

УДК 621.787:539.319

## ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ПРИ ИЗГИБЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

© 2012 О. Ю. Семёнова, В. А. Кирпичёв, Е. А. Денискина

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

В статье рассматривается прогнозирование приращения предела выносливости при изгибе упрочнённой детали после опережающего поверхностного пластического деформирования при нанесении на неё концентратора в виде кругового надреза полукруглого профиля и приводится оценка точности значения коэффициента влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости цилиндрических деталей различных размеров.

*Поверхностное пластическое деформирование, деталь с концентратором, остаточные напряжения, предел выносливости, коэффициент влияния остаточных напряжений.*

Для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей с концентраторами по остаточным напряжениям в настоящее время используются два критерия [1 – 3]. Первый критерий – остаточные напряжения на поверхности опасного сечения детали, как показали многочисленные исследования [2, 3], приводит к большой погрешности при прогнозировании предела выносливости. Второй критерий – среднеинтегральные остаточные напряжения  $\bar{\sigma}_{ост}$  [1] – учитывает влияние на предел выносливости не только величины, но и характера распределения остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя опасного сечения детали и приводит к существенно меньшей погрешности при прогнозировании предела выносливости.

Для прогнозирования приращения предела выносливости упрочнённых деталей и образцов с круговым надрезом полукруглого профиля применялся критерий среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  [1] в виде

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

где  $\sigma_z(\xi)$  – осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении детали с концентратором;  $\xi = y/t_{кр}$  – расстояние от дна впадины концентратора до текущего слоя, выраженное в долях  $t_{кр}$ ;  $t_{кр}$  – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей в детали при напряжении, равном пределу выносливости.

Приращение предела выносливости при изгибе в случае симметричного цикла

$\Delta\sigma_{-1}$  упрочнённой детали с использованием критерия  $\bar{\sigma}_{ост}$  определялось по формуле

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_\sigma \cdot |\bar{\sigma}_{ост}|, \quad (2)$$

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

Для сплошной цилиндрической детали критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости определяется выражением [2 – 4]

$$t_{кр} = 0,0216D,$$

где  $D$  – диаметр наименьшего поперечного сечения.

Для полый цилиндрической детали [2, 3, 5]

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

где  $d$  – диаметр отверстия.

При прогнозировании приращения предела выносливости упрочнённой детали по формуле (2) необходимо знать коэффициент  $\bar{\psi}_\sigma$  влияния остаточных напряжений на предел выносливости. С этой целью были проанализированы приведённые в работах [2–5] результаты испытаний на усталость при изгибе в случае симметричного цикла сплошных цилиндрических образцов диаметром  $D_1$  и полых – диаметром  $D_1/d$  (рис. 1), упрочнённых различными методами поверхностного пластического деформирования: пневмодробеструйной обработкой (ПДО), гидродробеструйной обработкой (ГДО), обкаткой роликом (ОР) с усилиями  $P = 0,5$  кН (ОР1) и  $P = 1,0$  кН (ОР2), алмазным выглаживанием (АВ). Во всех случаях после

упрочняющей обработки на цилиндрические образцы наносился круговой надрез полукруглого профиля радиуса  $R$  (рис. 1).

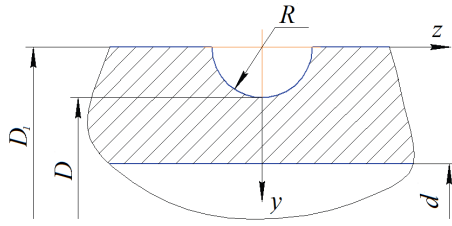


Рис. 1. Цилиндрический образец с надрезом полукруглого профиля

В табл. 1 приведены значения коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$  по результатам испытаний на усталость при изгибе сплошных цилиндрических образцов, а в табл. 2 – значения коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$  по результатам испытаний на усталость при изгибе полых цилиндрических образцов. В таблицах представлены также результаты измерения критической глубины нераспространяющейся трещины усталости  $t_{кр}$  и вычисленные критерии  $\bar{\sigma}_{ост}$ . Проанализированы результаты испытаний 89 партий образцов, средняя величина коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$  для которых составила 0,358.

