

3. Серенсен, С.В. К вопросу об оценке сопротивления усталости поверхностно упрочнённых образцов с учётом кинетики остаточной напряжённости / С.В. Серенсен, С.П. Борисов, Н.А. Бородин // Проблемы прочности. – 1969. – №2. – С. 3-7.

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

5. 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.

6. 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.

7. Радченко, В.П. Наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений при поверхностном упрочнении деталей / В.П. Радченко, В.Ф. Павлов // Труды МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций». – Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2011. – С. 354-357.

УДК 621.787:539.319

***В.Ф. Павлов, А.А. Прохоров, С.А. Анисимов, П.А. Селищев,
К.Ф. Матвеева***

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ФАКТОРОВ НА МНОГОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Введение. В работе [1] было исследовано влияние на сопротивление многоциклового усталости поверхностно упрочнённых деталей и образцов таких конструктивных факторов, как размеры опасного поперечного сечения и вида концентратора напряжений. В настоящем исследовании изучено влияние на предел выносливости такого конструктивного фактора, как глубина надреза при опережающем поверхностном пластическом деформировании обкаткой роликом цилиндрических деталей.

Для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей применяются два критерия. Первым критерием являются остаточные напряжения на поверхности концентратора. Зависимость для определения приращения предела выносливости ΔP_R ($\Delta \sigma_R$, $\Delta \tau_R$) упрочнённой детали в этом случае имеет следующий вид:

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

где ψ_p (ψ_σ, ψ_τ) – 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.

В работе [2] на основе аналитического решения [3] был предложен второй критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ – критерий среднеинтегральных остаточных напряжений в виде

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

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 $t_{кр}$ (рис. 1), $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе детали (образца) на пределе выносливости.

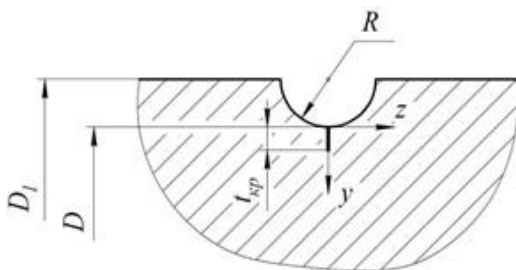


Рис. 1. Опасное сечение детали и нераспространяющаяся трещина усталости

Зависимость для определения приращения предела выносливости $\Delta P_R (\Delta \sigma_R, \Delta \tau_R)$ упрочнённой детали при использовании критерия $\bar{\sigma}_{ocm}$ имеет следующий вид:

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

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

В работе [1] для упрочнённых различными методами 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 цилиндрических деталей определяется соотношением

$$t_{kp} = 0,0216D, \quad (1)$$

где D – диаметр опасного сечения детали (рис. 1).

В настоящем исследовании гладкие образцы из стали 20 диаметром $D_1 = 50$ мм подвергались обкатке роликом при усилиях $P = 0,5$ кН (ОП1) и $P = 1,0$ кН (ОП2). Затем на неупрочнённые и упрочнённые гладкие образцы наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиусов $R = 0,3$ мм, $R = 0,5$ мм и $R = 1,0$ мм.

Остаточные напряжения в гладких образцах определялись методом колец и полосок [4]. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a гладких образцов представлено на рис. 2, а. Можно видеть, что сжимающие остаточные напряжения и глубина их залегания с увеличением усилия обкатки роликом возрастают.

Остаточные напряжения в образцах с надрезами определялись расчётным путём – суммированием дополнительных остаточных напряжений за счёт перераспределения остаточных усилий после опережающего поверхностного пластического деформирования и остаточных напряжений гладких образцов. При этом дополнительные остаточные напряжения вычислялись как аналитическим [3], так и численными методами. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a в наименьшем сечении образцов с надрезами $R = 0,3$ мм и $R = 0,5$ мм приведено на рис. 2, б, а значения остаточных напря-

жений на поверхности дна надрезов $\sigma_z^{нов}$ и среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ представлены в табл. 1.

