

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

ВЛИЯНИЕ РАДИУСА НАДРЕЗА НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ДЕТАЛИ ПРИ ОПЕРЕЖАЮЩЕМ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

В исследовании изучалось влияние радиуса надреза при опережающем поверхностном пластическом деформировании (ОППД) сплошных цилиндрических образцов диаметром $D_1 = 25$ мм и образцов с отверстием $D_1/d = 25/15$ мм/мм (рис. 1) на предел выносливости при изгибе. Гладкие образцы из стали 20 ($\sigma_g = 522$ МПа, $\sigma_T = 395$ МПа, $\delta = 26,1\%$, $\psi = 65,9\%$, $S_k = 1416$ МПа) подвергались пневмодробеструйной обработке (ПДО) дробью диаметром 1,5 – 2 мм при давлении воздуха 0,25 МПа в течение 10 минут, а также обкатке роликом (ОР) диаметром 60 мм и профильным радиусом 1,6 мм при усилии $P = 0,5$ кН (ОР-1) и $P = 1,0$ кН (ОР-2) с подачей 0,11 мм/об и скоростью вращения образца 400 об/мин. Затем на все упрочнённые и неупрочнённые гладкие образцы диаметром 25 мм наносились круговые надрезы полукруглого профиля трёх радиусов: $R = 0,3$ мм, $R = 0,5$ мм и $R = 1,0$ мм.

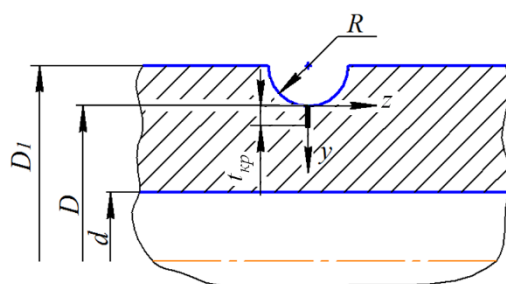


Рис. 1. Надрез полукруглого профиля и
нераспространяющаяся трещина усталости

Остаточные напряжения в гладких образцах определялись экспериментально методом колец и полосок [1]. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a гладких образцов приведено на рис. 2. Из данных рис. 2 можно видеть, что при одной и той же упрочняющей обработке в гладких образцах с отверстием сжимающие остаточные напряжения по максимальной величине примерно одинаковы с напряжениями сплошных образцов, а глубина смены знака этих напряжений для образцов с отверстием меньше, чем для сплошных образцов. Следует также отметить, что значения реактивных растягивающих остаточных напряжений под упрочнённым слоем в образцах с отверстием выше, чем в сплошных образцах. Все эти особенности характера

распределения остаточных напряжений необходимо учитывать при прогнозировании предела выносливости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений.

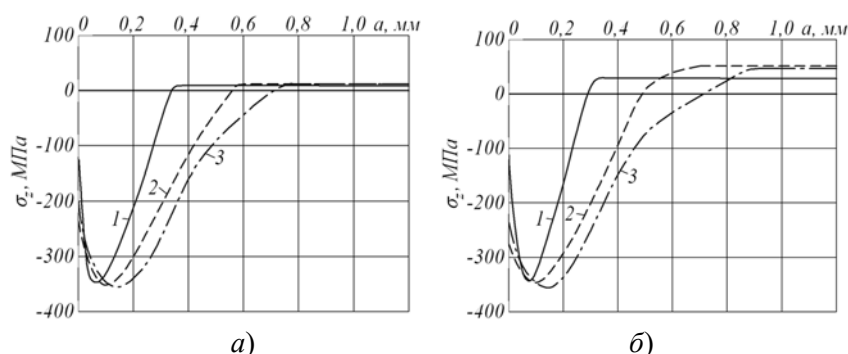


Рис. 2. Осевые σ_z остаточные напряжения в упрочнённых гладких сплошных образцах диаметром $D_1 = 25$ мм (а) и полых образцах диаметром $D_1/d = 25/15$ мм/мм (б) после: 1 – ПДО; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН

