

Павлов В.Ф., Букатый А.С., Сургутанов Н.А., Микушев Н.Н.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ОБРАЗЦОВ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ

После поверхностного пластического деформирования (ППД) в поверхностном слое деталей изменяется структура, возникают наклёп и сжимающие остаточные напряжения. Известно [1], что основную роль в повышении сопротивления усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений играют сжимающие остаточные напряжения. Для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости таких деталей применяются два критерия. Первым критерием, использованным в работах [1, 2], являются остаточные напряжения на поверхности концентратора. Зависимость для определения предела выносливости с применением этого критерия имеет вид

$$P_R = P_R^0 - \psi_P \cdot \sigma_z^{noc}, \quad (1)$$

где $P_R^0(\sigma_R^0, \tau_R^0)$ – предел выносливости неупрочнённой детали, $\psi_P(\psi_\sigma, \psi_\tau)$ – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию σ_z^{noc} , σ_z^{noc} – осевые (меридиональные) остаточные напряжения на поверхности концентратора в наименьшем (опасном) сечении детали.

Обычно зависимость (1) записывается для приращения предела выносливости

$$\Delta P_R = \psi_P \cdot \left| \sigma_z^{noc} \right|. \quad (2)$$

На практике, при упрочнении деталей ППД, наблюдается подповерхностный максимум сжимающих остаточных напряжений, то есть к поверхности деталей напряжения уменьшаются. Часто этот спад бывает весьма существенным, иногда остаточные напряжения снижаются к поверхности до нуля и даже становятся растягивающими [3], однако увеличение предела выносливости наблюдается и в этих случаях. Всё изложенное выше указывает на то, что критерий оценки влияния поверхностного упрочнения деталей с концентраторами напряжений должен базироваться на учёте остаточных напряжений не только на поверхности, но и по толщине поверхностного слоя.

Для определения второго критерия в работе [4] использовалось решение задачи [5] о дополнительных остаточных напряжениях в наименьшем сечении поверхностно упрочнённой детали после нанесения на неё надреза полуэллиптического профиля. Выделив основную часть решения [5], был предложен второй критерий – критерий

среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ – влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости упрочнённой детали в виде

$$\bar{\sigma}_{ост} = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad (3)$$

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

Приращение предела выносливости $\Delta P_R(\Delta\sigma_R, \Delta\tau_R)$ упрочнённой детали с концентратором напряжений при использовании критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ вычисляется по следующей формуле:

$$\Delta P_R = \bar{\psi}_R \cdot |\bar{\sigma}_{ост}|, \quad (4)$$

где $\bar{\psi}_R(\bar{\psi}_\sigma, \bar{\psi}_\tau)$ – коэффициент влияния остаточных напряжений по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ на предел выносливости по разрушению.

В работе [6] для упрочнённых различными методами ППД деталей (образцов) из различных материалов с различными концентраторами напряжений при растяжении-сжатии, изгибе и кручении было экспериментально установлено, что критическая глубина $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости зависит только от размеров наименьшего (опасного) поперечного сечения и для цилиндрической детали определяется соотношением

$$t_{кр} = 0,0216D, \quad (5)$$

где D – диаметр наименьшего (опасного) поперечного сечения детали.

Для проверки возможности использования обоих критериев при оценке влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости при изгибе в случае симметричного цикла были проведены эксперименты на сплошных цилиндрических упрочнённых и неупрочнённых образцах из стали 20 с круговыми надрезами полукруглого профиля радиуса $R=0,5$ мм. Гладкие сплошные образцы диаметром $D1=10$ мм и $D1=25$ мм подвергались пневмодробеструйной обработке (ПДО) и обкатке роликом при усилии $P=0,5$ кН (ОП1) и $P=1,0$ кН (ОП2). Затем на все упрочнённые и неупрочнённые гладкие образцы наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиуса $R=0,5$ мм.

Остаточные напряжения в гладких образцах определялись экспериментально методом колец и полосок.