Таблица 1. Значения коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$  по результатам испытаний на усталость при изгибе сплошных цилиндрических образцов

$D_1$ , мм	$R$ , мм	$D$ , мм	Материал, упрочняющая обработка	$t_{кр}$ , мм	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
7,5	0,3	6,9	сталь ЭИ961 (АВ)	0,160	-422	0,356
10	0,3	9,4	стали: 20 (ПДО, ОР1, ОР2), 45 (ГДО, ОР1, ОР2), 12Х18Н10Т (ГДО, ОР1), 30ХГСА (ГДО, ОР1), ЭИ961 (ГДО); сплавы: ЭИ437Б (ГДО), В93 (ГДО), Д16Т (ГДО)	0,195–0,209	-576 – (-59)	0,320 – 0,386
10	0,5	9,0	сталь 20 (ПДО, ОР1, ОР2)	0,192–0,202	-373 – (-48)	0,365 – 0,390
25	0,3	24,4	стали: 20 (ПДО, ОР1, ОР2), 45 (ГДО), 40Х (ГДО); сплав Д16Т (ГДО)	0,508–0,540	-202 – (-87)	0,334 – 0,386
25	0,5	24,0	сталь 20 (ПДО, ОР1, ОР2)	0,520–0,530	-169 – (-52)	0,337 – 0,355
25	1,0	23,0	стали: 20 (ПДО, ОР1, ОР2), 40Х (ОР2)	0,490–0,510	-292 – (-21)	0,334 – 0,380
40	0,3	39,4	сплав Д16Т (ГДО)	0,860	-85	0,352
50	0,3	49,4	сталь 45 (ГДО)	1,064	-67	0,372
15	0,3	14,4	стали: 45 (ГДО, ОР1), 30ХГСА (ГДО, ОР1), 12Х18Н10Т (ГДО, ОР1); сплавы: В95 (ПДО), Д16Т (ГДО)	0,300–0,314	-507 – (-129)	0,318 – 0,387
15	0,5	14,0	сталь 30ХГСА (ОР1)	0,300	-422	0,350

Таблица 2. Значения коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$  по результатам испытаний на усталость при изгибе полых цилиндрических образцов

$D_1$ , мм	$d$ , мм	$R$ , мм	$D$ , мм	Материал, упрочняющая обработка	$t_{кр}$ , мм	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
1	2	3	4	5	6	7	8
15	5	0,3	14,4	стали: 45 (ГДО, ОР1), 30ХГСА (ГДО, ОР1), 12Х18Н10Т (ГДО); сплавы: В95 (ПДО), Д16Т (ПДО, ГДО)	0,294 – 0,310	-510 – (-126)	0,335 – 0,383
15	5	0,5	14,0	сталь 30ХГСА (ОР1); сплавы: В95 (ПДО), Д16Т (ПДО)	0,302 – 0,320	-404 – (-72)	0,341 – 0,381
15	8	0,3	14,4	сталь 45 (ОР1)	0,276	-357	0,336
15	10	0,3	14,4	стали: 45 (ГДО, ОР1), 30ХГСА (ГДО, ОР1), 12Х18Н10Т (ГДО); сплав Д16Т (ГДО)	0,243 – 0,257	-592 – (-117)	0,330 – 0,388
15	10	0,5	14,0	сталь 30ХГСА (ОР1)	0,262	-321	0,358
15	12,4	0,3	14,4	сталь 45 (ГДО)	0,184	-136	0,348
25	10	0,3	24,4	сталь 40Х (ГДО)	0,520	-114	0,373
25	10	1,0	23,0	сталь 40Х (ОР2)	0,510	-293	0,410

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8
25	15	0,3	24,4	стали 45 (ГДО), 20 (ПДО, ОР1, ОР2)	0,442 – 0,477	-248 – (-88,4)	0,331 – 0,368
25	15	0,5	24,0	сталь 20 (ПДО, ОР1, ОР2)	0,438 – 0,446	-218 – (-47)	0,332 – 0,372
25	15	1,0	23,0	сталь 20 (ПДО, ОР1, ОР2)	0,410 – 0,420	-53 – (-14)	0,357 – 0,384
25	19	0,3	24,4	сталь 40Х (ГДО)	0,360	-111	0,360
25	19	1,0	23,0	сталь 40Х (ОР2)	0,340	-193	0,364
50	40	0,3	49,4	сталь 45 (ГДО)	0,763	-80	0,375
50	40	0,5	49,0	сталь 20 (ОР1, ОР2)	0,710 – 0,720	-133 – (-82)	0,335 – 0,338

