

ЗАВИСИМОСТЬ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ОТ ДИАМЕТРА ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ

В повышении сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей в условиях концентрации решающую роль играют сжимающие остаточные напряжения [1]. В работе [2] для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений был предложен критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ в виде

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

где $\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в опасном сечении детали с концентратором напряжений по толщине поверхностного слоя y ; $\xi = y/t_{кр}$ – расстояние от поверхности дна концентратора до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$; $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе детали на пределе выносливости (рисунок 1).

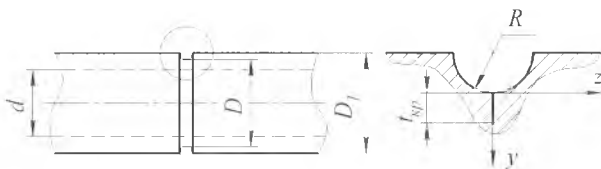


Рисунок 1 – Цилиндрический образец с надрезом полукруглого профиля и нераспространяющаяся трещина усталости

Для проверки возможности применения критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ при оценке прогнозирования предела выносливости упрочнённых деталей из стали 20 были проведены эксперименты на цилиндрических образцах с круговыми надрезами полукруглого профиля (рисунок 1). Исследуемая сталь 20 имела следующие механические характеристики:

$$\sigma_T = 395 \text{ МПа.}$$

$$\sigma_n = 522 \text{ МПа, } \delta = 26,1\%, \psi = 65,9\%, S_i = 1416 \text{ МПа.}$$

Гладкие образцы диаметрами $D1=10$ мм и $D1=25$ мм с отверстием $d=15$ мм подвергались пневмодробеструйной обработке (ПДО), а также обкатке роликом (ОР) при

усилии $P=0,5$ кН (OP1) и $P=1,0$ (OP2) кН. Гладкие образцы диаметром $D1=50$ мм с отверстием $d=40$ мм подвергались обкатке роликом при усилиях $P = 0,5$ кН (OP1) и $P=1,0$ (OP2) кН. Затем на все упрочнённые и неупрочнённые гладкие образцы наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиуса $R=0,5$ мм.

Остаточные напряжения в гладких образцах диаметром $D1=10$ мм определялись экспериментально методом колец и полосок [3], а также методом удаления части цилиндрической поверхности [4]. Остаточные напряжения в гладких образцах диаметром $D1=25$ мм с отверстием $d=15$ мм и $D1=50$ мм с отверстием $d=40$ мм определялись методом колец и полосок [4]. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a в гладких образцах представлено на рисунке 2.

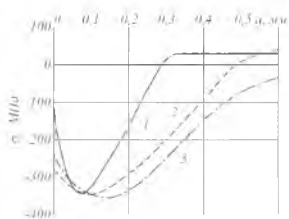


Рисунок 2 – Осевые σ_z остаточные напряжения в упрочнённых гладких образцах из стали 20 после: 1 – ПДО; 2 – OP1; 3 – OP2

Остаточные напряжения в образцах с надрезами определялись расчётным путём – суммированием дополнительных остаточных напряжений за счёт перераспределения остаточных усилий после опережающего поверхностного пластического деформирования (ОППД) и остаточных напряжений гладких образцов. При этом дополнительные остаточные напряжения вычислялись как аналитическим методом по методике работы [5], так и численным методом по первоначальным деформациям с использованием программного комплекса PATRAN/NASTRAN. Необходимо отметить, что результаты определения дополнительных остаточных напряжений двумя методами имели хорошее совпадение. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a наименьшего сечения образцов с надрезами $R=0,5$ мм приведено на рисунке 3.

Следует обратить внимание на то, что при упрочняющей обработке на одних и тех же режимах образцов диаметрами 10 мм, 25/15 мм/мм и 50/40 мм/мм с надрезами $R=0,5$ мм остаточные напряжения несколько различаются, причём на поверхности надрезов в образцах после обкатки роликом напряжения одинаковы. В образцах после

ПДО остаточные напряжения различаются и на поверхности надреза. Наблюдаемое различие в распределении остаточных напряжений в образцах с надрезами после ОПД при одинаковом распределении напряжений в гладких образцах объясняется тем, что с увеличением диаметра полого цилиндра при неизменной толщине стенки уменьшается величина растягивающих остаточных напряжений под упрочнённым поверхностным слоем. В результате при одинаковых дополнительных напряжениях после ОПД суммарные остаточные напряжения с увеличением диаметра образца с отверстием будут увеличиваться, что и наблюдалось в настоящем исследовании.

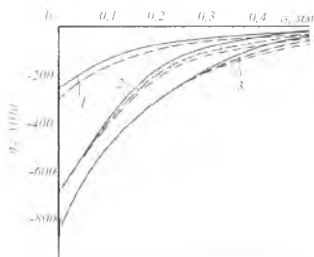


Рисунок 3 – Осевые σ_z остаточные напряжения в упрочнённых образцах из стали 20 с надрезом $R = 0.3$ мм после: 1 – ПДО; 2 – ОП1; 3 – ОП2;

(— — — $D_i=10$ мм; - - - - $D_i=25$ мм, $d=15$ мм; · · · · · $D_i=50$ мм, $d=40$ мм)

Испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла неупрочнённых и упрочнённых образцов диаметром $D_1=10$ мм проводились на машине МУИ-6000, диаметром $D_1=25$ мм с отверстием $d=15$ мм – на машине УММ-01, диаметром $D_1=50$ мм с отверстием $d=40$ мм – на машине УМП-02, база испытаний – 3·10⁶ циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости σ_{-1} представлены в таблице 1. Упрочнённые образцы, выстоявшие базу испытаний при напряжениях, равных пределу выносливости, доводились до разрушения при большей нагрузке. На изломах этих образцов были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, глубина $t_{кр}$ которых представлена в таблице 1. Эта глубина соответствует зависимости $t_{кр}$ от размеров поперечного сечения детали (образца), установленной экспериментально в работе [6]

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

Используя распределение осевых остаточных напряжений σ_z в образцах с надрезом $R=0.5$ мм (рисунок 3) по толщине поверхностного слоя, равной $t_{кр}$, по формуле

(1) вычислялись среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ост}$, значения которых представлены в таблице 1. Затем по формуле (2) рассчитывался коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости $\bar{\psi}_{\sigma}$, значения которого также приведены в таблице 1.

Таблица 1

D_1/d , мм/мм	Неупрочнённые образцы σ_1 , МПа	Упрочнённые образцы				
		обработка	σ_{-1} , МПа	$l_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$
10/0	120	ПДО	137,5	0,196	-48	0,365
		ОР1	187,5	0,202	-178	0,379
		ОР2	250	0,192	-333	0,390
25/15	110	ПДО	127,5	0,438	-47	0,372
		ОР1	152,5	0,442	-128	0,332
		ОР2	182,5	0,446	-218	0,333
50/40	60	ОР1	87,5	0,710	-82	0,335
		ОР2	105	0,720	-133	0,338

Из представленных в таблице 1 данных видно, что для цилиндрических сплошных и полых упрочнённых образцов с надрезом $R=0,5$ мм из стали 20 значение коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$ при изгибе в случае симметричного цикла составляет в среднем 0,356, что практически совпадает с величиной $\bar{\psi}_{\sigma}=0,36$ для образцов и деталей из сталей других марок, алюминиевых сплавов и сплавов на основе никеля с такой же концентрацией напряжений [7].

Таким образом, в исследовании установлено, что критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ может быть использован для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых полых цилиндрических деталей с концентраторами напряжений из стали 20 диаметром 10 – 50 мм.

Библиографический список

1. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений и наклёпа на усталостную прочность [Текст] / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов // Проблемы прочности. – 1976. – №5. С. 25-27.
2. 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.

3. 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.
4. Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом снятия части поверхности [Текст] / С.И. Иванов, И.В. Григорьева // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып. 48. – С.179-183.
5. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций [Текст] / С.И. Иванов, М.П. Шатунов, В.Ф. Павлов. – Куйбышев: КуАИ, 1974. – Вып. I. – С. 88-95.
6. Павлов, В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение II. Полые детали [Текст] / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение, 1988. – №12. – С. 37-40.
7. 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.