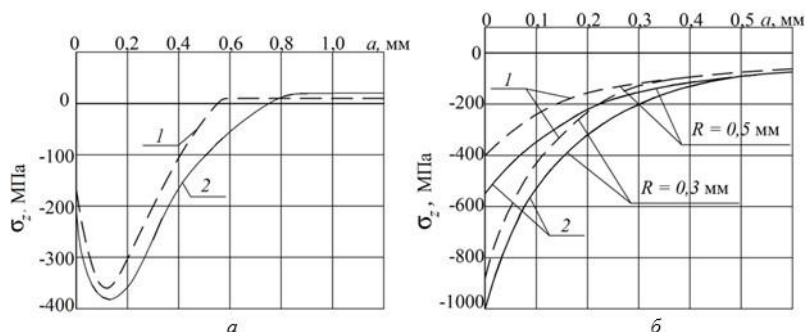


Рис. 2. Осевые остаточные напряжения в упрочнённых гладких образцах (а) и в образцах с надрезами (б) после: 1 – ОР1; 2 – ОР2

Испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла неупрочнённых и упрочнённых образцов с надрезами и напрессованной втулкой проводились на машине УМП-02 [5]; база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости σ_{-1} приведены в табл. 1.

Из приведённых данных видно, что с увеличением глубины надреза, как конструктивного фактора, приращение предела выносливости упрочнённых образцов уменьшается, что объясняется уменьшением сжимающих остаточных напряжений в опасном сечении. Упрочнённые образцы, выстоявшие базу испытаний при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при больших напряжениях. На изломах этих образцов были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, критическая глубина $t_{кр}$ которых соответствует зависимости (1) и приведена в табл. 1.

Из приведённых в табл. 1 данных видно, что учёт влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов по первому критерию $\sigma_z^{нов}$ – остаточным напряжениям на поверхности концентратора – приводит к значительному рассеянию коэффициента ψ_σ . Этот коэффициент в проведённом исследовании изменяется в широких пределах: от

0,033 до 0,147, то есть изменяется в 4,5 раза, что неприемлемо для оценки предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей на практике. Учёт влияния поверхностного упрочнения по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ приводит к существенно меньшему рассеянию соответствующего коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$, который в проведённом исследовании изменяется от 0,305 до 0,380, составляя в среднем значение 0,342.

Табл. 1. Результаты испытаний образцов с надрезами и напрессованной втулкой на усталость и определения остаточных напряжений

Концентратор	Неупроч. образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы							K_{σ}	$(\bar{\psi}_{\sigma})_{расч}$
		образец	σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_{σ}	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$		
надрез $R = 0,3$ мм	87,5	ОР1	117,5	-898	0,033	1,040	-94	0,322	2,86	0,328
		ОР2	130	-1004	0,042	1,110	-128	0,332		
надрез $R = 0,5$ мм	92,5	ОР1	122,5	-396	0,078	1,077	-82	0,366	2,47	0,353
		ОР2	132,5	-547	0,073	1,024	-112	0,357		
надрез $R = 1,0$ мм	92,5	ОР1	110	-126	0,139	1,073	-46	0,380	2,32	0,363
		ОР2	115,5	-166	0,136	1,035	-62	0,363		
напрессованная втулка	87,5	ОР1	107,5	-180	0,111	1,020	-64	0,313	2,97	0,321
		ОР2	112,5	-170	0,147	1,14	-82	0,305		

В работе [6] на основании многочисленных экспериментов была установлена зависимость между коэффициентом влияния $\bar{\psi}_{\sigma}$ поверхностного упрочнения на предел выносливости при изгибе по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ и эффективным коэффициентом концентрации напряжений K_{σ} в виде

$$(\bar{\psi}_{\sigma})_{расч} = 0,514 - 0,065K_{\sigma} \quad (2)$$

В табл. 1 приведены значения коэффициента K_{σ} , а также расчётные величины коэффициента $(\bar{\psi}_{\sigma})_{расч}$. Видно, что опытные значения коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$ для каждого радиуса надреза и напрессованной втулки незначительно отличаются от расчётных значений $(\bar{\psi}_{\sigma})_{расч}$, вычисленных по формуле (2).

Заключение. При опережающем поверхностном пластическом деформировании с увеличением глубины надреза как конструктивного фактора, приращение предела выносливости деталей уменьшается. Для повышения приращения предела выносливости в этом случае необходимо увеличить глубину залегания и величину сжимающих остаточных напряжений с увеличением глубины надреза.

Проведённое исследование показало, что для оценки приращения предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами напряжений наиболее оправдано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$.

Список использованных источников

1. 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.
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. 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.
4. 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.
5. Филатов, Э.Я. Универсальный комплекс машин для испытания материалов и конструкций на усталость / Э.Я. Филатов, В.Э. Павловский. – Киев: Наукова Думка, 1985. – 92 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.