

Сазанов В.П., Павлов В.Ф., Шадрин В.К., Сукманов К.О.

**РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ
ВЛИЯНИЯ УПРОЧНЕНИЯ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СПЛАВА Д16Т**

Гладкие детали из алюминиевого сплава Д16Т диаметром $D=10$ мм, $D=15$ мм, $D=25$ мм и $D=40$ мм [1] и образцы-свидетели подвергались гидродробеструйной обработке (ГДО) в течение 8 минут дробью диаметром 2 мм при давлении масла 0,28 МПа. В качестве образцов-свидетелей использовались втулки с наружным диаметром 51,5 мм и внутренним 45 мм. На рисунке 1 приведена эпюра осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a в образце-свидетеле после ГДО, обработанном одновременно с гладкими деталями различного диаметра.

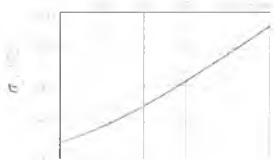


Рисунок 1 – Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в образце-свидетеле (втулка диаметром 51,5х45 мм) после ГДО

Моделирование остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя осуществлялось методом термоупругости [2, 3].

При определении первоначальных деформаций в качестве исходных данных использовалось экспериментальное распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя образца-свидетеля (втулки), приведённое на рисунке 1. Следующий этап расчётов выполнялся на конечно-элементных моделях исследуемых гладких деталей диаметром $D=10$ мм, $D=15$ мм, $D=25$ мм и $D=40$ мм по первоначальным деформациям образца-свидетеля. При оценке приращения предела выносливости определяющими являются осевые остаточные напряжения [1, 4, 5], поэтому сравнение расчётных и экспериментальных распределений остаточных напряжений для исследуемых деталей было выполнено по осевой компоненте. По результатам расчётов было установлено, что расчётные значения остаточных напряжений незначительно (до 7%) отличаются от экспериментальных.

Полученные расчётом распределения остаточных напряжений после гидродробеструйной обработки в гладких деталях использовались для расчёта

распределения остаточных напряжений в деталях с круговым надрезом полукруглого профиля радиуса $R=0,3$ мм, нанесённым на гладкую деталь после упрочнения ГДО, то есть после опережающего поверхностного пластического деформирования (ОППД). Остаточные напряжения в деталях с надрезом рассчитывались двумя методами: аналитическим [6] и численным с использованием программного комплекса PATRAN/NASTRAN [2]. Следует отметить, что остаточные напряжения, определённые двумя методами, имели хорошее совпадение.

На рисунке 2 приведены экспериментальные [1] и расчётные эпюры осевых σ_z остаточных напряжений по толщине a поверхностного слоя опасного сечения деталей с надрезами после ОППД.

Можно видеть, что распределения остаточных напряжений, полученные по экспериментальным и расчётным эпюрам гладких деталей, отличаются по наибольшим значениям не более 8% (рисунок 2).

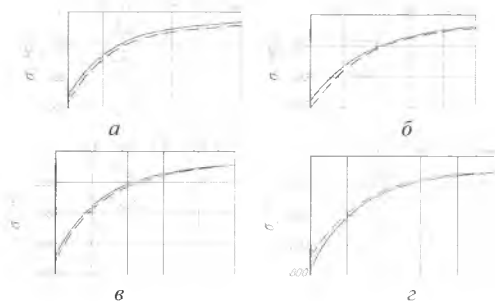


Рисунок 2 – Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в деталях с надрезом $R=0,3$ мм, вычисленных по экспериментальным (1) и по расчётным (2) данным:
 $a - D = 10$ мм, $b - D = 15$ мм, $v - D = 25$ мм, $z - D = 40$ мм

Прогнозирование влияния поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости деталей с надрезами при изгибе в случае симметричного цикла $(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$ производилось по критерию среднееинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ [1, 4]

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

где $\bar{\psi}_{\sigma}$ – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости 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 опасном сечении детали с концентратором по толщине поверхностного слоя a ; $\xi = a/t_{кр}$ – расстояние от поверхности опасного сечения детали до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$; $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей в упрочнённой детали с концентратором напряжений при работе на пределе выносливости.

Критическая глубина $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости, приведённая в таблице 1, определялась по зависимости, установленной на основании многочисленных экспериментов в работах [1]

$$t_{кр} = 0,0216D_1, \quad (3)$$

где D_1 – диаметр опасного сечения детали с концентратором напряжений.

Значения критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ вычислялись по формуле (2) по толщине поверхностного слоя опасного сечения деталей, равной $t_{кр}$, с использованием расчётных распределений остаточных напряжений, приведённых на рисунке 2, и содержатся в таблице 1.

Таблица 1

D, мм	D ₁ , мм	t _{кр} , мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	α_σ	$\bar{\psi}_\sigma$	($\Delta\sigma_{-1}$) _{расч} , МПа	($\Delta\sigma_{-1}$) _{оп} , МПа	Расхождение, %
10	9,4	0,203	-208	2,7	0,393	81,6	70	17
15	14,4	0,311	-166	2,8	0,385	63,8	57,5	11
25	24,4	0,527	-123	2,9	0,377	46,4	45	3
40	39,4	0,851	-78	3,1	0,361	28,2	30	6

Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ рассчитывался по зависимости, установленной в работе [7]

$$\bar{\psi}_\sigma = 0,612 - 0,081\alpha_\sigma, \quad (4)$$

где α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений, который определялся по графикам справочника [8] и представлен в таблице 1.

Далее по формуле (1) вычислялись расчётные значения приращений предела выносливости ($\Delta\sigma_{-1}$)_{расч} упрочнённых ГДО деталей с надрезами (таблица 1) и сравнивались с опытными значениями ($\Delta\sigma_{-1}$)_{оп}, приведёнными в работе [1].

Из данных таблицы 1 видно, что расхождение между расчётными и опытными значениями приращения предела выносливости не превышает 17%. Поэтому, используя результаты определения остаточных напряжений в образцах-свидетелях, представляется

возможным прогнозировать предел выносливости поверхностно упрочнённых деталей в условиях концентрации напряжений с приемлемой для многоциклового усталости точностью.

Библиографический список

1. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
2. Сазанов, В.П. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании [Текст] / В.П. Сазанов, А.В. Чирков, В.А. Самойлов, Ю.С. Ларионова // Вестник СГАУ. – 2011. – №3(27), Ч. 3. – С. 171-174.
3. Павлов, В.Ф. Расчёт остаточных в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям [Текст] / В.Ф. Павлов, А.К. Столяров, В.С. Вакулюк, В.А. Кирпичёв. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. – 124 с.
4. 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.
5. Радченко, В.П. Методика расчёта предела выносливости упрочнённых цилиндрических образцов с концентраторами напряжений при температурных выдержках в условиях ползучести [Текст] / В.П. Радченко, О.С. Афанасьева // Вестник СамГТУ. Сер.: физ.-мат. науки. – 2009. – №2 (19). – С. 264-268.
6. 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: Межвузовский сборник. – Куйбышев: КуАИ, 1974. – Вып.3. – С. 88-95.
7. Кирпичёв, В.А. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений [Текст] / В.А. Кирпичёв, А.С. Букатый, А.П. Филатов, А.В. Чирков // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т.15, №4(44). – С. 81-85.
8. Петерсон, Р.Е. Коэффициенты концентрации напряжений [Текст] / Р.Е. Петерсон. – М.: Мир, 1977. – 304 с.