

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ДЕТАЛИ В УСЛОВИЯХ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

¹Вакулюк В.С., ¹Кирпичёв В.А., ¹Павлов В.Ф., ¹Сазанов В.П.

¹ ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет
им. академика С.П. Королёва», г. Самара

Для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей с концентраторами по остаточным напряжениям используются два критерия. Первым критерием [1,2] являются осевые остаточные напряжения $\sigma_z^{\text{пов}}$ на поверхности концентратора. Зависимость для определения приращения предела выносливости при изгибе в случае симметричного цикла $\Delta\sigma_{-1}$ упрочнённых деталей в этом случае имеет вид

$$\Delta\sigma_{-1} = \psi_{\sigma} \cdot |\sigma_z^{\text{пов}}|, \quad (1)$$

где ψ_{σ} – коэффициент влияния упрочнения по критерию $\sigma_z^{\text{пов}}$ на предел выносливости по разрушению.

Для определения второго критерия в работе [3] использовалось решение задачи [4] о дополнительных остаточных напряжениях в наименьшем сечении детали после нанесения на упрочнённую поверхность надреза полуэллиптического профиля. Выделив основную часть решения [4], был получен второй критерий $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ влияния упрочнения на предел выносливости детали в виде

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

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

Критерий $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$, который называется критерием среднеинтегральных остаточных напряжений [3], имеет чётко выраженный физический смысл – это остаточное напряжение на дне нераспространяющейся трещины усталости с точностью до постоянного коэффициента, зависящего от радиуса у дна трещины и её глубины. Приращение предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ при изгибе в случае симметричного цикла с использованием критерия $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ определяется по следующей формуле:

$$(\Delta\sigma_{-1}) = \bar{\psi}_{\sigma} |\bar{\sigma}_{\text{ост}}|, \quad (3)$$

где $\bar{\psi}_{\sigma}$ – коэффициент влияния упрочнения по критерию $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ на предел выносливости по разрушению.

В исследовании изучалось влияние концентраторов напряжений в виде надрезов различного радиуса при поверхностном пластическом деформировании образцов из стали 20 ($\sigma_{\text{в}} = 522$ МПа, $\sigma_{\text{т}} = 395$ МПа, $\delta = 26,1\%$, $\psi = 65,9\%$,

$S_k = 1416$ МПа) на предел выносливости при изгибе. Гладкие образцы диаметром 25 мм подвергались пневмодробеструйной обработке (ПДО) дробью диаметром 1,5-2 мм при давлении воздуха 0,25 МПа в течение 10 минут, а также обкатке роликом (ОР) диаметром 60 мм и профильным радиусом 1,6 мм при усилии $P = 0,5$ кН и $P = 1,0$ кН 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 трёх радиусов: $R = 0,3$ мм, $R = 0,5$ мм и $R = 1,0$ мм.

Остаточные напряжения в гладких образцах определялись экспериментально методом колец и полосок [5]. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a гладких образцов приведено на рис. 1. В гладких образцах после ПДО толщина поверхностного слоя со сжимающими остаточными напряжениями составила 0,32 мм, после ОР при $P = 0,5$ кН – 0,52 мм, при $P = 1,0$ кН – 0,70 мм.

Из данных рис. 1 следует, что после нанесения на упрочнённые ПДО образцы надрезов с радиусами $R = 0,3$ мм и $R = 0,5$ мм материал на дне концентраторов находился в ненаклёпанном состоянии. Такое же состояние наблюдалось после нанесения на упрочнённые обкаткой роликом образцы при $P = 0,5$ кН надрезов с радиусом $R = 0,5$ мм. Для образцов с надрезами $R = 1,0$ мм во всех случаях упрочнения материал на дне концентраторов находился в ненаклёпанном состоянии. В остальных случаях обкатки роликом материал на дне надрезов находился в наклёпанном состоянии ($P = 0,5$ кН – $R = 0,3$ мм; $P = 1,0$ кН – $R = 0,3$ мм и $R = 0,5$ мм).

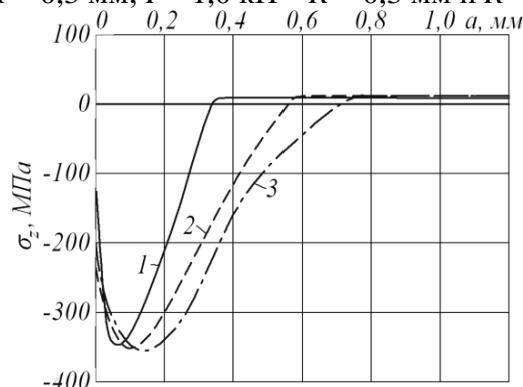


Рис. 1. Осевые σ_z остаточные напряжения в упрочнённых гладких образцах после: 1 – ПДО; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН

Остаточные напряжения в упрочнённых образцах с надрезами определялись аналитическим методом – суммированием дополнительных остаточных напряжений за счёт перераспределения остаточных усилий при нанесении надреза и остаточных напряжений гладких образцов [4], а также численным методом с использованием программного комплекса Nastran/Patran. Следует отметить, что остаточные напряжения в образцах с надрезом, определённые аналитическим и численным методами, имели хорошее совпадение. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a наименьшего сечения образцов приведено на рис. 2, 3.

Анализируя данные рис. 1–3, можно видеть, что при практически одинаковых максимальных остаточных напряжениях гладких образцов, в образцах с надрезом одного радиуса остаточные напряжения тем выше, чем больше толщина поверхностного слоя гладких образцов со сжимающими остаточными напряжениями. Эта закономерность объясняется концентрацией остаточных напряжений в области дна надреза в результате его нанесения на предварительно упрочнённую поверхность.

