

После термоэкспозиции на воздухе в течение 590 часов произошла существенная релаксация остаточных напряжений, причём изменился характер распределения напряжений. Исчез подповерхностный максимум, в некоторых образцах глубина залегания остаточных напряжений сократилась до 0,08 мм. Рассеяние остаточных напряжений после термоэкспозиции на воздухе при температуре 600°C в течение 590 часов увеличилось по сравнению с напряжениями азотированных образцов, не подвергавшихся термоэкспозиции.

Таким образом, в исследовании установлено, что в образцах из стали ВНС40 после шлифования и точения в поверхностном слое впадин надразов остаточные напряжения имеют существенное рассеяние, принимая на поверхности концентратора значения от -900 до +250 МПа. Упрочнение стальными микрошариками создаёт в поверхностном слое толщиной 0,12 мм остаточные напряжения сжатия до -1400 МПа с

максимумом на поверхности. Азотирование приводит к созданию значительных сжимающих остаточных напряжений, имеющих второй максимум на расстоянии 0,15-0,16 мм от поверхности. Термоэкспозиция азотированных образцов в вакууме при  $T = 600^\circ\text{C}$  в течение двух часов незначительно изменяет величину и характер распределения остаточных напряжений, а после выдержки на воздухе при  $T = 600^\circ\text{C}$  в течение 590 часов остаточные напряжения уменьшаются в 1,3-3 раза.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

УДК 621.787:539.319

### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ РАЗЛИЧНОГО ДИАМЕТРА С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ

© 2012 В.А. Кирпичёв, В.Ф. Павлов, В.П. Сазанов, А.С. Букатый, А.В. Чирков

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

### INFLUENCE VALIDATION OF SURFACE TREATMENT ON LIMIT OF ENDURANCE OF VARIOUS DIAMETER CYLINDRICAL SPECIMENS WITH STRESS CONCENTRATORS

© 2012 V.A. Kirpichev, V.F. Pavlov, V.P. Sazanov, A.S. Bukaty, A.V. Chirkov

At example of various diameters steel 20 specimens it is experimentally established that in stress concentration conditions for influence validation of surface treatment on limit of endurance using of average residual stress criterion is most justified solution.

Для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей по остаточным напряжениям применяются два критерия. Первым критерием являются осевые  $\sigma_z^{нов}$

остаточные напряжения на поверхности концентратора в наименьшем сечении детали. Зависимость для определения предела выносливости  $P_R(\sigma_R, \tau_R)$

упрочнённой детали в этом случае имеет вид

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

где  $P_R^0(\sigma_R^0, \tau_R^0)$  – предел выносливости неупрочнённой детали,  $\psi_P$  ( $\psi_\sigma, \psi_\tau$ ) – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости.

В работе [1] был предложен второй критерий влияния остаточных напряжений на предел выносливости упрочнённой детали – критерий среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  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,  $\xi = \frac{y}{t_{кр}}$  – расстояние от дна концентратора до текущего слоя, выраженное в долях  $t_{кр}$ ,  $t_{кр}$  – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе детали (образца) на пределе выносливости.

Предел выносливости  $P_R$  упрочнённой детали с концентратором напряжений при использовании критерия  $\bar{\sigma}_{ост}$  определяется по следующей формуле:

$$P_R = P_R^0 - \bar{\psi}_P \bar{\sigma}_{ост}, \quad (3)$$

где  $\bar{\psi}_P$  ( $\bar{\psi}_\sigma, \bar{\psi}_\tau$ ) – коэффициент влияния остаточных напряжений по критерию  $\bar{\sigma}_{ост}$  на предел выносливости.

Для проверки возможности использования обоих критериев при оценке влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости при изгибе в случае симметричного цикла были проведены эксперименты на сплошных и полых цилиндрических упрочнённых и неупрочнённых образцах различного диаметра из стали 20 с круговыми надрезами полукруглого профиля.

