

ОЦЕНКА КРИТИЧЕСКОЙ ГЛУБИНЫ НЕРАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ ТРЕЩИНЫ УСТАЛОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННОЙ ДЕТАЛИ

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

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

Поступила в редакцию 02.12.2013

В настоящем исследовании рассматривается вопрос о зависимости критической глубины нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$, возникающей при работе детали на пределе выносливости, от размеров поперечного сечения цилиндрической детали. Приводятся оценки погрешности формул при вычислении значений $t_{кр}$ для сплошных и полых цилиндрических деталей.
 Ключевые слова: критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, опережающее поверхностное пластическое деформирование, предел выносливости, концентратор напряжений, цилиндрическая деталь.

Для прогнозирования приращения предела выносливости $\Delta p_{-1}(\Delta \sigma_{-1}, \Delta \tau_{-1})$ поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами напряжений в работе [1] было предложено использовать критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$

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

где $\bar{\psi}_p$ ($\bar{\psi}_\sigma, \bar{\psi}_\tau$) – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости детали по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$;

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

где $\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в наименьшем (опасном) сечении детали по глубине y поверхностного слоя; $\xi = y/t_{кр}$ – расстояние от поверхности концентратора в текущем слое, выраженное в долях $t_{кр}$; $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе поверхностно упрочнённой детали на пределе выносливости (рис. 1).

Чтобы воспользоваться формулами (1) при прогнозировании предела выносливости упрочнённой детали, необходимо знать значение критической глубины $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости.

В работах [2 – 5] было экспериментально установлено, что значение $t_{кр}$ определяется только

размером наименьшего поперечного сечения детали, независимо от вида поверхностного упрочнения, материала, последовательности изготовления и упрочнения концентратора, степени накаливания типа и размера концентратора, величины сжимающих остаточных напряжений, типа деформации и асимметрии цикла напряжений. На основании большого числа экспериментов [3 – 5] для сплошных цилиндрических деталей для $t_{кр}$ была получена зависимость в следующем виде:

$$t_{кр} = 0,0216 D, \quad (3)$$

где D – диаметр наименьшего (опасного) поперечного сечения (рис. 1).

Для полых цилиндрических деталей зависимость имеет вид [3 – 5]

$$t_{кр} = 0,0216 D \cdot \left[1 - 0,04 \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^2 - 0,54 \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^3 \right], \quad (4)$$

где d – внутренний диаметр полых деталей. Критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$ является удобной характеристикой для толщины поверхностного слоя со сжимающими остаточными напряжениями, ответственными за повышение сопротивления

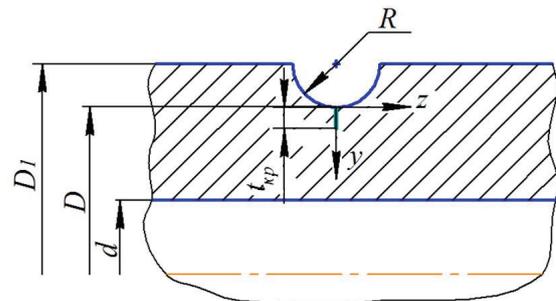


Рис. 1. Цилиндрическая деталь с концентратором и нераспространяющаяся трещина усталости

Кирпичёв Виктор Алексеевич, доктор технических наук, профессор, декан факультета летательных аппаратов. E-mail: sopromat@ssau.ru
 Семёнова Ольга Юрьевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики. E-mail: sopromat@ssau.ru
 Михалкина Светлана Алексеевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики. E-mail: Svetlana.Mikh@yandex.ru

многоциклового усталости поверхностно упрочнённых деталей, так как при прогнозировании предела выносливости таких деталей формулы (3) и (4) дают возможность определять значение $t_{кр}$ без проведения испытаний на усталость.

В связи с тем, что за последние годы было проведено большое количество испытаний на усталость упрочнённых образцов и деталей из разных материалов, имеющих различные размеры и различные типы концентраторов, возникает вопрос о точности аппроксимирующих зависимостей (3) и (4). Поэтому в настоящем исследовании была поставлена задача анализа погрешности этих формул по данным экспериментов, опубликованных в работах [2 – 6]. Проанализированы результаты испытаний на усталость при изгибе, растяжении-сжатии, кручении образцов и деталей с различными концентраторами напряжений, упрочнённых как до нанесения на деталь концентратора, так и после.