Из данных рис. 2 следует, что после нанесения на упрочнённые ПДО образцы надрезов с радиусами $R = 0,3$ мм, $R = 0,5$ мм и $R = 1,0$ мм материал на дне концентраторов находится в ненаклёпанном состоянии. Такое же состояние наблюдается после нанесения на упрочнённые обкаткой роликом образцы при $P = 0,5$ кН надрезов с радиусом $R = 0,5$ мм и $R = 1,0$ мм. Для образцов с надрезами $R = 1,0$ мм во всех случаях упрочнения материал на дне концентраторов находится в ненаклёпанном состоянии. В остальных случаях обкатки роликом материал на дне надрезов находится в наклёпанном состоянии ($P = 0,5$ кН – $R = 0,3$ мм; $P = 1,0$ кН – $R = 0,3$ мм и $R = 0,5$ мм).

Остаточные напряжения в упрочнённых образцах с надрезами определялись аналитическим методом – суммированием дополнительных остаточных напряжений за счёт перераспределения остаточных усилий при нанесении надреза и остаточных напряжений гладких образцов [2], а также численным методом с использованием программного комплекса Nastran\Patran. Следует отметить, что остаточные напряжения в образцах с надрезами, определённые аналитическим и численным методами, имели хорошее совпадение. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя а наименьшего сечения образцов приведено на рис. 3 и рис. 4.

Анализируя данные рис. 2 – 4, можно видеть, что при практически одинаковых максимальных остаточных напряжениях гладких образцов, в образцах с надрезами одного радиуса остаточные напряжения тем выше, чем больше толщина поверхностного слоя гладких образцов со сжимающими остаточными напряжениями. Эта закономерность объясняется концентрацией остаточных напряжений в области дна надреза [2].

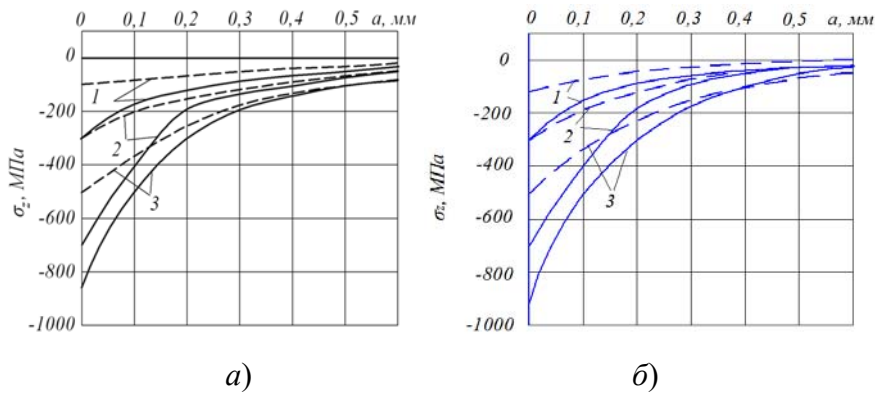


Рис. 3. Осевые σ_z остаточные напряжения в сплошных (а) и полых (б) упрочнённых образцах с надрезами (— — — — — $R = 0,3$ мм; - - - - - $R = 0,5$ мм) после:
 1 – ПДО; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН

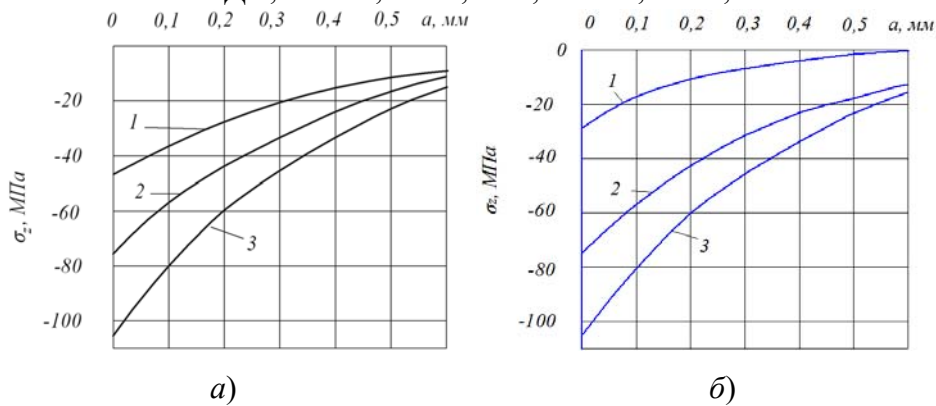


Рис. 4. Осевые σ_z остаточные напряжения в сплошных (а) и полых (б) упрочнённых образцах с надрезами $R = 1,0$ мм после:
 1 – ПДО; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН

Испытания на усталость при поперечном изгибе в случае симметричного цикла образцов с надрезами проводились на машине УММ-01 [3], база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости σ_{-1} представлены в таблице. Выстоявшие базу испытаний упрочнённые образцы при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при большем напряжении. Во всех упрочнённых образцах были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, средняя глубина $t_{кр}$ которых для каждой партии образцов представлена в таблице. Следует отметить, что значения $t_{кр}$ хорошо согласуются с установленной ранее [4, 5] зависимостью

$$t_{кр} = 0,0216D \left[1 - 0,04 \left(\frac{d}{D} \right)^2 - 0,54 \left(\frac{d}{D} \right)^3 \right], \quad (1)$$

где D – диаметр опасного сечения упрочнённого образца (детали) с концентратором напряжений, d – диаметр отверстия.

Таблица 1 – Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

D, мм	d, мм	R, мм	Неупроч образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы						
				обработка	σ_{-1} , МПа	σ_z^{nos} , МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
24,4	0	0,3	107,5	ПДО	137,5	-343	0,087	0,540	-87	0,345
				ОР-1	165	-787	0,073	0,510	-171	0,336
				ОР-2	175	-908	0,074	0,520	-202	0,334
24,0	0	0,5	112,5	ПДО	130	-142	0,123	0,525	-52	0,337
				ОР-1	150	-349	0,107	0,530	-111	0,338
				ОР-2	172,5	-515	0,117	0,520	-169	0,355
23,0	0	1,0	112,5	ПДО	120	-46	0,163	0,490	-21	0,357
				ОР-1	130	-92	0,190	0,510	-46	0,380
				ОР-2	142,5	-145	0,207	0,495	-79	0,380
24,4	15	0,3	95	ПДО	127,5	-307	0,106	0,452	-88	0,368
				ОР-1	155	-732	0,082	0,445	-181	0,331
				ОР-2	177,5	-861	0,096	0,442	-248	0,333
24,0	15	0,5	110	ПДО	127,5	-124	0,121	0,438	-47	0,372
				ОР-1	152,5	-311	0,137	0,442	-128	0,332
				ОР-2	182,5	-517	0,140	0,446	-218	0,333
23,0	15	1,0	90	ПДО	95	-29	0,175	0,410	-14	0,357
				ОР-1	105	-77	0,195	0,420	-39	0,384
				ОР-2	110	-105	0,191	0,420	-53	0,377

Из данных таблицы видно, что с увеличением радиуса надреза приращение предела выносливости образцов за счёт упрочнения снижается, так как уменьшаются сжимающие остаточные напряжения в их опасном сечении. Поэтому для сохранения эффекта упрочнения при опережающем поверхностном пластическом деформировании с увеличением глубины надреза необходимо увеличивать толщину слоя гладкой детали со сжимающими остаточными напряжениями.

Для оценки приращения предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ за счёт поверхностного упрочнения использовались два критерия влияния остаточных напряжений на предел выносливости при изгибе в случае симметричного цикла. Первым критерием [6-9] являются осевые остаточные напряжения σ_z^{nos} на поверхности концентратора. Зависимость для определения приращения предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ упрочнённых образцов (деталей) в этом случае имеет вид

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

где ψ_σ – коэффициент влияния остаточных напряжений по критерию σ_z^{nos} на предел выносливости при изгибе.

Для определения второго критерия в работе [10] использовалось решение задачи [2] о дополнительных остаточных напряжениях в наименьшем сечении образца (детали) после нанесения на упрочнённую поверхность надреза полуэллиптического профиля. Выделив

основную часть решения [2], был получен второй критерий $\bar{\sigma}_{ocm}$ влияния упрочнения на предел выносливости образца (детали) в виде

$$\bar{\sigma}_{ocm} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad (3)$$

где $\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в наименьшем (опасном) сечении образца (детали), $\xi = a/t_{кр}$ – расстояние от дна концентратора до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$, $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе образца (детали) на пределе выносливости.

