

*Сазанов В.П., Вакулюк В.С., Шадрин В.К., Лунин В.В.,
Меркурьева Е.Р.*

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ ДРОБЕСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ

При прогнозировании предела выносливости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений, а также выбора оптимальных режимов упрочнения необходимо выполнить комплексное решение следующих задач:

- экспериментальное определение распределений остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя (в лабораторных условиях);

- моделирование остаточного напряжённо-деформированного состояния в гладких деталях и деталях с концентраторами напряжений

с применением современных САЕ- систем;

- выбор критерия влияния с последующей разработкой методики прогнозирования предела выносливости за счёт упрочнения.

При определении остаточных напряжений в этом случае применение метода «образца-свидетеля» разрушению подвергается только «образец-свидетель». Данный образец, имеющий определённые размеры и форму, проходит весь технологический цикл упрочняющей обработки вместе со штатной деталью. Как показывает практика, связь между приращением предела выносливости упрочнённых деталей и остаточными сжимающими напряжениями наиболее точно отражает критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ [1–3]. Оценка влияния поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости детали при изгибе $\Delta\sigma_{-1}$ с использованием критерия $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ производится по следующей зависимости [1]:

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

где $\bar{\psi}_{\sigma}$ – феноменологический коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$; $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ – среднеинтегральные остаточные напряжения, определяемые на критической глубине нераспространяющейся трещины усталости $t_{\text{кр}}$, возникающей в опасном сечении упрочнённой детали при работе на пределе выносливости.

Коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$ зависит от степени концентрации напряжений и вычисляется, например, для случая изгиба по следующей формуле:

$$\bar{\psi}_{\sigma} = 0,612 - 0,081 \alpha_{\sigma}, \quad (2)$$

где α_{σ} – теоретический коэффициент концентрации напряжений.

Критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости определяется только размерами опасного поперечного сечения. Для цилиндрических образцов и деталей зависимость при определении $t_{\text{кр}}$ имеет вид [1–3]:

$$\text{– для сплошного цилиндра: } t_{\text{кр}} = 0,0216 D_1; \quad (3)$$

$$\text{– для полого цилиндра: } t_{\text{кр}} = 0,0216 D_1 \cdot \left[1 - 0,04 \cdot \left(\frac{d}{D_1} \right)^2 - 0,54 \cdot \left(\frac{d}{D_1} \right)^3 \right], \quad (4)$$

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

Приведём результаты исследований по апробации расчётно-экспериментального метода с использованием «образцов-свидетелей» для материалов: сталь 20, сталь 45. Из указанных материалов были изготовлены сплошные и полые цилиндрические образцы с наружным диаметром D в гладкой части, диаметром отверстия d , диаметром D_1 в наименьшем сечении с надрезом.

Гладкие образцы из стали 20 подвергались пневмодробеструйной обработке, а из стали 45 – гидродробеструйной обработке. После упрочнения на образцы наносились концентраторы в виде полукруглого надреза радиусом $R = 0,3$ мм. В качестве «образцов-свидетелей» использовались втулки с наружным диаметром $D = 51,5$ мм, внутренним $d = 45$ мм и длиной 80 мм из тех же материалов.

Расчётная часть исследований выполнялась методом конечно-элементного моделирования с использованием комплекса PATRAN/NASTRAN. Первоначальные остаточные деформации по толщине упрочнённого поверхностного слоя образцов моделировались методом термоупругости [4, 5]. При определении первоначальных деформаций в качестве исходных данных использовалось экспериментальное распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине a упрочнённого поверхностного слоя втулки (рис. 1), которое было получено методом колец и полосок [6].

Распределения осевых σ_z остаточных напряжений в опасных сечениях образцов с надрезами рассчитывались аналитическим методом [7] и численным методом с использованием программного комплекса PATRAN/NASTRAN [4, 5]. Результаты представлены на рис. 2 и 3.

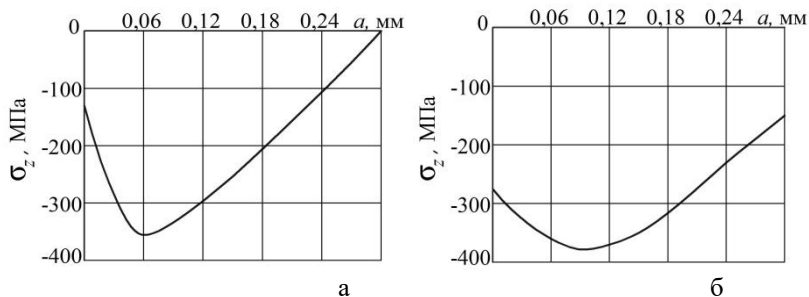


Рис. 1. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в «образцах-свидетелях» (втулки с $D = 51,5$ мм, $d = 45$ мм) из стали 20 (а) и стали 45 (б) после пневмодробеструйной обработки (а) и гидродробеструйной обработки (б)

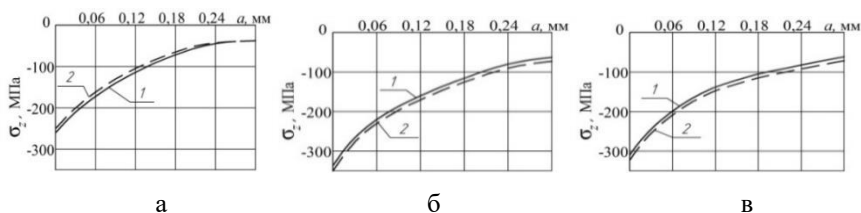


Рис. 2. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в образцах из стали 20 с надрезом $R = 0,3$ мм, вычисленных по экспериментальным (1) и по расчётным (2) данным: (а) – $D = 10$ мм, $d = 0$; (б) – $D = 25$ мм, $d = 0$; (в) – $D = 25$ мм, $d = 15$ мм

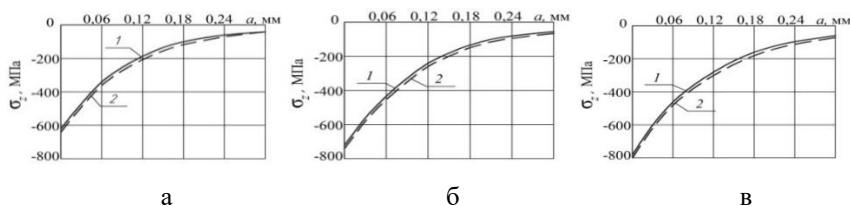


Рис. 3. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в образцах из стали 45 с надрезом $R = 0,3$ мм, вычисленных по экспериментальным (1) и по расчётным (2) данным: (а) – $D = 15$ мм, $d = 5$ мм; (б) – $D = 25$ мм, $d = 15$ мм; (в) – $D = 50$ мм, $d = 40$ мм

Результаты расчётов приращений пределов выносливости $(\Delta\sigma_{-1})_{\text{расч}}$ и приращений $(\Delta\sigma_{-1})_{\text{эксп}}$ по результатам испытаний на усталость (при изгибе с вращением в случае симметричного цикла) представлены в табл. 1 и 2.

Табл. 1. Результаты расчётного и экспериментального определения пределов выносливости образцов с надрезами из стали 20

D , мм	d , мм	D_1 , мм	$t_{\text{кр}}$, мм	$\bar{\sigma}_{\text{ост}}$, МПа	α_σ	$\bar{\psi}_\sigma$	$(\Delta\sigma_{-1})_{\text{расч}}$, МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{\text{эксп}}$, МПа	Расхождение, %
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

Табл. 2. Результаты расчётного и экспериментального определения пределов выносливости образцов с надрезами из стали 45

D , мм	d , мм	D_1 , мм	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	α_{σ}	$\bar{\psi}_{\sigma}$	$(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$, МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{эксп}$, МПа	Расхож- де- ние, %
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

Из представленных в табл. 1 и 2 данных видно, что расхождение между расчётными и экспериментальными значениями приращений пределов выносливости не превышает 11 % для стали 20 и 7 % для стали 45.

Используя результаты определения остаточных напряжений в «образцах-свидетелях», можно с приемлемой для многоцикловой усталости точностью прогнозировать предел выносливости поверхностно упрочнённых (после дробеструйной обработки) цилиндрических деталей из различных конструкционных материалов в достаточно широком диапазоне изменения диаметров (10÷50 мм).

Библиографический список

1. Павлов, В.Ф. 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.
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. Сазанов, В.П. Определение первоначальных деформаций в упрочнённом слое цилиндрической детали методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса PATRAN/NASTRAN / В.П. Сазанов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулук, В.Ф. Павлов // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19. – № 2 (68). – С. 35-40.

5. Сазанов, В.П. Моделирование остаточного напряжённого состояния деталей в условиях концентрации напряжений с использованием программного комплекса MSC.NASTRAN\MSC.PATRAN / В.П. Сазанов, А.В. Чирков, О.Ю. Семёнова, А.В. Иванова // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Техн. науки. – 2012. – № 1(33). – С. 106–113.

6. Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок [Текст] / С.И. Иванов // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ. – 1971. – Вып. 53. – С. 32-42.

7. Иванов, С.И. Определение дополнительных остаточных напряжений в надрезах на цилиндрических деталях / С.И. Иванов, М.П. Шатунов, В.Ф. Павлов // Вопросы прочности элементов конструкций. – Куйбышев: Куйбышев. авиац. ин-т, 1973. – Вып. 60. – С. 160-170.

УДК 621.787:539.319

Семёнова О.Ю., Денискина Е.А., Михалкина С.А., Морозов А.Ю., Зубков А.Ю.

ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПРИРАЩЕНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ

В работах [1, 2] показано, что приращение предела выносливости поверхностно упрочнённой детали при изгибе в случае симметричного цикла $\Delta\sigma_{-1}$ определяется по формуле $\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_{\sigma} \cdot \left| \bar{\sigma}_{ост} \right|$, где $\bar{\sigma}_{ост}$ - критерий среднеинтегральных остаточных напряжений,