Вначале были рассмотрены случаи опережающего поверхностного пластического деформирования (ОППД) цилиндрических образцов и деталей, когда на упрочнённую гладкую поверхность наносился круговой надрез полукруглого профиля.

В табл. 1 приведены значения $t_{кр}$ по результатам испытаний на многоцикловою усталость [2 – 6] при изгибе, растяжении-сжатии и кручении сплошных цилиндрических образцов после ОППД из различных сталей и сплавов, упрочнённых различными методами на разных режимах: пневмодробная обработка (ПДО), гидродробеструйная обработка (ГДО), обкатка роликом (ОР), обработка микрошариками (ОМ), алмазное выглаживание (АВ). Во всех случаях после упрочняющей обработки на цилиндрические образцы диаметром D_1 наносился круговой надрез полукруглого профиля радиуса R (рис. 1). В табл. 1 приведены опытные значения $t_{кр}^{он}$ критической глубины нераспространяющейся трещины усталости и расчётные значения $t_{кр}^{расч}$, полученные по формулам (3) и (4).

В табл. 2 приведены также опытные $t_{кр}^{он}$ и расчётные $t_{кр}^{расч}$ значения критической глубины нераспространяющейся трещины по результатам испытаний на усталость при изгибе полых цилиндрических образцов различного диаметра с надрезами радиуса R после ОППД [3 – 5].

Таблица 1. Значения $t_{кр}$ по результатам испытаний на усталость при изгибе, растяжении-сжатии и кручении сплошных цилиндрических образцов после ОППД

Деформация	D_1 , мм	R , мм	D , мм	Материал, упрочняющая обработка	$t_{кр}^{он}$, мм	$t_{кр}^{расч}$, мм
изгиб	7,5	0,3	6,9	сталь ЭИ961 (АВ)	0,160	0,149
	10	0,3	9,4	стали: 20 (ПДО, ОР), 45 (ГДО, ОР, ОМ), 30ХГСА (ГДО, ОР), 12Х18Н10Т (ПДО, ОР), ЭИ961 (ГДО); сплавы: В93 (ГДО), Д16Т (ГДО)	0,195–0,209	0,203
	10	0,5	9,0	сталь 20 (ПДО, ОР)	0,192–0,202	0,194
	15	0,3	14,4	стали: 45 (ПДО, ОР), 30ХГСА (ГДО, ОР), 12Х18Н10Т (ГДО, ОР); сплавы: В95 (ПДО), Д16Т (ГДО, ОР)	0,300–0,314	0,311
	15	0,5	14,0	сталь 30ХГСА (ОР)	0,300	0,302
	25	0,3	24,4	стали: 20 (ПДО, ОР), 40Х (ГДО); сплав Д16Т (ГДО)	0,508–0,540	0,527
	25	0,5	24,0	сталь 20 (ПДО, ОР)	0,520–0,530	0,515
	25	1,0	23,0	стали: 20 (ПДО, ОР), 40Х (ОР)	0,490–0,510	0,497
	40	0,3	39,0	сплав Д16Т (ГДО)	0,860	0,851
	50	0,3	49,0	сталь 45 (ГДО)	1,010–1,086	1,067
	50	0,5	49,0	сталь 20 (ПДО, ОР)	1,024–1,077	1,058
50	1,0	48,0	сталь 20 (ПДО, ОР)	1,035–1,073	1,037	
растяжение-сжатие	10	0,3	9,4	стали: 20 (ПДО, ОР), 45 (ГДО, ОР, ОМ), 30ХГСА (ГДО), ЭИ961 (ГДО); сплав Д16Т (ГДО)	0,198–0,207	0,203
кручение	12	0,35	11,5	сталь 30ХГСА (ГДО)	0,235–0,240	0,244
	12	0,5	11,0	сталь 30ХГСА (ГДО)	0,220–0,235	0,238
	12	0,3	11,4	стали: 40 (ГДО), 30ХГСА (ГДО); сплав В95 (ГДО)	0,240	0,246