Для образцов диаметром  $D = 10 - 25$  мм были получены интервальные оценки коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$  и построены доверительные интервалы для его математического ожида-

ния при доверительной вероятности  $p = 0,9, p = 0,95$  и  $p = 0,99$ . Доверительные интервалы представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3. Доверительные интервалы коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$  для сплошных цилиндрических образцов

$D_1, \text{ мм}$	$R, \text{ мм}$	Доверительные интервалы		
		$p = 0,9$	$p = 0,95$	$p = 0,99$
10	0,3	(0,3470;0,3585)	(0,3458;0,3597)	(0,3434;0,3621)
	0,5	(0,3569;0,3991)	(0,3469;0,4091)	(0,3062;0,4498)
15	0,3	(0,3491;0,3754)	(0,3461;0,3784)	(0,3393;0,3852)
25	0,3	(0,3375;0,3735)	(0,3325;0,3785)	(0,3195;0,3915)
	0,5	(0,3263;0,3604)	(0,3182;0,3685)	(0,2854;0,4013)
	1,0	(0,3517;0,3843)	(0,3459;0,3901)	(0,3275;0,4085)

Таблица 4. Доверительные интервалы коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$  для полых цилиндрических образцов

$D_1, \text{ мм}$	$d, \text{ мм}$	$R, \text{ мм}$	Доверительные интервалы		
			$p = 0,9$	$p = 0,95$	$p = 0,99$
15	5	0,3	(0,3547;0,3773)	(0,3519;0,3801)	(0,3455;0,3865)
		0,5	(0,3199;0,3927)	(0,3028;0,4099)	(0,2328;0,4867)
15	10	0,3	(0,3430;0,3763)	(0,3385;0,3809)	(0,3264;0,3929)
25	15	0,3	(0,3259;0,3706)	(0,3180;0,3785)	(0,2928;0,4037)
		0,5	(0,3073;0,3841)	(0,2890;0,4023)	(0,2150;0,4764)
		1,0	(0,3491;0,3963)	(0,3379;0,4075)	(0,2928;0,4530)

Из приведённых в табл. 3 и 4 данных видно, что при различной доверительной вероятности для сплошных образцов доверительные интервалы коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$  меньше, чем для полых образцов. Поэтому рассчитываемые по формуле (2) значения приращения предела выносливости для упрочнённых полых цилиндрических деталей вычисляются с меньшей точностью, чем для сплошных деталей. Это обстоятельство необходимо учитывать при прогнозировании предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами напряжений.

### Библиографический список

1. Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изги-

бе в условиях концентрации напряжений [Текст] / В.Ф. Павлов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.

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

3. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулук. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2012. – 125 с.

4. Павлов, В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение I. Сплош-

ные детали / В.Ф. Павлов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1988. – №8. – С. 22-26.

5. Павлов, В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточ-

ных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение II. Полые детали / В.Ф. Павлов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1988. – №8. – С. 37-46.

## COEFFICIENT OF RESIDUAL STRESSES INFLUENCE ON CYLINDRICAL PARTS ENDURANCE LIMIT UNDER BENDING ESTIMATION

© 2012 O. Yu. Semyonova, V. A. Kirpichev, E. A. Deniskina

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

The issues compiling hardened part endurance limit increment prediction after making a semicircular profile cut are discussed in this paper. Estimation of coefficient of residual stresses influence on solid and hollow cylindrical parts endurance limit is given.

*Superficial plastic deforming, part with a concentrator, residual stresses, endurance limit, coefficient of residual stresses influence.*

### Информация об авторах

**Семёнова Ольга Юрьевна**, старший преподаватель кафедры высшей математики, 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.

**Кирпичёв Виктор Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, декан факультета летательных аппаратов, 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.

**Денискина Екатерина Александровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики, 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.

**Semyonova Olga Yurievna**, lecturer of Higher Mathematics 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.

**Kirpichyev Victor Alekseevich**, doctor of technical sciences, professor, dean of aircraft faculty, 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.

**Deniskina Ekaterina Alexandrovna**, candidate of technical sciences, associate professor of Higher Mathematics 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.