

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

© 2013 О.Ю. Семёнова, В.А. Кирпичёв, Е.А. Денискина, С.А. Михалкина

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

Поступила в редакцию 02.12.2013

В исследовании рассматривается вопрос о прогнозировании 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.

Ключевые слова: коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости, приращение предела выносливости, круговой надрез полукруглого профиля, критерий среднеинтегральных остаточных напряжений.

В настоящее время для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей с концентраторами по остаточным напряжениям используются два критерия [1, 2]. Первый критерий – остаточные напряжения на поверхности опасного сечения детали – как показали многочисленные исследования [2], приводит к большой погрешности при прогнозировании предела выносливости. Вторым критерий – среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ост}$ [1] – учитывает влияние на предел выносливости величины 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 образцов с надрезом в данном исследовании использовался критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ [1] в виде

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

где $\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в

Семёнова Ольга Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики.

E-mail: sopromat@ssau.ru

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

E-mail: sopromat@ssau.ru

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

Михалкина Светлана Алексеевна, старший преподаватель кафедры высшей математики.

E-mail: SvetaMikh@yandex.ru

наименьшем (опасном) сечении детали с концен-

тратором, $\xi = \frac{y}{t_{кр}}$ – расстояние от дна впади-

ны концентратора до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$, $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе поверхностно упрочнённой детали на пределе выносливости.

Приращение предела выносливости при изгибе в случае симметричного цикла $\Delta\sigma_{-1}$ упрочнённой детали с использованием критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ определялось по формуле:

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

где $\bar{\psi}_{\sigma}$ – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости по разрушению. Для сплошной цилиндрической детали критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости

$$t_{кр} = 0,0216D_1,$$

где D_1 – диаметр наименьшего поперечного сечения.

Для полой цилиндрической детали

$$t_{кр} = 0,0216 D_1 \cdot \left[1 - 0,04 \cdot \left(\frac{d}{D_1} \right)^2 - 0,54 \cdot \left(\frac{d}{D_1} \right)^3 \right],$$

где d – внутренний диаметр полой детали.

Были проанализированы приведённые в работах [2–6] результаты испытаний на усталость при изгибе в случае симметричного цикла сплошных диаметром D и полых диаметром D/d цилиндрических образцов, 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 выглажива-

нием (АВ), обработкой микрошариками (ОМ).

В табл. 1 приведены результаты испытаний на усталость при изгибе сплошных цилиндрических образцов, в табл. 2 – результаты испытаний на усталость при изгибе полых цилиндрических

образцов. Во всех случаях после упрочняющей обработки на образцы наносился круговой надрез полукруглого профиля радиуса R (рис. 1). В таблицах содержатся результаты измерения критической глубины нераспространяющейся тре-

Таблица 1. Результаты испытаний на усталость при изгибе сплошных цилиндрических образцов

D , мм	R , мм	D_l , мм	Материал, упрочняющая обработка	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$
7,5	0,3	6,9	сплав ЭИ961 (АВ)	0,160	-422	0,356
10	0,3	9,4	стали 20 (ПДО, ОР1, ОР2), 45 (ГДО, ОР1, ОМ), 12Х18Н10Т (ГДО, ОР), 30ХГСА (ГДО, ОР), сплавы ЭИ437Б (ГДО), В93 (ГДО), Д16Т (ГДО), ЭИ961 (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 (ОР)	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	стали 45 (ГДО), 20 (ОР1, ОР2)	1,064	-123(-67)	0,372
50	0,5	49	сталь 20 (ОР1, ОР2)	1,010-1,086	-112(-82)	0,357-0,366
50	1,0	48	сталь 20 (ОР1, ОР2)	1,035-1,073	-62(-46)	0,363-0,380
15	0,3	14,4	сплавы В95 (ПДО), Д16Т (ГДО), стали 45 (ОР1, ГДО), 30ХГСА (ГДО, ОР), 12Х18Н10Т (ГДО, ОР)	0,300-0,314	-507(-129)	0,318-0,387
15	0,5	14,0	сталь 30ХГСА (ОР1 и ОР2)	0,300	-422	0,350

Таблица 2. Результаты испытаний на усталость при изгибе полых цилиндрических образцов

