

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИТЕРИЯ СРЕДНЕИНТЕГРАЛЬНЫХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Основную роль в повышении характеристик сопротивления усталости деталей с концентраторами напряжений после поверхностного пластического деформирования (ППД) играют сжимающие остаточные напряжения [1]. Для оценки влияния остаточных напряжений на предел выносливости упрочнённых ППД деталей применяются два критерия. Первым критерием, использованным в работах [1-4], являются остаточные напряжения на поверхности концентратора. Зависимость для определения предела выносливости P_R упрочнённой детали в этом случае имеет вид

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

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^{nov} , σ_z^{nov} – осевые (меридиональные) остаточные напряжения на поверхности концентратора опасного сечения детали. Другие компоненты остаточного напряжённого состояния в соответствии с теорией наибольших касательных напряжений не участвуют, так как окружные остаточные напряжения являются промежуточными главными напряжениями, а радиальные остаточные напряжения на поверхности концентратора равны нулю [5].

Обычно формула (1) записывается для приращения предела выносливости ΔP_R упрочнённой детали

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

При упрочнении деталей ППД часто наблюдается подповерхностный максимум сжимающих остаточных напряжений, то есть к поверхности деталей остаточные напряжения уменьшаются. Этот спад бывает весьма существенным, иногда остаточные напряжения снижаются к поверхности до нуля и даже становятся растягивающими [6]. Однако увеличение предела выносливости наблюдается и в этих случаях. Эти эксперименты указывают на то, что критерий оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей с концентраторами по остаточным напряжениям должен базироваться на учёте остаточных напряжений не только на поверхности, но и по толщине поверхностного слоя опасного сечения деталей.

Для определения второго критерия в работе [7] использовалось аналитическое решение задачи [8] о дополнительных остаточных напряжениях в наименьшем сечении поверхностно упрочнённой детали после нанесения на неё надреза полуэллиптического профиля. Выделив основную часть решения [8], был получен второй критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ – критерий среднеинтегральных остаточных напряжений – влияния остаточных напряжений 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 (меридиональные) остаточные напряжения в опасном сечении детали, $\xi = y/t_{кр}$ – расстояние от дна концентратора до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$ (рис. 1), $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе детали (образца) на пределе выносливости.

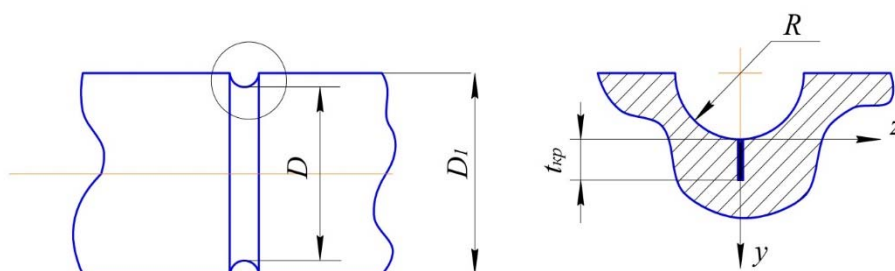


Рис. 1. Цилиндрический образец с надрезом полукруглого профиля и нераспространяющаяся трещина усталости

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

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

где $\bar{\psi}_P(\bar{\psi}_\sigma, \bar{\psi}_\tau)$ – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$.

В работе [9] 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 опасного поперечного сечения и для сплошных цилиндрических деталей определяется соотношением

$$t_{кр} = 0,0216D, \quad (5)$$

где D – диаметр опасного сечения детали (рис. 1).

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 диаметром 25 мм с круговыми надрезами полукруглого профиля и напессованной втулкой. Исследуемая сталь 20 имела следующие механические характеристики: $\sigma_T = 395$ МПа, $\sigma_e = 522$ МПа, $\delta = 26,1$ %, $\psi = 65,9$ %, $S_k = 1416$ МПа.

Гладкие образцы диаметром $D_1 = 25$ мм подвергались пневмодробеструйной обработке (ПДО) стальными шариками диаметром 1,5-2,5 мм в течение 10 минут, а также обкатке роликом (ОР) диаметром 60 мм и профильным радиусом 1,6 мм при усилиях $P = 0,5$ кН (ОР1) и $P = 1,0$ кН (ОР2) с подачей 0,11 мм/об и скоростью вращения образца 400 об/мин. Затем на упрочнённые и неупрочнённые гладкие образцы наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиусов $R = 0,3$ мм, $R = 0,5$ мм и $R = 1,0$ мм.

Остаточные напряжения в гладких образцах определялись методом колец и полосок [10]. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a гладких образцов представлено на рис. 2. Можно видеть, что глубина залегания сжимающих остаточных напряжений при ОР больше, чем при ПДО, причём с увеличением усилия обкатки толщина слоя со сжимающими остаточными напряжениями увеличивается.

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.

