

ями / Н.М. Рудницкий // Проблемы прочности. – 1980. – №1. – С. 29-34.

8. Павлов, В. Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.

9. Сазанов, В. П. Оценка эффективности упрочняющей обработки цилиндрических деталей из конструкционных сталей / В.П. Сазанов, В.Ф. Павлов, О.Ю. Семёнова, А.А. Прохоров // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2018. – Т.17. – №2. – С. 164-173.

10. Павлов, В.Ф. Применение первоначальных деформаций в исследованиях остаточного напряжённо-деформированного состояния упрочнённых деталей / В.Ф. Павлов, В.П. Сазанов, В.С. Вакулюк, В.К. Шадрин // Насосы. Турбины. Системы. – 2019. – №1 (30). – С. 76-81.

УДК 621.787:4

*Павлов В.Ф., Шадрин В.К., Прохоров А.А., Богданова И.В.,
Матвеева К.Ф.*

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ДЕТАЛЕЙ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ

Надёжность и долговечность деталей машин являются одними из основных факторов, определяющих ресурс изделия в целом. Для обеспечения указанных показателей применяются различные методы упрочнения поверхностным пластическим деформированием, которые позволяют значительно повысить предел выносливости деталей. Как показывают многочисленные эксперименты [1-4], наиболее точно связь между приращением предела выносливости упрочнённых деталей и остаточными напряжениями отражает кри-

терий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$, предложенный в работе [1]. Этот критерий учитывает влияние на предел выносливости не только величины, но и характера распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали.

Оценка влияния поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости детали $\Delta\sigma_{-1}$ при изгибе в случае симметричного цикла при использовании критерия $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ производится по следующей зависимости:

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

где $\bar{\Psi}_{\sigma}$ – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$;

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

$\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в опасном сечении детали по толщине поверхностного слоя a ; $\xi = a/t_{kp}$ – расстояние от поверхности опасного сечения детали до текущего слоя, выраженное в долях t_{kp} ; t_{kp} – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей в опасном сечении упрочнённой детали при работе на пределе выносливости.

Из формул (1) и (2) видно, что для определения расчётным путём приращения предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ необходимо знать коэффициент $\bar{\Psi}_{\sigma}$ влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости, а также распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали, равной критической глубине t_{kp} нераспространяющейся трещины усталости.

На основании обработки экспериментальных данных для образцов и деталей с различными концентраторами напряжений в работах [4, 5] было установлено, что коэффициент $\bar{\Psi}_\sigma$ при симметричном цикле зависит только от степени концентрации напряжений и вычисляется по следующей формуле:

$$\bar{\Psi}_\sigma = 0,612 - 0,081\alpha_\sigma, \quad (3)$$

где α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений.

Из приведённых в исследованиях [2-4] результатов испытаний на усталость поверхности упрочнённых образцов и деталей следует, что критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости не зависит от вида поверхностного упрочнения, материала, типа и размеров концентратора, величины сжимающих остаточных напряжений, типа деформации, асимметрии цикла напряжений и определяется только размерами опасного поперечного сечения. Для сплошных цилиндрических образцов и деталей зависимость для t_{kp} имеет следующий вид:

$$t_{kp} = 0,0216 D_1, \quad (4)$$

где D_1 – диаметр опасного сечения образца или детали.

Для полых цилиндрических образцов и деталей зависимость для t_{kp} имеет следующий вид:

$$t_{kp} = 0,0216 D_1 \left[1 - 0,04 \left(\frac{d}{D_1} \right)^2 - 0,54 \left(\frac{d}{D_1} \right)^3 \right], \quad (5)$$

где D_1 – диаметр опасного сечения образца или детали, d – диаметр отверстия образца или детали.

Для проведения экспериментов были изготовлены сплошные и полые стандартные образцы различного диаметра из сталей 20, 45, 40Х, 30ХГСА [4]. Одна половина образцов после изготовления подвергалась электрополированию, другая – гидро- и пневмодробест-

труйной обработкам на режимах, характерных для практики авиационных предприятий. Партии деталей из каждого материала и их образцы-свидетели обрабатывались на одном технологическом режиме процесса упрочнения. Эпюры осевых остаточных напряжений σ_z по толщине a поверхностиного слоя в гладких образцах (полые втулки размером 51,5x45 мм) после гидродробеструйной (ГДО) и пневмодробеструйной (ПДО) обработок, определённые методом колец и полосок [6], приведены на рис. 1 и 2.

На гладкие неупрочнённые и упрочнённые образцы безнаклётным способом с использованием электрополирования наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиусом $R = 0,3$ мм.

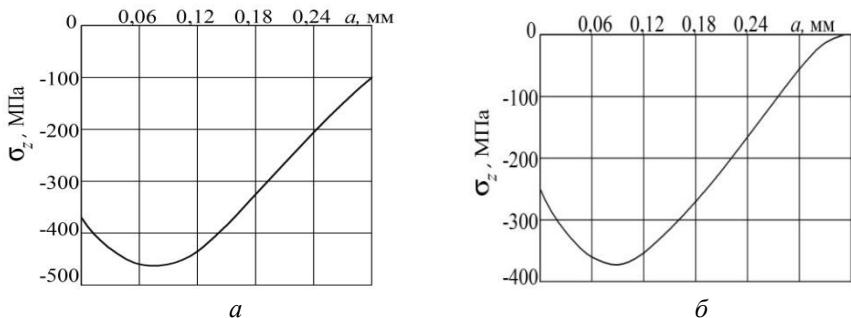


Рис. 1. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в образце-свидетеле диаметром 51,5x45 мм/мм после ГДО: a – 30ХГСА, b – 40Х

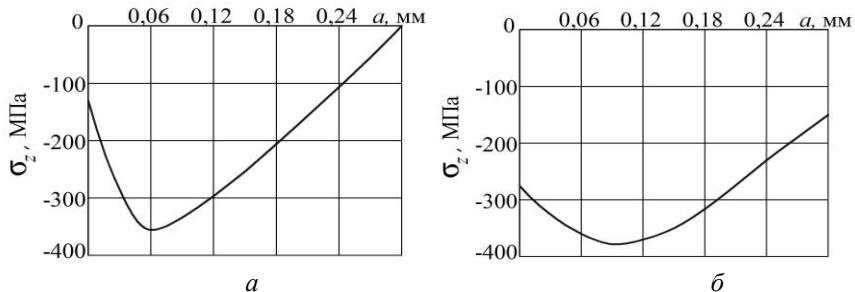


Рис. 2. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в образце-свидетеле диаметром 51,5x45 мм/мм: a – сталь 20 после ПДО, b – сталь 45 после ГДО

Расчётная часть исследований выполнялась методом конечно-элементного моделирования с использованием комплекса PATRAN/NASTRAN. Конечно-элементные модели гладких образцов и образцов с надрезами в осесимметричной постановке представляли собой четверть сечения цилиндра с наложением соответствующих граничных условий. Для моделирования использовался плоский треугольный элемент типа 2D-Solid с шестью узлами. Моделирование остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя гладких образцов было выполнено методом термоупругости [7].

При определении первоначальных деформаций [8] в конечно-элементной модели гладкого образца в качестве исходных данных использовалось экспериментальное распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине a упрочнённого поверхностного слоя (рис. 1 и 2). Полученные расчётным методом распределения первоначальных деформаций в гладких образцах использовались для расчёта распределения остаточных напряжений в образцах с круговыми надрезами полукруглого профиля радиуса $R = 0,3$ мм, нанесёнными на гладкие образцы после упрочнения.

Значения критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ вычислялись по формуле (2) по толщине поверхностного слоя опасного сечения образцов с надрезами, равной критической глубине t_{kp} нераспространяющейся трещины усталости. При расчёте критерия $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ использовались распределения осевых σ_z остаточных напряжений в образцах с надрезами $R = 0,3$ мм. Данные распределения были получены расчётным путём с применением соответствующих конечно-элементных моделей образцов с надрезами. Значения критической глубины t_{kp} нераспространяющейся трещины усталости определялись по зависимостям (4) и (5).

Значения коэффициента $\bar{\Psi}_\sigma$ влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ рассчитывались по

формуле (3). При этом величина теоретического коэффициента концентрации напряжений α_σ образцов с надрезами при изгибе определялась методом конечных элементов с использованием расчётного комплекса ANSYS. После вычисления критерия $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ и коэффициента $\bar{\Psi}_\sigma$ по формуле (1) определялись расчётные значения приращений пределов выносливости $(\Delta\sigma_{-1})_{\text{расч}}$ упрочнённых ГДО и ПДО образцов с надрезами радиуса $R = 0,3$ мм.

Значения глубин нераспространяющихся трещин усталости t_{kp} , среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$, приращений предела выносливости за счёт упрочнения по результатам эксперимента $(\Delta\sigma_{-1})_{\text{эксп}}$ и расчёта $(\Delta\sigma_{-1})_{\text{расч}}$, теоретического коэффициента концентрации напряжений α_σ , коэффициента влияния $\bar{\Psi}_\sigma$ приведены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты расчётного и экспериментального определения приращений пределов выносливости упрочнённых образцов с надрезами

	D , мм	d' , мм	D_I , мм	t_{kp} , мм	$\bar{\sigma}_{\text{ост}}$, МПа	α_σ	$\bar{\Psi}_\sigma$	$(\Delta\sigma_{-1})_{\text{расч}},$ МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{\text{эксп}},$ МПа	Рас- хож- дение, %
Сталь 20 (ПДО)	10	0	9,4	0,203	-122	2,7	0,393	48,0	45,0	6
	25	0	24,4	0,527	-89	2,9	0,377	33,6	30,0	11
	25	15	24,4	0,453	-91	3,0	0,369	33,5	32,5	3
Сталь 45 (ГДО)	15	5	14,4	0,303	-159	2,8	0,385	61,2	57,5	6
	25	15	24,4	0,453	-131	3,0	0,369	48,3	45,0	7
	50	40	49,4	0,733	-87	3,1	0,361	31,4	30,0	4
40Х (ГДО)	25	0	24,4	0,527	-109	2,9	0,377	41,1	42,5	3
	25	10	24,4	0,504	-110	2,9	0,377	41,4	42,5	3
	25	19	24,4	0,380	-117	3,0	0,369	43,2	40,0	8
30ХГСА (ГДО)	10	0	9,4	0,203	-240	2,7	0,393	94,0	90,0	5
	15	0	14,4	0,311	-196	2,8	0,385	75,5	77,5	3
	15	5	14,4	0,303	-211	2,8	0,385	81,3	77,5	5
	15	10	14,4	0,249	-218	2,9	0,377	82,1	80,0	3

Из приведённых в табл. 1 данных следует, что эффективность упрочняющей обработки тем выше, чем выше значение среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$, определённых на критической глубине t_{kp} нераспространяющейся трещины усталости, при

этом большее значение $\bar{\sigma}_{ост}$ объясняется более полной эпюрой остаточных напряжений за счёт больших величин сжимающих остаточных напряжений и толщины упрочнённого слоя (рис. 1 и 2).

Результаты испытаний на усталость неупрочнённых и упрочнённых образцов показали их достаточно высокую сходимость с результатами расчёта приращений пределов выносливости – расхождение не превышает 11%. Из этих результатов следует, что для всех типоразмеров образцов из различных сталей приращение предела выносливости за счёт упрочнения пропорционально значению среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, определённых на критической глубине t_{kp} нераспространяющейся трещины усталости. Поэтому выбор метода упрочнения и назначения его технологических режимов следует выполнять из условия получения максимального значения среднеинтегральных остаточных напряжений.

Таким образом, проведённое исследование показало, что использование расчёто-экспериментальных методов оценки предела выносливости позволяет назначать оптимальные по сопротивлению многоцикловой усталости режимы и методы поверхностного пластического деформирования деталей сложной формы без проведения длительных и дорогостоящих испытаний на усталость натуральных деталей.

Библиографический список

1. Павлов, В. Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений / В.Ф. Павлов // 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 / В.Ф. Павлов // 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 / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – №12. – С. 37-40.
4. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхенно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
5. Кирпичёв, В.А. Прогнозирование предела выносливости поверхенно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений / В.А. Кирпичёв, А.С. Букатый, А.П. Филатов, А.В. Чирков // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т. 15. – № 4 (44). – С. 81-85.
6. Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок / С.И. Иванов // Остаточные напряжения. Куйбышев: КуАИ. – 1971. – Вып. 53. – С. 32-42.
7. Сазанов, В.П. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании / В.П. Сазанов, А.В. Чирков, В.А. Самойлов, Ю.С. Ларионова // Вестник СГАУ. – 2011. – №3(27). – Ч. 3. – С. 171-174.
8. Павлов, В. Ф. 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.