

образцов предел выносливости образцов с надрезами, нанесёнными на эти гладкие образцы, повышается.

Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов с надрезами проводилась по

критерию среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  [1].

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

Таблица 1

Надрез $R$ , мм	Неупрочн. образцы $\sigma_{-1}$ , МПа	Упрочнённые образцы			
		обработка	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
0,3	107,5	ПДО	137,5	-87	0,345
		ОР, $P = 0,5$ кН	165	-171	0,336
		ОР, $P = 1,0$ кН	175	-202	0,334
0,5	120	ПДО	130	-52	0,337
		ОР, $P = 0,5$ кН	150	-111	0,338
		ОР, $P = 1,0$ кН	172,5	-169	0,355

где  $\sigma_z(\xi)$  – осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении по толщине поверхностного слоя  $a$ ,  $\xi = a/t_{кр}$  – расстояние от дна надреза до текущего слоя, выраженное в долях  $t_{кр}$ ,  $t_{кр}$  – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости.

Приращение предела выносливости  $\Delta\sigma_{-1}$  при использовании критерия  $\bar{\sigma}_{ост}$  определялось по зависимости

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_\sigma |\bar{\sigma}_{ост}|,$$

где  $\bar{\psi}_\sigma$  – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости по разрушению. Значения критерия среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  и коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$  приведены в табл. 1. Можно видеть, что коэффициент  $\bar{\psi}_\sigma$  имеет небольшое рассеяние, составляя

в среднем 0,366, и незначительно отличается от значения  $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$ , установленного в [1] для упрочнённых образцов и деталей с аналогичной концентрацией напряжений.

Таким образом, проведённое исследование показало, что при опережающем поверхностном пластическом деформировании увеличение толщины упрочнённого поверхностного слоя гладких образцов приводит к повышению предела выносливости образцов с надрезами за счёт увеличения сжимающих остаточных напряжений в их опасном сечении.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Иванов В.Б. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. – 64 с.

УДК 621.787:539.319

### ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ ОБКАТАННЫХ РОЛИКОМ ВАЛОВ ИЗ СТАЛЕЙ 20 И 40Х

© 2012 В.С. Вакулук, А.В. Чирков, В.К. Шадрин, С.А. Михалкина, Н.Д. Филатов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), Самара,

# RESIDUAL STRESSES AND FATIGUE RESISTANCE OF ROLLER TREATED SHAFTS MADE OF 20 AND 40X STEELS

© 2012 V.S. Vakuljuk, A.V. Chirkov, V.K. Shadrin, S.A. Mihalkina, N.D. Filatov

It is established that in limit of endurance forecasting case for surface treated details with stress concentrators during average residual stresses criterion usage it is required to take stress concentration ratio into consideration by means of effective stress concentration coefficient  $K_P$ .

Исследовалось влияние обкатки роликом на предел выносливости поверхностно упрочнённых цилиндрических валов диаметром 25 мм из сталей 20 и 40X с напрессованной втулкой.

Влияние поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости валов при изгибе  $\Delta\sigma_{-1}$  в случае симметричного цикла оценивалось по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{осм}$  [1]

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

где  $\bar{\psi}_\sigma$  – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости;

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

$\sigma_z(\xi)$  – осевые остаточные напряжения в опасном сечении детали (образца) с концентратором по толщине поверхностного слоя  $a$ ;  $\xi = a/t_{кр}$  – расстояние от поверхности детали (образца) до текущего слоя, выраженное в долях  $t_{кр}$ ;  $t_{кр}$  – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей в упрочнённой детали (образце) с концентратором при работе на пределе выносливости.

Сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое валов создавались обкаткой роликом (ОР) диаметром 60 мм с профильным радиусом 1,6 мм при усилии  $P = 0,5$  кН и  $P = 1,0$  кН. Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя  $a$  определялось экспериментально методом колец и полосок и представлено на рис. 1. Из данных рис. 1 можно видеть, что при обкатке роликом на одних и тех же режимах ( $P = 1,0$  кН) распределение

сжимающих остаточных напряжений в валах

из стали 40X существенно отличается от распределения напряжений в валах из стали 20. Сжимающие остаточные напряжения в валах из стали 40X (эпюра 3) значительно выше как по величине, так и