Таблица 2. Значения $t_{кр}$ по результатам испытаний на усталость при изгибе полых цилиндрических образцов после ОППД

D_1 , мм	R , мм	D , мм	d , мм	Материал, упрочняющая обработка	$t_{кр}^{on}$, мм	$t_{кр}^{расч}$, мм
15	0,3	14,4	5	стали: 45 (ГДО, ОР), 12Х18Н10Т (ГДО); сплавы: В95 (ПДО), Д16Т (ГДО, ПДО)	0,294–0,302	0,302
15	0,5	14,0	5	сталь 30ХГСА (ОР); сплавы: В95 (ПДО), Д16Т (ПДО)	0,302–0,320	0,293
15	0,3	14,4	8	сталь 45 (ОР)	0,276	0,278
15	0,3	14,4	10	стали: 45 (ГДО, ОР), 12Х18Н10Т (ГДО); сплав Д16Т (ГДО)	0,243–0,257	0,249
15	0,3	14,4	12,4	сталь 45 (ГДО)	0,195	0,195
15	0,5	14,0	10	сталь 30ХГСА (ОР)	0,220	0,236
25	0,3	24,4	10	сталь 40Х (ГДО)	0,470	0,504
25	1,0	23,0	10	сталь 40Х (ОР)	0,494	0,471
25	0,3	24,4	15	стали: 20 (ПДО, ОР), 45 (ГДО)	0,442–0,477	0,453
25	0,5	24,0	15	сталь 20 (ПДО, ОР)	0,438–0,446	0,442
25	1,0	23,0	15	сталь 20 (ПДО, ОР)	0,410–0,420	0,414
25	0,3	24,4	19	сталь 40Х (ГДО)	0,360	0,380
25	1,0	23,0	19	сталь 40Х (ОР)	0,340	0,332
50	0,3	49,4	40	сталь 45 (ГДО)	0,763	0,733
50	0,5	49,0	40	сталь 20 (ОР)	0,710–0,720	0,719
70,1	1,2	67,7	50	сплав 1953Т1	1,14–1,18	1,112

Также были проанализированы результаты испытаний на усталость при изгибе сплошных образцов из различных материалов с концентраторами в виде V-образных надрезов и галтелей (рис. 2) [4, 5]. Упрочнение образцов с концентраторами в этом случае производилось после нанесения (изготовления) концентратора. В качестве методов упрочнения использовались обработка микрошариками (ОМ) и азотирование (в аммиаке на двух режимах (А1 и А2), различающихся временем азотирования (6 час. и 12 час. соответственно)). В табл. 3 приведены опытные и расчётные $t_{кр}^{расч}$ значения критической длины нераспространяющейся трещины усталости.

Анализируются также результаты испытаний на усталость при изгибе образцов из стали 45 прямоугольного поперечного сечения с надрезами полукруглого профиля радиуса $R = 0,3$ мм [5], нанесёнными на упрочнённую гидроабразивной обработкой поверхность. Толщина образцов в плоскости изгиба опасного сечения со-

ставляла 9,1 мм и 21,4 мм, а опытные значения $t_{кр}^{on}$ составляли 0,210 мм и 0,480 мм, соответственно. Расчётные значения $t_{кр}^{расч}$, вычисленные по формуле (3), составляли, соответственно, 0,203 мм и 0,462 мм. В табл. 4 приведены расхождения ε между опытными $t_{кр}^{on}$ и определёнными по формуле (3) расчётными $t_{кр}^{расч}$ значениями критической длины нераспространяющейся трещины усталости в случае изгиба для сплошных и полых цилиндрических образцов с надрезами радиуса R после ОППД. Аналогичные данные получены и для других, анализируемых в исследовании, видов деформаций, образцов, концентраторов, методов поверхностного упрочнения. Следует отметить, что расхождение между $t_{кр}^{on}$ и $t_{кр}^{расч}$ увеличивается с уменьшением диаметра D опасного сечения и достигает для полых цилиндрических образцов 9,1 % (В95 (ПДО), $D_1 = 15$ мм, $D = 14$ мм, $R = 0,5$ мм).

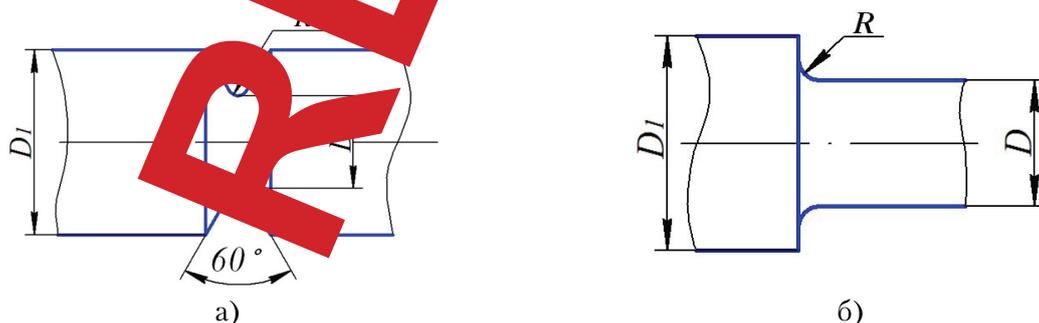


Рис. 2. Рабочая часть образцов с V-образными надрезами (а) и галтелями (б)

Таблица 3. Значения $t_{кр}$ по результатам испытаний на усталость при изгибе образцов с V-образными надрезами и галтелями

Концентратор	D_1 , мм	R , мм	D , мм	Материал, упрочняющая обработка	$t_{кр}^{on}$, мм	$t_{кр}^{расч}$, мм
V-образный надрез	10	0,5	5,0	сталь 38Х2МЮА (А1)	0,110	0,108
	10	2,5	5,0	сталь 38Х2МЮА (А2)	0,103	0,108
	15	0,5	7,5	стали: 45 (ОМ), 30ХГСА (ОМ), ВНС40 (А2)	0,166	0,162
галтель	17	0,125	10,0	сталь 45 (ОМ)	0,225	0,216
	17	0,10	10,0	сталь 30ХГСА (ОМ)	0,217	0,216
	17	0,15	10,0	сталь 12Х18Н10Т (ОМ)	0,22	0,216
	17	0,08	10,0	сплав Д16Т (ОМ)	0,2	0,216

Таблица 4. Средние значения коэффициентов C_1 , C_2 в зависимости от диаметра сплошных и полых цилиндрических образцов с надрезом после ОППД

Тип образцов	D_1 , мм	R , мм	D , мм	a , мм	α , %	C_1	C_2 , мм
сплошные	7,5	0,3	6,9	—	7,4	$11,6 \cdot 10^{-4}$	—
	10	0,3	9,4	—	3,9	$8,5 \cdot 10^{-4}$	—
		0,5	9,0	—	4,1	$9 \cdot 10^{-4}$	—
	12	0,3	11,4	—	2,4	$7,6 \cdot 10^{-4}$	—
		0,35	11,3	—	3,7	$7,9 \cdot 10^{-4}$	—
		0,5	11,0	—	7,4	$1,6 \cdot 10^{-3}$	—
	15	0,3	11,4	—	1,9	$4,2 \cdot 10^{-4}$	—
		0,5	11,0	—	0,7	$2,3 \cdot 10^{-4}$	—
	25	0,3	24,0	—	3,6	$7,8 \cdot 10^{-4}$	—
		0,5	24,0	—	2,2	$4,8 \cdot 10^{-4}$	—
		1,0	23,0	—	2,6	$5,6 \cdot 10^{-4}$	—
	40	0,3	39,4	—	1,1	$2,3 \cdot 10^{-4}$	—
	50	0,3	49,4	—	5,34	$11,5 \cdot 10^{-4}$	—
50	0,5	49	—	3,25	$7,0 \cdot 10^{-4}$	—	
50	1,0	49	—	3,49	$7,5 \cdot 10^{-4}$	—	
полые	15	—	14,4	5,0-12,4	3,7	—	$2 \cdot 10^{-2}$
		0,3	14,0	5,0	9,1	—	$7,4 \cdot 10^{-2}$
	25	0,3	24,4	10-19	4,6	—	$3,5 \cdot 10^{-2}$
		0,5	24,0	15	0,9	—	$6,4 \cdot 10^{-3}$
		1,0	23,0	10-19	4	—	$3,6 \cdot 10^{-2}$
	50	0,3	49,4	40	4,1	—	$3,7 \cdot 10^{-2}$
0,5		49	40	1,3	—	$1,2 \cdot 10^{-2}$	
70,1	—	67,7	50	6,1	—	$9,2 \cdot 10^{-2}$	