Гладкие сплошные образцы диаметром  $D = 10$  мм и  $D = 25$  мм подвергались пневмодробеструйной обработке (ПДО), а также обкатке роликом (ОР) при усилии  $P = 0,5$  кН и  $P = 1,0$  кН.

Гладкие образцы диаметром  $D = 50$  мм с отверстием диаметром  $d = 40$  мм – обкатке роликом. Затем на упрочнённые и неупрочнённые гладкие образцы наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиуса  $R = 0,3$  мм и  $R = 0,5$  мм. Остаточные напряжения в гладких образцах определялись экспериментально методом колец и полосок.

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. Значения остаточных напряжений  $\sigma_z^{ног}$  на поверхности дна надрезов представлены в табл. 1.

Испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла неупрочнённых и упрочнённых образцов диаметром

$D = 10$  мм проводились на машине МУИ-6000, диаметром  $D = 25$  мм – на машине УММ-01, диаметром  $D = 50$  мм с отверстием  $d = 40$  мм – на машине УМП-02, база испытаний –  $3 \cdot 10^6$  циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости  $\sigma_{-1}$  представлены в табл. 1. Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости детали в условиях концентрации напряжений по первому критерию  $\sigma_z^{ног}$  – остаточным напряжениям на поверхности концентратора – приводит к значительному рассеянию коэффициента  $\psi_\sigma$ . В настоящем исследовании этот коэффициент изменяется в широких пределах: от 0,073 до 0,251 (табл. 1), то есть почти в 3,5 раза, что неприемлемо для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей.

Оценка влияния поверхностного упрочнения по второму критерию  $\bar{\sigma}_{ост}$  – среднеинтегральным остаточным напря-

Таблица 1

$D/d$ , мм/мм	$R$ , мм	Неупрочнённые образцы $\sigma_{-1}$ , МПа	Упрочнённые образцы					
			обработка	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\sigma_z^{нов}$ , МПа	$\psi_\sigma$	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
10/0	0,3	110	ПДО	155	-263	0,171	-126	0,357
			ОР, $P = 0,5$ кН	230	-732	0,164	-337	0,356
			ОР, $P = 1,0$ кН	267,5	-861	0,183	-454	0,347
	0,5	120	ПДО	137,5	-90	0,194	-48	0,365
			ОР, $P = 0,5$ кН	187,5	-311	0,217	-178	0,379
			ОР, $P = 1,0$ кН	250	-517	0,251	-333	0,390
25/0	0,3	107,5	ПДО	137,5	-343	0,087	-87	0,345
			ОР, $P = 0,5$ кН	165	-787	0,073	-171	0,336
			ОР, $P = 1,0$ кН	175	-908	0,074	-202	0,334
	0,5	112,5	ПДО	130	-142	0,123	-52	0,337
			ОР, $P = 0,5$ кН	150	-349	0,107	-111	0,338
			ОР, $P = 1,0$ кН	172,5	-515	0,117	-169	0,355
50/40	0,5	60	ОР, $P = 0,5$ кН	87,5	-311	0,088	-82	0,335
			ОР, $P = 1,0$ кН	105	-517	0,087	-133	0,338

жениям — приводит к существенно меньшему рассеянию соответствующего коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$ . Коэффициент  $\bar{\psi}_\sigma$  в проведённом исследовании изменяется от 0,334 до 0,390, составляя в среднем 0,351, что практически совпадает с значением  $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$ , установленным в [2] для упрочнённых образцов и деталей с аналогичной концентрацией напряжений.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

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

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ПОЛЫХЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

© 2012 В.А. Кирпичёв, А.С. Букатый, О.Ю. Семёнова, Ю.С. Ларионова, А.В. Кузнецов

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

## REGULARITIES OF SURFACE TREATMENT INFLUENCE ON RESIDUAL STRESSES AND LIMIT OF ENDURANCE OF HOLLOW CYLINDRICAL DETAILS

© 2012 V.A. Kirpichev, A.S. Bukatyi, O.Yu. Semyonova, Yu.S. Larionova, A.V. Kuznetsov