

## СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ ДЕТАЛИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТОЛЩИНЫ УПРОЧНЁННОГО СЛОЯ ПРИ ОПЕРЕЖАЮЩЕМ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

© 2012 В. С. Вакулюк

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

Установлено, что при опережающем поверхностном пластическом деформировании предел выносливости детали с концентратором тем выше, чем больше толщина упрочнённого поверхностного слоя со сжимающими остаточными напряжениями.

*Опережающее поверхностное пластическое деформирование, толщина упрочнённого слоя, остаточные напряжения, деталь с концентратором, предел выносливости.*

Исследовалось влияние толщины упрочнённого поверхностного слоя при опережающем поверхностном пластическом деформировании (ОППД) на предел выносливости образцов из стали 20 ( $\sigma_s = 522$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 395$  МПа,  $\delta = 26,1\%$ ,  $\psi = 65,9\%$ ,  $S_k = 1416$  МПа) в условиях концентрации напряжений. Для создания упрочнённого слоя различной толщины гладкие образцы диаметром  $D = 10$  мм и  $D = 25$  мм 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 и  $P = 1,0$  кН с подачей 0,11 мм/об и скоростью вращения образца 400 об/мин. Остаточные напряжения в гладких образцах определялись методом удаления части цилиндрической поверхности [1], а также методом колец и полосок [2]. Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине  $a$  поверхностного слоя гладких образцов приведено на рис. 1.

Из приведённых на рис. 1 эпюр остаточных напряжений можно видеть, что в образцах диаметром  $D = 25$  мм сжимающие остаточные напряжения и глубина их залегания несколько выше, чем в образцах диаметром  $D = 10$  мм, за счёт повышения жёсткости образцов с увеличением диаметра. Максимальные сжимающие остаточные напряжения после использованных в исследовании методов поверхностного упрочнения различаются незначительно, составляя после

пневмодробеструйной обработки - 338 МПа ( $D = 10$  мм) и - 342 МПа ( $D = 25$  мм), а после обкатки роликом - 362 МПа ( $D = 10$  мм) и - 364 МПа ( $D = 25$  мм). Однако толщина слоя со сжимающими остаточными напряжениями (толщина упрочнённого слоя) различается существенно, составляя после ПДО 0,29 мм ( $D = 10$  мм) и 0,33 мм ( $D = 25$  мм), после ОР при  $P = 0,5$  кН – 0,48 мм ( $D = 10$  мм) и 0,52 мм ( $D = 25$  мм), а после ОР при  $P = 1,0$  кН – 0,69 мм ( $D = 10$  мм) и 0,71 мм ( $D = 25$  мм). Следовательно, толщина упрочнённого слоя со сжимающими остаточными напряжениями после обкатки роликом при  $P = 1,0$  кН превышает соответствующую толщину слоя после пневмодробеструйной обработки в 2,2 – 2,4 раза.

На все неупрочнённые и упрочнённые гладкие образцы фасонным резцом наносились круговые надрезы полукруглого профиля двух радиусов:  $R = 0,3$  мм и  $R = 0,5$  мм.

Остаточные напряжения в упрочнённых образцах с надрезами определялись как аналитическим, так и численным методами – суммированием дополнительных остаточных напряжений, возникающих за счёт перераспределения остаточных усилий образцов при нанесении надрезов, и исходных остаточных напряжений [3].

Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине  $a$  поверхностного слоя наименьшего сечения образцов с надрезами приведено на рис. 2.

Из приведённых на рис. 2 данных видно, что в упрочнённых роликом образцах с надрезами сжимающие остаточные напря-

жения существенно выше как на поверхности, так и по толщине поверхностного слоя наименьшего сечения, чем в образцах, упрочнённых пневмодробеструйной обработкой. Такое различие в распределении оста-

точных напряжений образцов с надрезами обусловлено тем, что толщина упрочнённого поверхностного слоя гладких образцов после обкатки роликом больше, чем после пневмодробеструйной обработки (рис. 1).