На основании проведенного анализа результатов испытаний на усталость (табл. 3) представляется возможным записать формулы (3) и (4) в следующем виде:

– для сплошных образцов (деталей)

$$t_{кр} = 0,0216D \pm C_1 \cdot D, \quad (5)$$

– для полых образцов (деталей)

$$t_{кр} = 0,0216D \cdot \left[1 - 0,04 \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^2 - 0,54 \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^3 \right] \pm C_2 \cdot \left(\frac{d}{D} \right), \quad (6)$$

где C_1 и C_2 – коэффициенты, учитывающие расхождение между $t_{кр}^{on}$ и $t_{кр}^{расч}$, значения которых представлены в табл. 4.

Из приведённых в табл. 4 данных видно, что с увеличением диаметра образца коэффициенты C_1 и C_2 уменьшаются, то есть с увеличением размера опасного сечения образцов (деталей) точность определения критической глубины $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости по формулам

(3) и (4), (5) и (6) увеличивается.

Для образцов с V-образными надрезами и галтелями (табл. 3) коэффициент C_1 в среднем составил значения $9,0 \cdot 10^{-4}$ и $7,8 \cdot 10^{-4}$, соответственно. Для образцов прямоугольного поперечного сечения с надрезом полукруглого профиля $R = 0,3$ мм коэффициент C_1 оказался равным в среднем $7,9 \cdot 10^{-4}$. Следовательно, и для случаев непосредственного упрочнения концентратора (V-образные надрезы, галтели) и образцов (деталей) прямоугольного поперечного сечения коэффициент C_1 , в среднем, изменяется в тех же пределах, что и для поверхностно упрочнённых цилиндрических образцов (деталей) с такими же размерами опасного поперечного сечения.

Таким образом, результаты проведённого исследования позволят с большей точностью прогнозировать приращение предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами напряжений по формуле (2) с использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, определяемых зависимостью (1). При этом значение критической глубины нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$ следует вычислять по формулам (5) и (6).

ВЫВОДЫ

1. Проведённый в исследовании анализ показал, что расхождение опытных и рассчитанных по формулам (3) и (4) значений критической глубины $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости достигает в рассмотренных случаях 10%.
2. С уменьшением размера надреза (галтели) (опасного)

поперечного сечения детали (образца) расхождение между опытными и рассчитанными по формулам значениями $t_{кр}$ увеличивается.

3. Для полых деталей (образцов) расхождение между опытными и рассчитанными значениями $t_{кр}$ выше, чем для сплошных образцов (образцов).

4. Для определения критической глубины нераспространяющейся трещины усталости предложены расчётные зависимости, учитывающие рассеяние опытных данных.

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. Павлов В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение I. Сплошные детали // Известия вузов. Машиностроение. 1988. №8. С. 22-26.
3. Павлов В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение II. Полые детали // Известия вузов. Машиностроение. 1988. №12. С. 37-40.
4. Павлов В.Ф. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.Б. Иванов. Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. 64 с.
5. Павлов В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулук. Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. 125 с.
6. Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости при кручении в условиях концентрации напряжений / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов, А.А. Прохоров // Проблемы прочности. 1988. №5. С. 31-33.

SUPERFICIALLY HARDENED PART CRITICAL DEPTH OF NON-PROPAGATING FATIGUE CRACK EVALUATION

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

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

The article deals with the non-propagating fatigue crack critical depth dependence on cylindrical parts transverse sizes. Evaluation of crack depth calculation formulas is given.

Key words: non-propagating fatigue crack critical depth, outstripping superficial plastic deforming, endurance limit, stress concentration, cylindrical part.

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

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

E-mail: sopromat@ssau.ru

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