определялись остаточные напряжения и проводились испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты испытаний на усталость при изгибе

Материал	Температура, град. С	Неупрочнённые образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы			
			σ_{-1} , МПа	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$
ЭИ961	20	230	380	0,160	-422	0,356
	400	190	270	0,160	-242	0,331
В95	20	105	200	0,310	-249	0,382
	125	105	155	0,310	-141	0,355

Из данных табл. 3 видно, что после термоэкспозиции остаточные напряжения в образцах релаксируют. Коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$, учитывающий влияние поверхностного упрочнения через критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, как для стальных, так и для алюминиевых образцов достаточно близок к значению $\bar{\psi}_{\sigma} = 0,36$.

Таким образом, по результатам проведённых экспериментов по изучению влияния исследованных эксплуатационных факторов, действующих на детали на протяжении всего их жизненного цикла в пределах назначенного ресурса, установлено, что прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей

представляется возможным проводить по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений.

Библиографический список

1. Павлов, В.Ф. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей в условиях концентрации напряжений / В.Ф. Павлов, В.С. Вакулюк, А.В. Чирков, В.П. Сазанов // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т 15.– № 1. – С. 1–6.

2. Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – № 8. – С. 29–32.

3. Школьник, Л.М. Повышение прочности шестерён дробеструйным наклёпом / Л.М. Школьник, В.П. Девяткин // Вестник машиностроения. – 1950. – № 12. – С. 7–12.

4. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом / С.И. Иванов, М.П. Шатунов, В.Ф. Павлов // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ. – 1974. – Вып. 1. – С. 88–95.

5. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.

6. Кирпичёв, В.А. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений / В.А. Кирпичёв, А.С. Букатый, А.П. Филатов, А.В. Чирков // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т. 15. – № 4 (44). – С. 81–85.

7. Павлов, В.Ф. Связь остаточных напряжений и предела выносливости при кручении в условиях концентрации напряжений / В.Ф. Павлов, А.А. Прохоров // Проблемы прочности. – 1991. – № 5. – С. 43–46.