Критерий $\bar{\sigma}_{ocm}$, который называется критерием среднеинтегральных остаточных напряжений, имеет чётко выраженный физический смысл – это остаточное напряжение на дне нераспространяющейся трещины усталости с точностью до постоянного коэффициента, зависящего от радиуса у дна трещины и её глубины. Приращение предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ при изгибе в случае симметричного цикла с использованием критерия $\bar{\sigma}_{ocm}$ определяется по следующей формуле:

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_{\sigma} |\bar{\sigma}_{ocm}|, \quad (4)$$

где $\bar{\psi}_{\sigma}$ – коэффициент влияния остаточных напряжений по критерию $\bar{\sigma}_{ocm}$ на предел выносливости при изгибе.

Значения остаточных напряжений на поверхности надрезов $\sigma_z^{нов}$ и среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ocm}$ приведены в таблице. По результатам испытаний на усталость неупрочнённых и упрочнённых образцов по формулам (2) и (4) вычислялись коэффициенты ψ_{σ} и $\bar{\psi}_{\sigma}$, значения которых представлены в таблице. Из данных таблицы можно видеть, что оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов по первому критерию – остаточным напряжениям на поверхности концентратора $\sigma_z^{нов}$ – приводит к значительному рассеянию коэффициента ψ_{σ} . Этот коэффициент в настоящем исследовании изменяется в широких пределах – от 0,073 до 0,207, то есть в три раза, что неприемлемо для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей.

Оценка влияния поверхностного упрочнения по второму критерию – среднеинтегральным остаточным напряжениям $\bar{\sigma}_{ocm}$ – приводит к существенно меньшему рассеянию соответствующего коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$. Это объясняется тем, что критерий среднеинтегральных остаточных напряжений учитывает влияние на сопротивление

усталости не только величины сжимающих остаточных напряжений, но и характера их распределения по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали (образца). Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ в проведённом исследовании изменяется от 0,331 до 0,384, составляя в среднем 0,350, и практически совпадает со значением $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$, установленным в [5] для упрочнённых образцов и деталей с аналогичной концентрацией напряжений.

Выводы

1. Проведённое исследование показало, что с увеличением радиуса надреза при опережающем поверхностном пластическом деформировании сжимающие остаточные напряжения в опасном сечении образца (детали) уменьшаются – в результате предел выносливости снижается. Для сохранения эффекта упрочнения необходимо увеличивать толщину поверхностного слоя со сжимающими остаточными напряжениями при ОПД.

2. Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ даёт приемлемые для практики результаты – коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ изменяется в значительно меньших пределах, чем коэффициент ψ_σ . Поэтому критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ представляется возможным использовать для прогнозирования предела выносливости цилиндрических образцов с круговыми надрезами после опережающего поверхностного пластического деформирования.

Библиографический список

1. Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок [Текст]/ 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 [Текст]/ С.И. Иванов, М.П. Шатунов, В.Ф. Павлов // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1974. – Вып.1. – С. 88-95.
3. Филатов, Э.Я. Универсальный комплекс машин для испытания материалов и конструкций на усталость [Текст]/ Э.Я. Филатов, В.Э. Павловский. – Киев: Наукова Думка, 1985. – 92 с.
4. Павлов, В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение I. Сплошные детали [Текст]/ В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – №8. – С. 22-26.

5. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям: монография [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.

6. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений и наклёпа на усталостную прочность [Текст] / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов // Проблемы прочности. – 1976. – №5. – С. 25-27.

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

8. Кравченко, Б.А. Обработка и выносливость высокопрочных материалов [Текст] / Б.А. Кравченко, К.Ф. Митряев. – Куйбышев: Куйбышев. книж. изд-во, 1968. – 131 с.

9. Туровский, М.Л. Концентрация напряжений в поверхностном слое цементированной стали [Текст] / М.Л. Туровский, Н.М. Шифрин // Вестник машиностроения. – 1970. – №11. – С. 37-40.

10. Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений [Текст] / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.