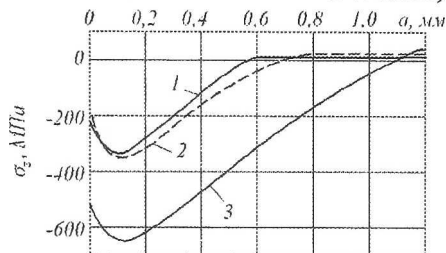


Рис. 1. Осевые остаточные напряжения  $\sigma_z$  в упрочнённых роликом валах из стали 20 (1, 2) и стали 40X (3) при:  $P = 0,5$  кН (1) и  $P = 1,0$  кН (2, 3) по глубине залегания, чем в валах из стали 20 (эпюра 2), то есть распределение остаточных напряжений в образцах из стали 40X является более полным.

Испытания валов с напрессованной втулкой на усталость при изгибе в случае симметричного цикла проводились на машине УММ-01, база испытаний –  $3 \cdot 10^6$  циклов нагружения. Значения пределов выносливости валов  $\sigma_{-1}$  представлены в табл. 1. Можно видеть, что приращение предела выносливости упрочнённых роликом при  $P = 1,0$  кН валов из стали 40X почти в два раза выше, чем из стали 20, что объясняется большей величиной сжимающих остаточных напряжений и более полным их распределением по толщине поверхностного слоя [1].

Для определения критической глубины  $t_{кр}$  нераспространяющейся трещины усталости выстоявшие базу испытаний упрочнённые роликом образцы при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при большем напряжении. На изломах этих образцов чётко просматривались

нераспространяющиеся усталостные трещины, средняя глубина которых приведена в табл. 1.

Таблица 1

Материал	K	Неупрочнённые образцы $\sigma_{-1}$ , МПа	Упрочнённые образцы				
			обработка	$\sigma$ , МПа	$t_{кр}$ , мм	$\bar{\sigma}_o$ , МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
сталь 20	2,33	100	ОР, P=0,5 кН	150	0,55	143	0,33
	2,33		ОР, P=1,0 кН	170	0,54	161	0,48
40X	3,95	162,5	ОР, P=1,0 кН	285	0,52	285	0,25

Критерий среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  вычислялся по формуле (2) по толщине поверхностного слоя валов, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости. Значения  $\bar{\sigma}_{ост}$  приведены в табл. 1. Коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости  $\bar{\psi}_\sigma$  определялся по формуле (1) и также представлен в табл. 1. Анализируя значения коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$ , можно видеть, что для упрочнённых роликом валов из стали 40X этот коэффициент меньше, чем для валов из стали 20. Это различие объясняется большей чувствительностью стали 40X к концентрации напряжений, чем стали 20.

В табл. 1 приведены значения эффективного коэффициента концентрации напряжений  $K_\sigma$ , определённого для вала с напрессованной втулкой [2]. Видно, что для вала из стали 40X коэффициент  $K_\sigma$  в 1,7

раза больше, чем для вала из стали 20. В работе [3] на основании многочисленных экспериментов была установлена зависимость между коэффициентом влияния  $\bar{\psi}_\sigma$  и эффективным коэффициентом концентрации напряжений  $K_\sigma$  в виде

$$\bar{\psi}_\sigma = 0,514 - 0,065K_\sigma. \quad (3)$$

Значения коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$ , определённые по зависимости (3), составили: для случая вала из стали 40X – 0,257, для случая вала из стали 20 – 0,362. Следовательно коэффициенты  $\bar{\psi}_\sigma$ , полученные в настоящем исследовании (табл.1), незначительно отличаются от вычисленных по формуле (3) величин.

Таким образом, проведённое исследование показывает, что при прогнозировании предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей необходимо учитывать степень концентрации напряжений через эффективный коэффициент концентрации  $K_\sigma$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Иванов В.Б. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. – 64 с.
2. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчёт деталей машин на прочность. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
- Кирпичёв В.А., Филатов А.П., Каранаева О.В., Чирков А.В., Семёнова О.Ю. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений// Труды МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций»: – Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАНУ, 2011. – С. 678-685.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ КРЫЛОВОГО ПРОФИЛЯ С ДВИЖУЩЕЙСЯ СТЕНКОЙ

© 2012 Валитов Р.А.

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань