

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГИДРОДРОБЕСТРУЙНОЙ
ОБРАБОТКИ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ОБРАЗЦОВ
ИЗ СТАЛИ 45 РАЗЛИЧНОГО ДИАМЕТРА**

При внедрении в производство новых упрочняющих технологий необходимо разрабатывать и апробировать научно обоснованные расчётные методы прогнозирования характеристик сопротивления усталости деталей с целью сокращения длительных и дорогостоящих испытаний на усталость. После упрочнения различными методами поверхностного пластического деформирования в поверхностном слое деталей возникают наклёп и сжимающие остаточные напряжения. Известно [1,2], что основную роль в повышении сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей в условиях концентрации играют сжимающие остаточные напряжения. В работе [3] для прогнозирования приращения предела выносливости упрочнённых деталей с концентраторами по остаточным напряжениям был предложен критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{осм}$ в виде

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

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

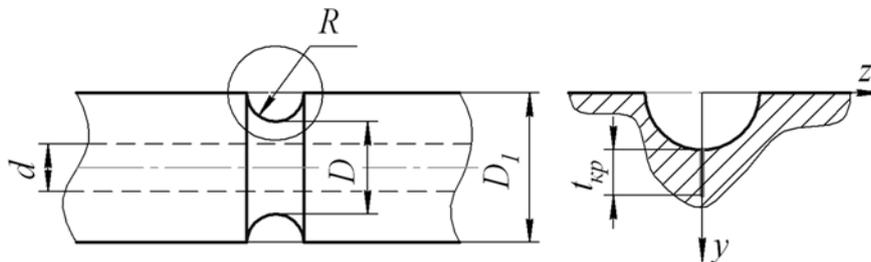


Рис. 1. Цилиндрический образец с надрезом полукруглого профиля

Приращение предела выносливости при изгибе в случае симметричного цикла $\Delta\sigma_{-1}$ упрочнённой детали с использованием критерия $\bar{\sigma}_{осм}$ определяется по следующей формуле:

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_{\sigma} \cdot |\bar{\sigma}_{осм}|, \quad (2)$$

где $\bar{\psi}_\sigma$ – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости по разрушению.

С целью проверки возможности использования критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ для оценки влияния гидродробеструйной обработки на предел выносливости деталей из стали 45 различного диаметра были проведены эксперименты на цилиндрических образцах с круговыми надрезами полукруглого профиля (рис. 1). Исследуемая сталь 45 имела следующие механические характеристики: $\sigma_T = 411$ МПа, $\sigma_s = 757$ МПа, $\delta = 17,4\%$, $\psi = 39,6\%$, $S_k = 1097$ МПа.

Гладкие образцы подвергались гидродробеструйной обработке (ГДО) дробью диаметром 2 мм при давлении масла 0,28 МПа в течение 8 минут. Затем на все упрочнённые и неупрочнённые гладкие образцы наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиуса $R = 0,3$ мм.

Остаточные напряжения в гладких образцах определялись экспериментально методом колец и полосок [4], а также методом удаления части цилиндрической поверхности [5].

Остаточные напряжения в образцах с надрезом определялись расчётным путём – суммированием дополнительных остаточных напряжений за счёт перераспределения остаточных усилий после опережающего поверхностного пластического деформирования и остаточных напряжений гладких образцов. При этом дополнительные остаточные напряжения вычислялись аналитическим методом по методике работы [6]. Распределения (эпюры) осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a наименьшего сечения образцов с надрезом $R = 0,3$ мм приведено на рис. 2, где номер эпюры остаточных напряжений соответствует номеру партии образцов табл. 1.

Испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла неупрочнённых и упрочнённых образцов проводились при базе испытаний $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости σ_{-1} представлены в табл. 1. Упрочнённые образцы, выстоявшие базу испытаний при напряжениях, равных пределу выносливости, были доведены до разрушения при бóльшей нагрузке. На изломах этих образцов были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, глубина которых соответствует зависимости $t_{кр}$ от размеров поперечного сечения детали (образца), установленной экспериментально в работе [7]

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

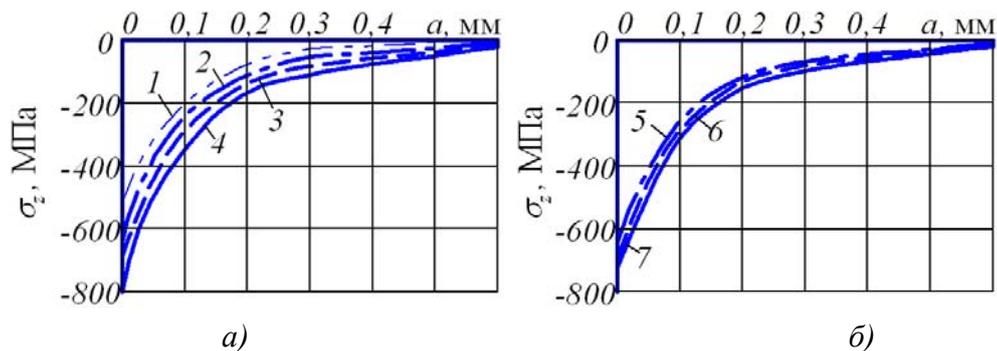


Рис. 2. Остаточные напряжения в образцах с надрезом $R = 0,3$ мм из стали 45 после ГДО: номер эпюры соответствует номеру партии образцов табл. 1

Таблица 1 – Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений образцов различного диаметра из стали 45

№ партии	Размеры образцов			Неупрочнённые образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы			
	D_l , мм	D , мм	d , мм		σ_{-1} , МПа	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
1	10	9,4	0	155,0	225	0,197	-204	0,343
2	15	14,4	0	152,5	210	0,312	-157	0,366
3	15	14,4	5	152,5	210	0,300	-154	0,372
4	25	24,4	0	147,5	190	0,508	-112	0,378
5	25	24,4	15	140	185	0,477	-125	0,361
6	50	49,4	0	122,5	147,5	1,064	-67	0,372
7	50	49,4	40	87,5	117,5	0,763	-80	0,375

Используя распределение осевых σ_z остаточных напряжений в образцах с надрезом $R = 0,3$ мм (рис. 2) по толщине поверхностного слоя, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$, по формуле (1) вычислялись среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ост}$, значения которых представлены в табл. 1. Затем по формуле (2) рассчитывался коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости $\bar{\psi}_\sigma$, значения которого также приведены в табл. 1.

Из представленных в табл. 1 данных видно, что для цилиндрических сплошных и полых упрочнённых образцов с надрезом $R = 0,3$ мм из стали 45 значение коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ при изгибе в случае симметричного цикла составляет в среднем 0,367, что практически совпадает со значением $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$ для образцов и деталей из сталей других марок, алюминиевых сплавов и сплавов на основе никеля с такой же концентрацией напряжений [8].

Выводы

1. В исследовании установлено, что критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ может быть использован для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых гидродробеструйной обработкой деталей различного диаметра с концентраторами напряжений из стали 45.
2. Подтверждена зависимость (3) глубины нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$ от размеров поперечного сечения сплошных и полых деталей на примере упрочнённых гидродробеструйной обработкой образцов из стали 45.

Библиографический список

1. Биргер, И.А. Остаточные напряжения [Текст]/ И.А. Биргер – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
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. – Куйбышев: КуАИ, 1974. – Вып.1. – С. 88-95.
7. 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.
8. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям: монография [Текст]/ В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.