Остаточные напряжения в образцах с надрезами 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 как аналитическим [5], так и численным методами. Значения остаточных напряжений на поверхности дна надрезов $\sigma_{\chi}^{нов}$ представлены в таблице 1.

Испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла неупрочнённых и упрочнённых образцов диаметром $D_1=10$ мм в гладкой части проводились на машине МУИ-6000, диаметром $D_1=25$ мм – на машине УММ-01; база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости σ_{-1} представлены в таблице 1. Упрочнённые образцы, выстоявшие базу испытаний при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при больших напряжениях. На изломах этих образцов были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, глубина $l_{кр}$, которых соответствует зависимости (5) и приведена в таблице 1.

Таблица 1

D_1 , мм	D , мм	Неупроч. образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы						
			обработка	σ_{-1} , МПа	$\sigma_{\chi}^{нов}$, МПа	ψ_{σ}	$l_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{крит}$, МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$
10	9.0	120	ПДО	137,5	-90	0,194	0,196	-48	0,365
			ОР1	187,5	-311	0,217	0,202	-178	0,379
			ОР2	250	-517	0,251	0,192	-333	0,390
25	24	112,5	ПДО	130	-142	0,123	0,525	-52	0,337
			ОР1	150	-349	0,107	0,530	-111	0,338
			ОР2	172,5	-515	0,117	0,520	-169	0,355

Из представленных в таблице 1 данных видно, что опережающее поверхностное пластическое деформирование образцов с надрезом пневмодробеструйной обработкой и обкаткой роликом приводит к существенному повышению предела выносливости. Наиболее эффективна для исследованных образцов обкатка роликом, причём с увеличением усилия обкатки с $P=0,5$ кН до $P=1,0$ кН предел выносливости возрастает. Наблюдаемое явление объясняется большей глубиной залегания сжимающих остаточных напряжений в гладких упрочнённых образцах при увеличении усилия обкатки.

результатом чего явилось повышение остаточных напряжений в наименьшем сечении образцов с надрезом.

Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов по первому критерию $\sigma_z^{\text{нов}}$ – остаточным напряжениям на поверхности надреза – приводит к значительному рассеянию коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$. Этот коэффициент в проведённом исследовании изменяется в широких пределах: от 0,107 до 0,251 (таблица 1), то есть изменяется в 2,5 раза, что неприемлемо для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей.

Оценка влияния поверхностного упрочнения по второму критерию $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ – среднеинтегральным остаточным напряжениям – приводит к существенно меньшему рассеянию соответствующего коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$. Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ в проведённом исследовании изменяется от 0,337 до 0,390, составляя в среднем 0,361, и совпадает со значением $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$, установленным в работе [7] для упрочнённых образцов и деталей с аналогичной концентрацией напряжений.

Таким образом, проведённое исследование показало, что для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых образцов и деталей с концентраторами напряжений наиболее оправдано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$. Для определения приращения предела выносливости таких образцов при изгибе следует воспользоваться формулой (4). Критерий $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ при этом вычисляется по зависимости (3) по толщине поверхностного слоя, равной критической глубине $t_{\text{сп}}$ нераспространяющейся трещины усталости и определяемой формулой (5). Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ влияния упрочнения на предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ для упрочнённых деталей и образцов с надрезами можно принять равным 0,36.

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. Серенсен, С.В. К вопросу об оценке сопротивления усталости поверхностно упрочнённых образцов с учётом кинетики остаточной напряжённости [Текст] / С.В. Серенсен, С.П. Борисов, Н.А. Бородин // Проблемы прочности. – 1969. – №2. – С. 3-7.
3. Школьник, Л.М. Повышение прочности шестерён дробеструйным наклёпом [Текст] / Л.М. Школьник, В.П. Девяткин // Вестник машиностроения. – 1950. – №12. – С. 7-12.

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. 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.
6. Павлов, В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение I. Сплошные детали [Текст] / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – №8. – С. 22-26.
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.