D , мм	d , мм	R , мм	D_l , мм	Материал, упрочняющая обработка	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$
15	5	0,3	14,4	стали 45 (ГДО, ОР), 30ХГСА (ГДО, ОР), 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 (ОР), сплавы В95 (ПДО), Д16Т (ПДО)	0,302-0,320	-404(-72,2)	0,341-0,381
15	8	0,3	14,4	сталь 45 (ОР)	0,276	-357	0,336
15	10	0,3	14,4	стали 45 (ГДО, ОР), 30ХГСА (ГДО, ОР), 12Х18Н10Т (ГДО), сплав Д16Т (ГДО)	0,2430,257	-592(-16)	0,330-0,388
15	10	0,5	14,0	сталь 30ХГСА (ОР)	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 (ОР)	0,510	-293	0,410
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 (ОР)	0,340	-19	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

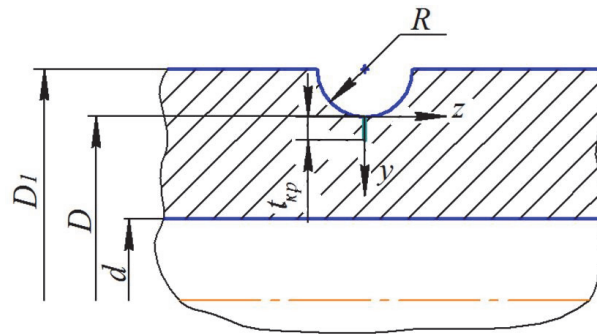


Рис. 1. Цилиндрический образец с надрезом полукруглого профиля и нераспространяющаяся трещина усталости

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

D, мм	R, 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)	(0,34614; 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)
50	0,3	(0,3047; 0,3860)	(0,2854; 0,4053)	(0,2071; 0,4836)
	0,5	(0,3331; 0,3899)	(0,3044; 0,4186)	(0,0752; 0,6478)

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

D, мм	d, мм	R, 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)

щины усталости $t_{кр}$, вычисления критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ и коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$.

Влияние остаточных напряжений, вызванных упрочняющей обработкой, на приращение предела выносливости образцов с надрезом изучалось по значениям коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$. Проанализированы результаты испытаний 102 партий образцов, средняя величина коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ для которых составила 0,358.

Для образцов различных диаметров были получены интервальные оценки коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ и построены доверительные интервалы для его математического ожидания [7] при доверительных вероятностях $p = 0,9$, $p = 0,95$ и $p = 0,99$. Доверительные интервалы представлены в табл. 3 и 4.

Из приведённых в табл. 3 и 4 данных видно, что при различной доверительной вероятности для сплошных образцов доверительные интер-

валы коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ меньше, чем для полых образцов такого же диаметра. Это обстоятельство необходимо учитывать при прогнозировании предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами напряжений.

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.
2. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений / В.Ф. Павлов, В.А. Курничёв, В.Б. Иванов. Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. 64 с.
4. Расчёт остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям / В.Ф. Павлов, А.К. Столяров, В.С. Вакулюк,

- В.А. Кирпичёв. Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. 124 с.
5. 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.
6. Бордаков С.А., Сургутанова Ю.Н. Формирование остаточных напряжений в поверхностном слое неупрочнённых деталей под действием циклических нагрузок. Самара: Издательство СНЦ РАН, 2010. 127 с.
7. Денискина Е.А., Коломиец П.Э. Статистический анализ данных. Самара: СГАУ, 2005. 64 с.

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

© 2013 O.Yu. Semyonova, V.A. Kirpichev, E.A. Deniskina, S.A. Mikhalkina

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

The article deals with hardened part endurance limit increment prediction after making a semicircular profile cut. Estimations of coefficient of residual stresses influence on cylindrical parts endurance limit are given.

Key words: coefficient of residual stresses influence on endurance limit, endurance limit increment, semicircular profile cut, average integral residual stresses criterion.

Olga Semyonova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Higher Mathematics Department.

E-mail: sopromat@ssau.ru

Victor Kirpichev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of Aircraft Faculty. E-mail: sopromat@ssau.ru

Ekaterina Deniskina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Higher Mathematics Department.

Svetlana Mikhalkina, Senior Lecturer at the Higher Mathematics Department. E-mail: SvetaMikh@yandex.ru