

ЗАВИСИМОСТЬ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ ОТ РАЗМЕРОВ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

Для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости цилиндрических образцов различного диаметра в условиях концентрации напряжений были проведены эксперименты на сплошных цилиндрических упрочнённых и неупрочнённых образцах диаметром $D = 10,25$ и 50 мм из стали 20 с круговыми надрезами полукруглого профиля.

Гладкие образцы подвергались пневмодробеструйной обработке (ПДО), а также обкатке роликом при усилии $0,5$ кН (ОР1) и $1,0$ кН (ОР2). На все упрочнённые и неупрочнённые гладкие образцы наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиуса $R = 0,5$ мм. Остаточные напряжения в гладких образцах определялись экспериментально методом колец и полосок [1]. Остаточные напряжения в образцах с надрезами вычислялись как аналитическим [2], так и численными методами с использованием программного комплекса Nastran/Patran [3]. Остаточные напряжения на поверхности дна надреза $\sigma_z^{нов}$ приведены в табл. 1.

Испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла неупрочнённых и упрочнённых образцов диаметром $D = 10$ мм в гладкой части проводились на машине МУИ-6000, диаметром $D = 25$ мм – на машине УММ-01, диаметром $D = 50$ мм – на машине УМП-02; база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Значения предела выносливости σ_{-1} представлены в табл. 1. Упрочнённые образцы, выстоявшие базу испытаний при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при бóльших напряжениях. На изломах этих образцов были видны нераспространяющиеся трещины усталости, глубина $t_{кр}$ которых приведена в табл. 1.

Оценка влияния поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ образцов с надрезом проводилась по двум критериям: осевым остаточным напряжениям на поверхности надреза $\sigma_z^{нов}$ и среднеинтегральным ос-

таточным напряжениям $\bar{\sigma}_{ocm}$ [4], рассчитанным по глубине поверхностного слоя, равной $t_{кр}$,

$$\Delta\sigma_{-1} = \psi_{\sigma} |\sigma_z^{nos}|, \quad (1)$$

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_{\sigma} |\bar{\sigma}_{ocm}|, \quad (2)$$

где ψ_{σ} и $\bar{\psi}_{\sigma}$ – коэффициенты влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критериям σ_z^{nos} и $\bar{\sigma}_{ocm}$, соответственно.

Таблица 1. Результаты испытаний образцов на усталость и определения остаточных напряжений

D, мм	Неупрочнённые образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы						
		обработка	σ_{-1} , МПа	σ_z^{nos} , МПа	ψ_{σ}	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ocm}$, МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$
10	120	ПДО	137,5	-90	0,194	0,196	-48	0,365
		ОР1	187,5	-311	0,217	0,202	-178	0,379
		ОР2	250	-517	0,251	0,192	-333	0,390
25	112,5	ПДО	130	-142	0,123	0,525	-52	0,337
		ОР1	150	-349	0,107	0,530	-111	0,338
		ОР2	172,5	-525	0,114	0,520	-169	0,355
50	92,5	ОР1	122,5	-396	0,078	1,077	-82	0,366
		ОР2	132,5	-547	0,073	1,024	-112	0,357

С увеличением диаметра образцов от 10 мм до 50 мм приращение предела выносливости при одних и тех же режимах упрочняющей обработки уменьшается. Это объясняется тем, что толщина слоя со сжимающими остаточными напряжениями при увеличении диаметра возрастает незначительно по сравнению с толщиной поверхностного слоя образцов, ответственной за повышение предела выносливости, равной критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости. Следовательно, для сохранения эффекта упрочнения с увеличением диаметра детали необходимо увеличивать толщину упрочнённого поверхностного слоя (толщину слоя со сжимающими остаточными напряжениями) пропорционально критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости.

Анализируя приведённые в табл. 1 данные, можно видеть, что оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов различного

диаметра в условиях концентрации напряжений по критерию $\sigma_z^{нов}$ – остаточным напряжениям на поверхности концентратора – приводит к значительному рассеянию соответствующего коэффициента ψ_σ . Этот коэффициент в проведённом исследовании изменяется от 0,073 до 0,251, то есть изменяется почти в 3,5 раза, что неприемлемо для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей.

Оценка влияния поверхностного упрочнения по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ – среднеинтегральным остаточным напряжениям – приводит к существенно меньшему рассеянию соответствующего коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$. Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ в проведённом исследовании изменяется от 0,337 до 0,390, составляя в среднем 0,361, и практически не отличается от значения $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$, установленного в работе [5] для упрочнённых образцов и деталей с аналогичной концентрацией напряжений.

Таким образом, для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов (деталей) различного диаметра следует использовать критерий среднеинтегральных остаточных напряжений, рассчитанный по толщине опасного сечения, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости.

Библиографический список

1. Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок / С.И. Иванов // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ. – 1971. – Вып. 53. – С. 32–42.

2. 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.

3. Сазанов, В.П. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании / В.П. Сазанов, А.В. Чирков, В.А. Самойлов, Ю.С. Ларионова // Вестник СГАУ. – 2011. – №3 (27). – Ч.3. – С. 171–174.

4. 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.

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

УДК 621.787:539.319

*Павлов В.Ф., Шадрин В.К., Прохоров А.А.,
Караньева О.В., Богданова И.В.*

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ ПО ОСТАТОЧНЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ

В исследовании [1] было показано, что основное влияние на повышение сопротивления усталости деталей с концентраторами напряжений после поверхностного упрочнения оказывают сжимающие остаточные напряжения, наведённые в тонком поверхностном слое этих деталей. Для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости обычно используются два критерия: критерий осевых остаточных напряжений $\sigma_z^{ног}$ на поверхности опасного сечения детали и критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{огм}$ [2], вычисляемых по методике работы [3].

Приращение предела выносливости ΔP_R ($\Delta\sigma_R$ – изгиб, растяжение-сжатие; $\Delta\tau_R$ – кручение) поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами напряжений при использовании критериев $\sigma_z^{ног}$ и $\bar{\sigma}_{огм}$ определяется по следующим формулам:

$$\Delta P_R = \psi_p \cdot |\sigma_z^{ног}|,$$

$$\Delta P_R = \bar{\psi}_p \cdot |\bar{\sigma}_{огм}|,$$

где ψ_p (ψ_σ – изгиб, растяжение-сжатие; ψ_τ – кручение), $\bar{\psi}_p$ ($\bar{\psi}_\sigma$ – изгиб, растяжение-сжатие; $\bar{\psi}_\tau$ – кручение) – коэффициенты влияния поверхностного упрочнения по критериям $\sigma_z^{ног}$ и $\bar{\sigma}_{огм}$, соответственно, на предел выносливости деталей.