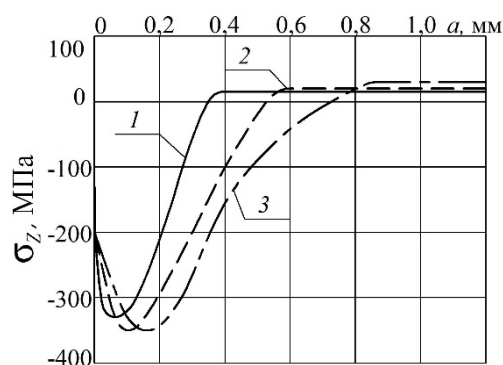


Рис. 2. Осевые σ_z остаточные напряжения в упрочнённых гладких образцах диаметром 25 мм после: 1 – ПДО; 2 – ОР1; 3 – ОР2

Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a в наименьшем сечении образцов с надрезами $R = 0,3$ мм, $R = 0,5$ мм и $R = 1,0$ мм приведено на рис. 3, а значения остаточных напряжений на поверхности дна надрезов $\sigma_z^{нов}$ представлены в табл. 1.

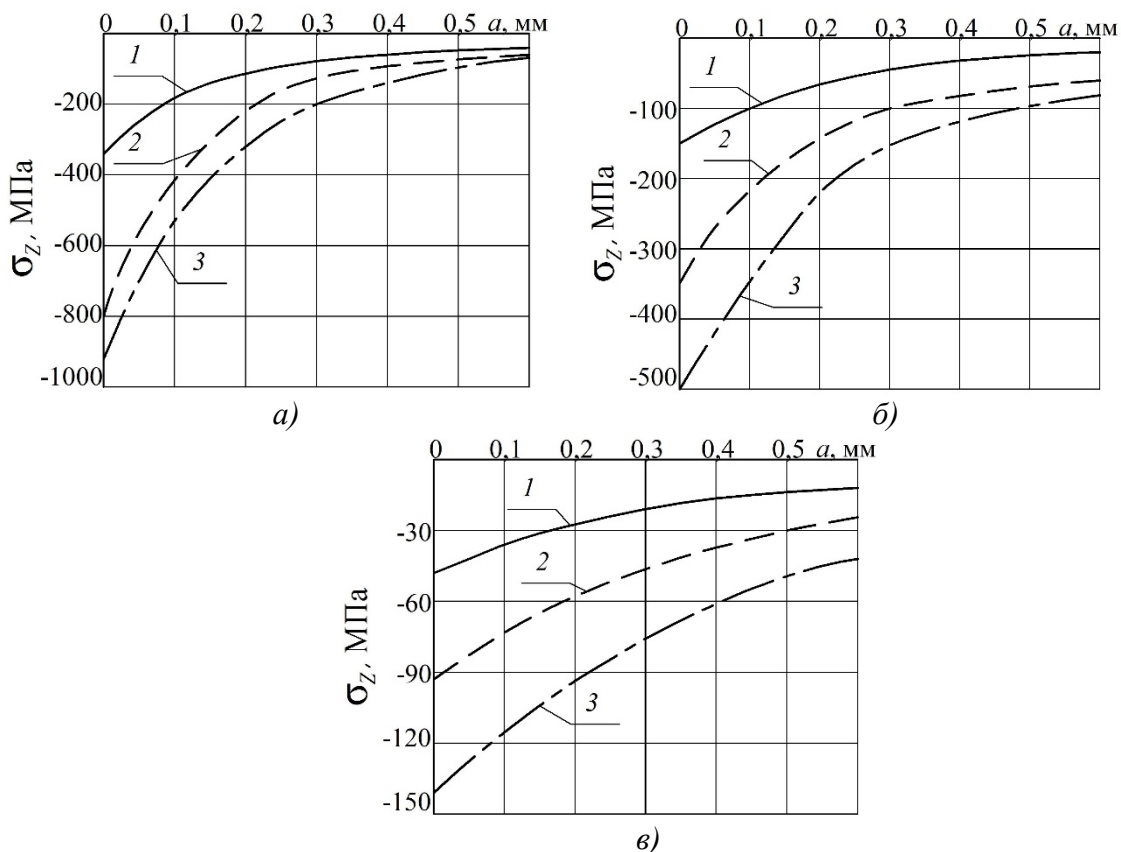


Рис. 3. Осевые остаточные напряжения σ_z в упрочнённых образцах диаметром 25 мм с надрезами $R = 0,3$ мм (а), $R = 0,5$ мм (б) и $R = 1,0$ мм (в) после: 1 – ПДО; 2 – ОР1; 3 – ОР2

Обращает на себя внимание значительная величина сжимающих остаточных напряжений после обкатки роликом (ОР1), достигающих -908 МПа на дне надреза радиуса $R = 0,3$ мм, что существенно выше не только предела текучести, но и предела прочности исследуемой стали 20. В работе [11] было показано, что остаточные напряжения в упрочнённом (наклёпанном) слое могут превышать сопротивление разрыву S_k материала детали (образца) на 15%. В данном случае этот предел не превышен, так как $S_k = 1416$ МПа.

Испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла неупрочнённых и упрочнённых образцов с надрезами и напрессованной втулкой проводились на машине УММ-01 [12]; база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Результаты определения предела

выносливости σ_{-1} образцов представлены в табл. 1. Упрочнённые образцы, выстоявшие базу испытаний при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при бóльших напряжениях. На изломах этих образцов были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, критическая глубина $t_{кр}$ которых соответствует зависимости (5) и приведена в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний образцов с надрезами и напрессованной втулкой на усталость и определения остаточных напряжений

Концентра- тор	Неупроч. образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы						
		обработка	σ_{-1} , МПа	σ_z^{nos} , МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
надрез $R = 0,3$ мм	107,5	ПДО	137,5	-343	0,087	0,540	-87	0,345
		ОР1	165	-787	0,073	0,510	-171	0,336
		ОР2	175	-908	0,074	0,520	-202	0,334
надрез $R = 0,5$ мм	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
надрез $R = 1,0$ мм	112,5	ПДО	120	-46	0,163	0,490	-21	0,357
		ОР1	130	-92	0,190	0,510	-46	0,380
		ОР2	142,5	-145	0,207	0,495	-79	0,380
напрес. втулка	100	ОР1	150	-220	0,227	0,535	-148	0,338
		ОР2	170	-210	0,333	0,540	-201	0,348

Из представленных в табл. 1 данных видно, что пневмодробеструйная обработка и обкатка роликом образцов с надрезом и напрессованной втулкой приводят к существенному повышению предела выносливости, причём с увеличением усилия обкатки с $P = 0,5$ кН до $P = 1,0$ кН предел выносливости возрастает. Приращение предела выносливости образцов с надрезом после обкатки роликом выше, чем после пневмодробеструйной обработки. Наблюдаемое явление объясняется бóльшей глубиной залегания сжимающих остаточных напряжений в гладких упрочнённых образцах при ОР, чем при ПДО (рис. 2), результатом чего явилось повышение остаточных напряжений в опасном сечении образцов с надрезами. Для сохранения эффекта упрочнения при опережающем поверхностном пластическом деформировании с увеличением радиуса надреза необходимо увеличивать толщину слоя со сжимающими остаточными напряжениями гладкой детали (заготовки).

Критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ вычислялся по формуле (3) по толщине опасного сечения образцов, равной критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости. При этом для образцов с надрезами

использовались эпюры остаточных напряжений, приведённые на рис. 3, а для образцов с напессованной втулкой – на рис. 2. Значения критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ представлены в табл. 1.

Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов по первому критерию $\sigma_z^{нов}$ – остаточным напряжениям на поверхности концентратора – приводит к значительному рассеянию соответствующего коэффициента ψ_σ . Этот коэффициент в проведённом исследовании изменяется в широких пределах: от 0,073 до 0,333 (табл. 1), то есть изменяется в 4,5 раза, что неприемлемо для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей.

Оценка влияния поверхностного упрочнения по второму критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ – среднеинтегральным остаточным напряжениям – приводит к существенно меньшему рассеянию соответствующего коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$. Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ в проведённом исследовании изменяется от 0,334 до 0,380, составляя в среднем 0,350.

Таким образом, проведённое исследование показало, что для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых образцов (деталей) с концентраторами напряжений из стали 20 наиболее оправдано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$. Для определения приращения предела выносливости при изгибе таких образцов (деталей) следует воспользоваться формулой (4). Критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ при этом вычисляется по зависимости (3) по толщине поверхностного слоя, равной критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости и определяемой формулой (5).

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. Кравченко, Б.А. Обработка и выносливость высокопрочных материалов [Текст]/ Б.А. Кравченко, К.Ф. Митряев. – Куйбышев: Куйбышев. книж. изд-во, 1968. – 131 с.
3. 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.
4. Туровский, М.Л. Концентрация напряжений в поверхностном слое цементированной стали [Текст]/ М.Л. Туровский, Н.М. Шифрин // Вестник машиностроения. – 1970. – №11. – С. 37-40.

5. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений на выносливость ненаклёпанного материала [Текст]/ С.И. Иванов, В.Ф. Павлов // Вопросы прикладной механики в авиационной технике. – Куйбышев: КуАИ, 1973. – Вып. 66. – С. 70-73.
6. Школьник, Л.М. Повышение прочности шестерён дробеструйным наклёпом [Текст]/ Л.М. Школьник, В.П. Девяткин // Вестник машиностроения. – 1950. – №12. – С. 7-12.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок [Текст]/ С.И. Иванов // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып. 48. – С. 179-183.
11. Радченко, В.П. Наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений при поверхностном упрочнении деталей [Текст]/ В.П. Радченко, В.Ф. Павлов // Труды МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций». – Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2011. – С. 354-357.
12. Филатов, Э.Я. Универсальный комплекс машин для испытания материалов и конструкций на усталость [Текст]/ Э.Я. Филатов, В.Э. Павловский. – Киев: Наукова Думка, 1985. – 92 с.