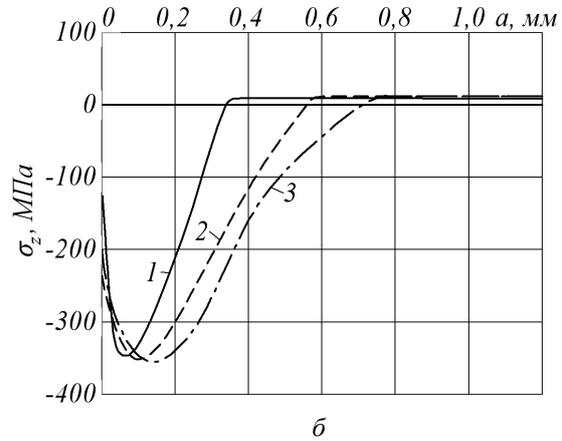
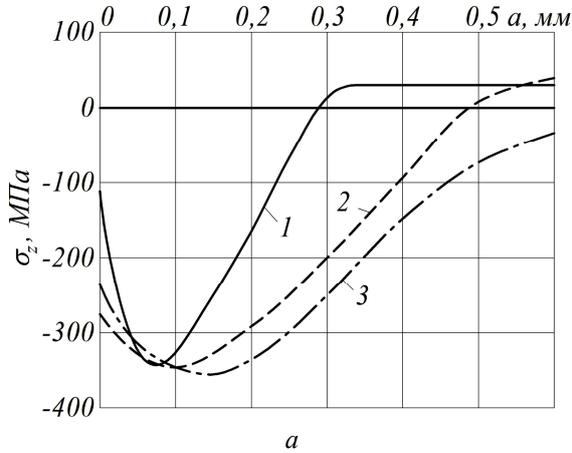


Рис. 1. Осевые  $\sigma_z$  остаточные напряжения в гладких образцах диаметром  $D = 10$  мм (а) и  $D = 25$  мм (б) после: 1 – ПДО; 2 – ОР,  $P = 0,5$  кН; 3 – ОР,  $P = 1,0$  кН

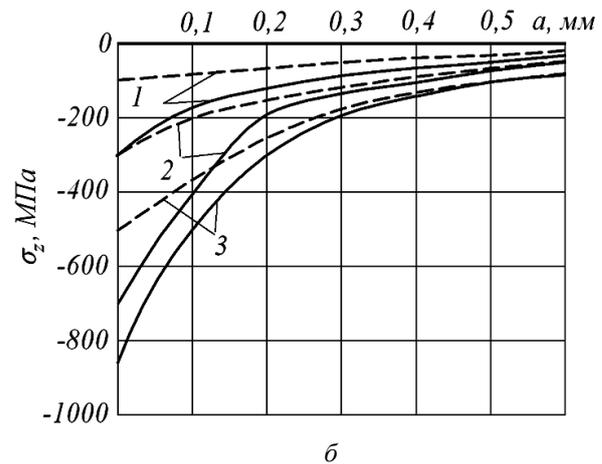
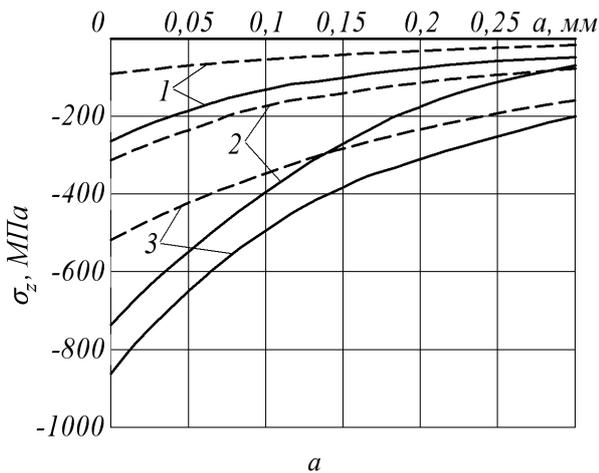


Рис. 2. Осевые  $\sigma_z$  остаточные напряжения в образцах диаметром  $D = 10$  мм (а) и  $D = 25$  мм (б) с надрезами (— —  $R = 0,3$  мм; ---- —  $R = 0,5$  мм) после: 1 – ПДО; 2 – ОР,  $P = 0,5$  кН; 3 – ОР,  $P = 1,0$  кН

Испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла образцов с надрезами диаметром  $D = 10$  мм проводились на машине МУИ-6000, диаметром  $D = 25$  мм – на машине УММ-01 [4], база испытаний –  $3 \cdot 10^6$  циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости  $\sigma_{-1}$  приведены в табл. 1. Из приведённых в табл. 1 данных следует, что предел выносливости образцов с надрезами после обкатки роликом существенно выше, чем после пневмодробеструйной обработки.

При радиусе надреза  $R=0,3$  мм предел выносливости  $\sigma_{-1}$  образцов после ОР ( $P=1,0$  кН) повысился в 2,4 ( $D = 10$  мм) и в

1,6 ( $D = 25$  мм) раза, а после ПДО только в 1,4 ( $D = 10$  мм) и в 1,3 ( $D = 25$  мм) раза. С увеличением радиуса надреза до 0,5 мм это различие повышается. Следовательно, при увеличении толщины упрочнённого поверхностного слоя гладких образцов при ОПД предел выносливости образцов с надрезами, нанесёнными на эти гладкие образцы, повышается.

В упрочнённых образцах после испытаний на усталость были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, которые для образцов диаметром  $D = 10$  мм имели концентрическую, а для образцов диаметром  $D = 25$  мм – серповидную форму. Концентрическая форма трещины объясня-

ется тем, что испытания образцов диаметром  $D = 10$  мм проводились при изгибе с вращением образца, а диаметром  $D = 25$  мм – при изгибе в одной плоскости.

На рис. 3, 4 представлены фотографии изломов образцов диаметром  $D = 10$  мм (рис. 3) и диаметром  $D = 25$  мм (рис. 4), на которых видны нераспространяющиеся трещины усталости 2.

Средняя критическая глубина трещин  $t_{кр}$  в образцах, испытанных при напряжении,

равных пределу выносливости, составляла при  $D = 10$  мм  $t_{кр} = 0,201$  мм ( $R = 0,3$  мм) и  $t_{кр} = 0,197$  мм ( $R = 0,5$  мм), при  $D = 25$  мм  $t_{кр} = 0,525$  мм ( $R = 0,3$  мм) и  $t_{кр} = 0,523$  мм ( $R = 0,5$  мм), что соответствует данным работы [5] о зависимости величины  $t_{кр}$  от диаметра опасного сечения образцов и деталей, изготовленных из других сталей и сплавов.

Таблица 1. Результаты испытаний на усталость образцов с надрезами

Диаметр образца $D$ , мм	Надрез $R$ , мм	Неупрочн. образцы $\sigma_{-1}$ , МПа	Упрочнённые образцы			
			обработка	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$
10	0,3	110	ПДО	155	-126	0,357
			ОР, $P = 0,5$ кН	230	-337	0,356
			ОР, $P = 1,0$ кН	267,5	-454	0,347
	0,5	120	ПДО	137,5	-48	0,365
			ОР, $P = 0,5$ кН	187,5	-178	0,379
			ОР, $P = 1,0$ кН	250	-333	0,390
25	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	112,5	ПДО	130	-52	0,337
			ОР, $P = 0,5$ кН	150	-111	0,338
			ОР, $P = 1,0$ кН	172,5	-169	0,355

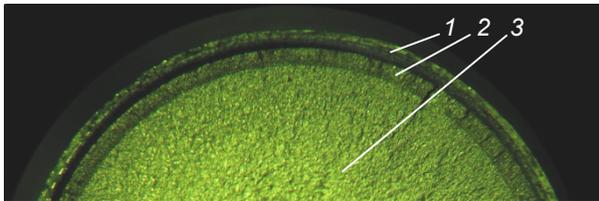


Рис. 3. Излом упрочнённого дробью образца диаметром  $D = 10$  мм с надрезом  $R = 0,5$  мм: 1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома

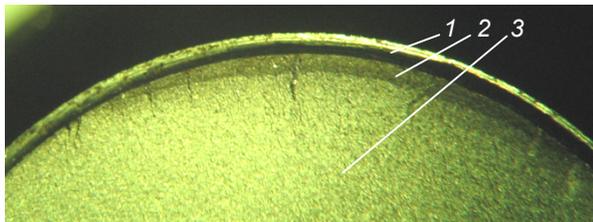


Рис. 4. Излом упрочнённого дробью образца диаметром  $D = 25$  мм с надрезом  $R = 0,5$  мм: 1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома

Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов

с надрезами проводилась по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  [5, 6]:

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

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

Приращение предела выносливости упрочнённых образцов  $\Delta\sigma_{-1}$  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 раз-

рушению.

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 для образцов диаметром  $D = 10$  мм значение 0,366, для образцов диаметром  $D = 25$  мм – 0,341, и незначительно отличается от значения  $\bar{\psi}_{\sigma} = 0,36$ , установленного в [5] для упрочнённых образцов и деталей с аналогичной концентрацией напряжений. Меньшее в среднем значение коэффициента  $\bar{\psi}_{\sigma}$  для образцов диаметром  $D = 25$  мм объясняется, очевидно, большей концентрацией напряжений с увеличением диаметра образца при одном и том же радиусе полукруглого надреза, на что указывалось в работе [7].

### Выводы

1. 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.

2. С увеличением диаметра гладких образцов (деталей) при одной и той же поверхностной упрочняющей обработке толщина слоя со сжимающими остаточными напряжениями возрастает за счёт повышения жёсткости образцов при увеличении диаметра.

3. Критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости  $t_{кр}$  для образцов из стали 20 диаметром  $D=10$  мм и  $D=25$  мм соответствует установленный ранее зависимости  $t_{кр}$  от диаметра опасного сечения образцов и деталей, изготовленных из других материалов.

### Библиографический список

1. Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом снятия части поверхности [Текст] / С.И. Иванов, И.В. Григорьева // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций - КуАИ – Куйбышев, 1971. – Вып. 48. – С. 179-183.
2. Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок [Текст] / С.И. Иванов // Остаточные напряжения -КуАИ – Куйбышев: 1971. – Вып. 53. – С. 32-42.
3. 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 - КуАИ – Куйбышев, 1974. – Вып. 1. – С. 88-95.
4. Филатов, Э.Я. Универсальный комплекс машин для испытания материалов и конструкций на усталость [Текст] / Э.Я. Филатов, В.Э. Павловский. – Киев: Наукова Думка, 1985. – 92с.
5. Павлов, В.Ф. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.Б. Иванов. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. – 64 с.
6. Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений [Текст] / В.Ф. Павлов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.
7. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений / В.А. Кирпичёв, А.П. Филатов, О.В. Каранаева [и др.]// Прочность материалов и элементов конструкций. тр. МНТК – Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2011. – С. 678-685.

**THE DEPENDENCE OF DETAIL FATIGUE RESISTANCE ON THE THICKNESS OF HARDENING LAYER UNDER OUTSTRIPPING SUPERFICIAL PLASTIC DEFORMING**

© 2012 V. S. Vakuljuk

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov  
(National Research University)

The fact, that the part with a concentrator endurance limit under outstripping superficial plastic deforming depends on the hardened surface layer with compressive residual stresses thickness has been established.

*Outstripping superficial plastic deforming, hardened layer thickness, residual stresses, part with a concentrator, endurance limit.*

**Информация об авторах**

**Вакулюк Владимир Степанович**, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [sopromat@ssau.ru](mailto:sopromat@ssau.ru). Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

**Vakuljuk Vladimir Stepanovich**, candidate of technical sciences, associate professor of strength of materials department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [sopromat@ssau.ru](mailto:sopromat@ssau.ru). Area of research: residual stresses mechanics.