

Павлов В.Ф., Вакулюк В.С., Петрова Ю.Н.,  
Катанаява Ю.А., Селищев П.А.

## ЗАВИСИМОСТЬ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ ОТ РАЗМЕРА ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

Для исследования зависимости влияния на предел выносливости размера поперечного сечения поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами напряжений были проведены эксперименты на цилиндрических упрочнённых и неупрочнённых образцах различного диаметра из стали 20 с круговыми надрезами полукруглого профиля.

Цилиндрические образцы сплошного сечения диаметром  $D_1 = 10$  мм,  $D_1 = 25$  мм и  $D_1 = 50$  мм (рис. 1) упрочнялись пневмодробеструйной обработкой (ПДО) дробью диаметром 1,5–2,5 мм при давлении воздуха 0,28 МПа в течение 10 минут, а также обкаткой роликом диаметром 60 мм и профильным радиусом 1,6 мм при усилии  $P = 0,5$  кН (ОР1) и  $P = 1,0$  кН (ОР2) с подачей 0,11 мм/об и скоростью вращения образца 400 об/мин. На все упрочнённые и неупрочнённые гладкие образцы наносились надрезы полукруглого профиля радиуса  $R = 0,5$  мм (рис. 1).

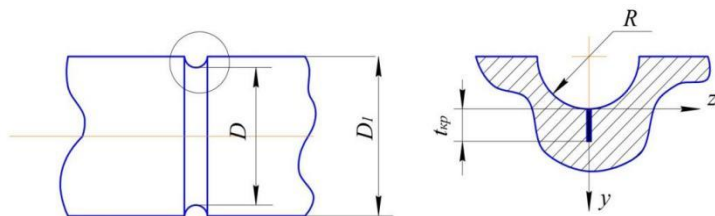


Рис. 1. Цилиндрический образец с надрезом полукруглого профиля и нераспространяющаяся трещина усталости

Распределение остаточных напряжений в гладких образцах определялось экспериментально методом колец и полосок [1]. Эпюры осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя  $a$  гладких образцов изображены на рис. 2. Видно, что сжимающие остаточные напряжения и глубина их залегания при одной и той же упрочняющей обработке с повышением диаметра увеличиваются, что объясняется повышением жёсткости образцов с увеличением размеров поперечного сечения. Следует отметить также, что при этом реактивные (растягивающие) остаточные напряжения в сердцевине образцов с повышением диаметра уменьшаются.

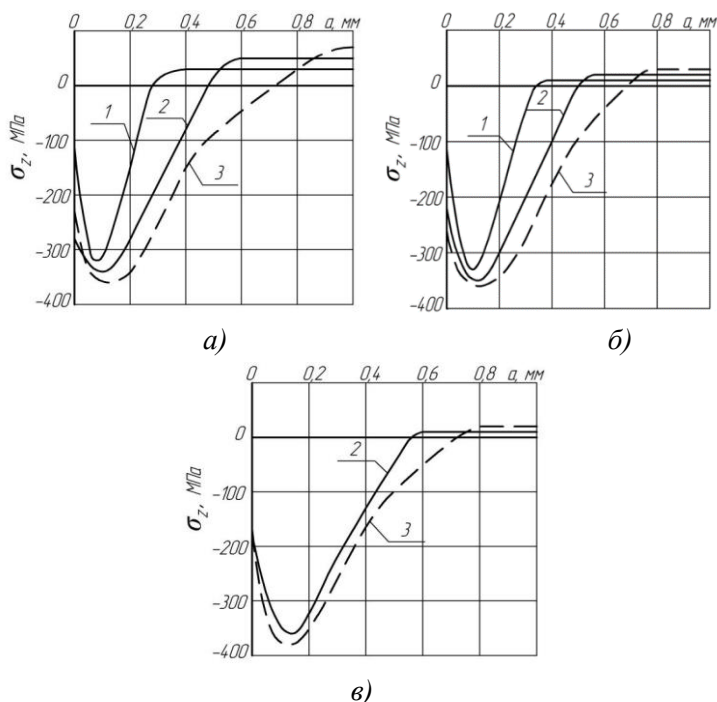


Рис. 2. Осевые  $\sigma_z$  остаточные напряжения в упрочнённых гладких образцах диаметром 10 мм (а), 25 мм (б) и 50 мм (в) после: 1 – ПДО, 2 – ОР1, 3 – ОР2

Остаточные напряжения в образцах с надрезами определялись расчётным путём – суммированием дополнительных остаточных напряжений за счёт перераспределения остаточных усилий после нанесения надреза и остаточных напряжений гладких образцов. Дополнительные остаточные напряжения определялись аналитическим [2] и численным методом с использованием программного комплекса Nastran/Patran [3]. Результаты вычисления дополнительных остаточных напряжений двумя методами имели хорошее совпадение. Значения остаточных напряжений на поверхности дна надреза  $\sigma_z^{пов}$  приведены в табл. 1. Видно, что при одной и той же упрочняющей обработке сжимающие остаточные напряжения на поверхности надреза  $\sigma_z^{пов}$  с увеличением диаметра образца увеличиваются.

Испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла образцов диаметром 10 мм проводились на машине МУИ-6000, диаметром 25 мм – на машине УММ-01, диаметром 50 мм – на машине УМП-02; база испытаний –  $3 \cdot 10^6$  циклов нагружения.

Значения предела выносливости  $\sigma_{-1}$  приведены в табл. 1. Упрочнённые образцы, выстоявшие базу испытаний при напряжении, равном  $\sigma_{-1}$ , испытывались до разрушения при больших напряжениях. На изломах этих образцов были видны нераспространяющиеся трещины усталости, глубина  $t_{кр}$  которых представлена в табл. 1.

Измеренная в настоящем исследовании критическая глубина  $t_{кр}$  нераспространяющейся трещины усталости несущественно (3,2%) отличается от величины  $t_{кр}$ , рассчитанной по зависимости, установленной в работе [4] на основании анализа большого числа экспериментов

$$t_{кр} = 0,0216 D, \quad (1)$$

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

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

$D_1$ , мм	$D$ , мм	Неупрочнённые образцы $\sigma_{-1}$ , МПа	Упрочнённые образцы						
			обра- ботка	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\sigma_z^{нов}$ , МПа	$\psi_\sigma$	$t_{кр}$ , мм	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
10	9	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	24	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	49	92,5	ОР1	122,5	-396	0,078	1,077	-82	0,366
			ОР2	132,5	-547	0,073	1,024	-112	0,357

Из приведённых в табл. 1 данных видно, что пневмодробес-  
струйная обработка и обкатка роликом приводят к повышению пре-  
дела выносливости образцов с надрезом. Наибольшее увеличение  
предела выносливости наблюдается при обкатке роликом, что объ-  
ясняется бóльшей глубиной залегания сжимающих остаточных  
напряжений в гладких упрочнённых образцах (рис. 2).

Влияние поверхностного упрочнения на приращение предела  
выносливости  $\Delta\sigma_{-1}$  образцов с надрезом оценивалось по двум кри-  
териям: осевым остаточным напряжениям на поверхности надреза  
 $\sigma_z^{нов}$  [5] и среднеинтегральным остаточным напряжениям  $\bar{\sigma}_{ост}$  [6, 7]

$$\Delta\sigma_{-1} = \psi_\sigma \left| \sigma_z^{нов} \right|, \quad (2)$$

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_\sigma \left| \bar{\sigma}_{ост} \right|, \quad (3)$$

где  $\psi_\sigma$  и  $\bar{\psi}_\sigma$  – коэффициенты влияния поверхностного упрочнения  
на предел выносливости по критериям  $\sigma_z^{нов}$  и  $\bar{\sigma}_{ост}$ , соответственно;

$$\bar{\sigma}_{осм} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi; \quad (4)$$

$\sigma_z(\xi)$  – осевые остаточные напряжения в опасном сечении образца с концентратором по толщине поверхностного слоя  $a$ ;  $\xi = a/t_{кр}$  – расстояние от поверхности опасного сечения образца до текущего слоя, выраженное в долях  $t_{кр}$ .

Из приведённых в табл. 1 данных видно, что с повышением диаметра образцов от 10 мм до 50 мм приращение предела выносливости при одних и тех же режимах упрочняющей обработки уменьшается. Эта закономерность объясняется тем, что толщина слоя со сжимающими остаточными напряжениями при повышении диаметра увеличивается несущественно по сравнению с толщиной поверхностного слоя образцов, ответственной за увеличение предела выносливости, равной критической глубине  $t_{кр}$  нераспространяющейся трещины усталости. Для сохранения эффекта упрочнения с повышением диаметра детали необходимо, в соответствии с формулами (1) и (4), повышать толщину слоя со сжимающими остаточными напряжениями пропорционально критической глубине  $t_{кр}$  нераспространяющейся трещины усталости.

Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов различного диаметра с концентраторами напряжений по критерию  $\sigma_z^{пов}$  приводит к значительному рассеянию соответствующего коэффициента влияния  $\psi_\sigma$ , который в проведённом исследовании изменяется почти в 3,5 раза, что неприемлемо для оценки приращения предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей.

Оценка влияния поверхностного упрочнения по критерию  $\bar{\sigma}_{осм}$  приводит к значительно меньшему рассеянию соответствующе-

шего коэффициента влияния  $\bar{\psi}_\sigma$ . 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 [4] для упрочнённых образцов и деталей с аналогичной концентрацией напряжений.

### *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. 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.
5. Кравченко, Б.А. Обработка и выносливость высокопрочных материалов / Б.А. Кравченко, К.Ф. Митряев. – Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 1968. – 131 с.
6. Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – С. 29–32.

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.