

Семёнова О.Ю., Михалкина С.А., Филатов А.П., Кривецкий С.А.

## ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ГЛУБИНЫ НЕРАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ ТРЕЩИНЫ УСТАЛОСТИ В УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЯХ

В работе [1] для прогнозирования приращения предела выносливости  $\Delta p_{-1}(\Delta\sigma_{-1}, \Delta\tau_{-1})$  поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами напряжений, был предложен 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  $\bar{\sigma}_{ост}$ ;

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

$\sigma_z(\xi)$  – осевые остаточные напряжения в наименьшем (опасном) сечении детали по толщине  $y$  поверхностного слоя;  $\xi = y/t_{кр}$  – расстояние от поверхности 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 (рис. 1).

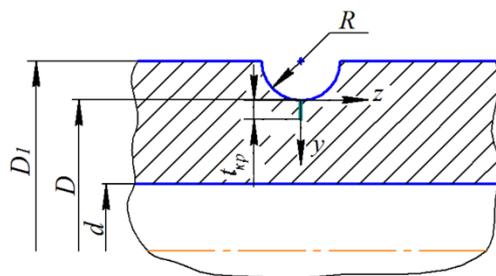


Рис. 1. Цилиндрическая деталь  
с концентратором и нераспространяющаяся трещина усталости

Чтобы воспользоваться формулами (1), (2) при прогнозировании предела выносливости упрочнённой детали, необходимо знать значение критической глубины нераспространяющейся трещины усталости  $t_{кр}$ . В работах [1,2] было экспериментально установлено, что значение величины  $t_{кр}$  определяется только размерами наименьшего поперечного сечения детали и не зависит от вида поверхностного упрочнения, материала, последовательности изготовления и упрочнения концентратора, степени наклёпа, типа и

размера концентратора, величины сжимающих остаточных напряжений, типа деформации и асимметрии цикла напряжений.

На основании большого числа экспериментов [2] для сплошных цилиндрических деталей для величины  $t_{кр}$  была получена зависимость в виде:

$$t_{кр} = 0,0216 D, \quad (3)$$

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

Для полых цилиндрических деталей зависимость имеет вид [2]:

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

где  $d$  – внутренний диаметр полых детали.

Критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости  $t_{кр}$  является удобной характеристикой для толщины поверхностного слоя со сжимающими остаточными напряжениями, которые являются ответственными за повышение сопротивления многоциклового усталости поверхностно упрочнённых деталей, так как при прогнозировании предела выносливости таких деталей формулы (3), (4) дают возможность определять значение  $t_{кр}$  без проведения испытаний на усталость.

Так как за последние годы было проведено большое количество испытаний на усталость упрочнённых образцов и деталей из разных материалов, имеющих различные размеры и различные типы концентраторов напряжений, то возникает вопрос о том, насколько точны аппроксимирующие зависимости (3), (4). Поэтому в настоящем исследовании была поставлена задача анализа погрешности этих формул по данным экспериментов из работы [2]. Были проанализированы результаты испытаний на усталость при изгибе, растяжении-сжатии, кручении образцов и деталей с различными концентраторами напряжений, упрочнённых до нанесения на деталь концентратора и после нанесения.

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

В таблице 1 приведены значения  $t_{кр}$ , полученных в результате испытаний на многоцикловую усталость после ОППД при изгибе, растяжении-сжатии и кручении сплошных цилиндрических образцов из различных сталей и сплавов, упрочнённых различными методами на разных режимах: пневмодробеструйная обработка (ПДО), гидродробеструйная обработка (ГДО), обкатка роликом (ОР), обработка

микрошариками (ОМ), алмазное выглаживание (АВ) [2]. Во всех случаях после упрочнения на цилиндрические образцы диаметром  $D_1$  наносился круговой надрез полукруглого профиля радиуса  $R$  (рис. 1). В табл. 1 представлены опытные значения  $t_{кр}^{он}$  критической глубины нераспространяющейся трещины усталости и расчётные значения  $t_{кр}^{расч}$ , вычисленные по формулам (3), (4).

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 (ГДО, ОР), ЭИ961 (ГДО); сплавы: ЭИ437Б (ГДО), 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 (ГДО), 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	39,4	сплав Д16Т (ГДО)	0,860	0,851
	50	0,3	49,4	сталь 45 (ГДО)	1,010–1,086	1,067
	50	0,5	49	сталь 20 (ОР)	1,024–1,077	1,058
50	1,0	48	сталь 20 (ОР)	1,035–1,073	1,037	
Растяжение-сжатие	10	0,3	9,4	стали: 45 (ГДО), 30ХГСА (ГДО), ЭИ961 (ГДО); сплав Д16Т (ГДО)	0,198–0,207	0,203
Кручение	12	0,35	11,3	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

В таблице 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 [2].

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) [2]. В этих случаях упрочнение образцов с концентраторами производилось после нанесения (изготовления) концентратора. В качестве методов

упрочнения использовались обработка микрошариками (ОМ) и азотирование в среде аммиака на двух режимах (А1 и А2), различающихся временем азотирования (6 час. и 8 час., соответственно). В таблице 3 приведены опытные  $t_{кр}^{он}$  и расчётные  $t_{кр}^{расч}$  значения критической глубины нераспространяющейся трещины усталости для этих случаев.

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

$D_1$ , мм	$R$ , мм	$D$ , мм	$d$ , мм	Материал, упрочняющая обработка	$t_{кр}^{он}$ , мм	$t_{кр}^{расч}$ , мм
15	0,3	14,4	5	стали: 45 (ГДО, ОР), 12Х18Н10Т (ГДО); сплавы: В95 (ПДО), Д16Т (ГДО, ПДО)	0,294–0,310	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)	0,184	0,195
15	0,5	14,0	10	сталь 30ХГСА (ОР)	0,262	0,236
25	0,3	24,4	10	сталь 40Х (ГДО)	0,520	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

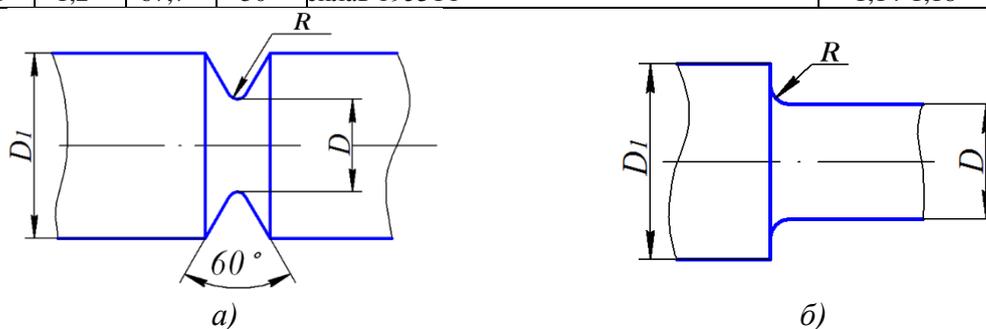


Рис. 2. Рабочая часть образцов с V-образными надрезами (а) и галтелями (б)

В таблице 4 приведены расхождения  $\varepsilon$  между опытными  $t_{кр}^{он}$  и определёнными по формуле (3) расчётными  $t_{кр}^{расч}$  значениями критической глубины нераспространяющейся трещины усталости в случае изгиба для сплошных и полых цилиндрических образцов с надрезами радиуса  $R$  после ОПД. Аналогичные данные получены и для других, анализируемых в исследовании, видов деформаций, образцов, концентраторов, методов поверхностного упрочнения. Следует отметить, что различие между  $t_{кр}^{он}$  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).

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	$t_{кр}^{он}$ , 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)	0,160–0,166	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)	0,220	0,216
	17	0,08	10,0	сплав Д16Т (ОМ)	0,220	0,216

На основании проведённого анализа результатов испытаний на усталость (табл. 1-3) представляется возможным записать формулы (3), (4) соответственно 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  $t_{кр}^{он}$  и  $t_{кр}^{расч}$ , значения которых представлены в таблице 4.

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

Тип образцов	$D_1$ , мм	$R$ , мм	$D$ , мм	$d$ , мм	$\varepsilon$ , %	$C_1$	$C_2$ , мм
Сплошные	7,5	0,3;	6,9	–	7,4	$11,6 \cdot 10^{-4}$	–
	10	0,3; 0,5	9,4; 9,0	–	4,1	$8,7 \cdot 10^{-4}$	–
	12	0,3; 0,35; 0,5	11,4; 11,3; 11,0	–	1,3	$7,6 \cdot 10^{-4}$	–
	15	0,3; 0,5	14,4; 14,0	–	3,1	$4,3 \cdot 10^{-4}$	–
	25	0,3; 0,5; 1,0	24,4; 24,0; 23,0	–	2,8	$3,6 \cdot 10^{-4}$	–
	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	$7,0 \cdot 10^{-4}$	–
Полые	15	0,3; 0,5	14,4; 14,0	5,0-12,4	4,8	–	$30,5 \cdot 10^{-3}$
	25	0,3; 0,5; 1,0	24,4; 24,0; 23,0	10-19	3,1	–	$26,1 \cdot 10^{-3}$
	50	0,3; 0,5	0,3; 0,5	40	2,8	–	$24,3 \cdot 10^{-3}$
	70,1	1,2	67,7	50	6,1	–	$9,2 \cdot 10^{-2}$

Из данных, приведённых в таблице 4, 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)-(6) увеличивается.

Для образцов с V-образными надрезами и галтелями (таблица 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  $C_1$  в среднем оказался равным  $,9 \cdot 10^{-4}$ . Следовательно для случаев непосредственного упрочнения концентратора (V-образные надрезы, галтели) и образцов (деталей) прямоугольного поперечного сечения коэффициент  $C_1$  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 бóльшей 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), (6).

#### **Библиографический список**

1. 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.
2. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулук. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
3. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости при кручении в условиях концентрации напряжений [Текст] / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов, А.А. Прохоров // Проблемы прочности. – 1988. – №5. – С. 31-33.