Необходимо обратить внимание на величину наибольших сжимающих остаточных напряжений на дне надреза, достигающих при $R = 0,3$ мм – 908 МПа (ОР,

$P = 1,0$ кН), которая превышает не только предел текучести, но и предел прочности материала образцов. Наблюдаемому явлению дано объяснение в работе [6], в которой показано, что наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений в упрочнённом поверхностном слое при плоском напряжённом состоянии может превышать даже сопротивление разрыву S_k материала детали на 15%. Этот предел в исследуемом случае ($S_k = 1416$ МПа) не достигнут.

Испытания на усталость при поперечном изгибе в случае симметричного цикла образцов с надрезами проводились на машине УММ-01 [7], база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости σ_{-1} представлены в таблице. Выстоявшие базу испытаний упрочнённые образцы при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при большем напряжении.

Во всех упрочнённых образцах были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, средняя глубина $t_{кр}$ которых для каждой партии образцов представлена в таблице.

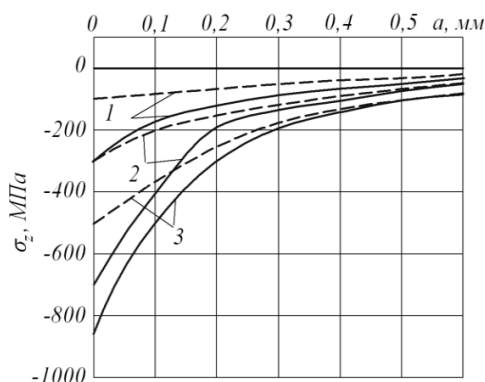


Рис. 2. Осевые σ_z остаточные напряжения в упрочнённых образцах с надрезами (— $R = 0,3$ мм; - - - $R = 0,5$ мм) после: 1 – ПДО; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН

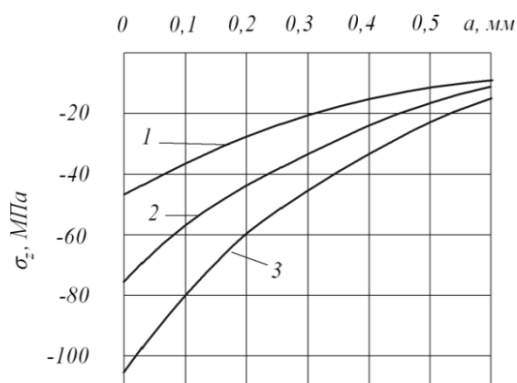


Рис. 3. Осевые σ_z остаточные напряжения в упрочнённых образцах с надрезами $R = 1,0$ мм после: 1 – ПДО; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН

Следует отметить, что значения $t_{кр}$ хорошо согласуются с установленной ранее [8,9] зависимостью

$$t_{кр} = 0,0216 \cdot D, \quad (4)$$

где D – диаметр опасного сечения упрочнённого образца (детали) с концентратором напряжений.

Из данных таблицы видно, что с увеличением радиуса надреза приращение предела выносливости образцов за счёт упрочнения снижается, так как уменьшаются сжимающие остаточные напряжения в опасном сечении. Поэтому для сохранения эффекта упрочнения при опережающем поверхностном пластическом деформировании

с увеличением радиуса надреза необходимо увеличивать толщину слоя гладкой детали со сжимающими остаточными напряжениями.

Таблица 1 – Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

Концентратор R , мм	K_σ	Неупроч. образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы						
			обработка	σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{пов}$, МПа	Ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\Psi}_\sigma$
надрез 0,3	2,7	107,5	ПДО	137,5	-343	0,087	0,540	-87	0,345
			ОР, $P = 0,5$ кН	165	-787	0,073	0,510	-171	0,336
			ОР, $P = 1,0$ кН	175	-908	0,074	0,520	-202	0,334
надрез 0,5	2,6	112,5	ПДО	130	-142	0,123	0,525	-52	0,337
			ОР, $P = 0,5$ кН	150	-349	0,107	0,530	-111	0,338
			ОР, $P = 1,0$ кН	172,5	-515	0,117	0,520	-169	0,355
надрез 1,0	2,2	112,5	ПДО	120	-46	0,163	0,490	-21	0,357
			ОР, $P = 0,5$ кН	130	-92	0,190	0,510	-46	0,380
			ОР, $P = 1,0$ кН	142,5	-145	0,207	0,495	-79	0,380

Результаты испытаний на усталость указывают на то, что распределение сжимающих остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых деталях должно быть наиболее полным по толщине поверхностного слоя, равной критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости.

Значения остаточных напряжений на поверхности концентраторов $\sigma_z^{пов}$ и среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ приведены в таблице. По результатам испытаний на усталость неупрочнённых и упрочнённых образцов по формулам (1) и (3) вычислялись коэффициенты Ψ_σ и $\bar{\Psi}_\sigma$, значения которых представлены в таблице. Из данных таблицы можно видеть, что оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов по первому критерию – остаточным напряжениям на поверхности концентратора $\sigma_z^{пов}$ – приводит к значительному рассеянию коэффициента Ψ_σ . Этот коэффициент в настоящем исследовании изменяется в широких пределах – от 0,073 до 0,207, то есть почти в три раза, что неприемлемо для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей.

Оценка влияния поверхностного упрочнения по второму критерию – среднеинтегральным остаточным напряжениям $\bar{\sigma}_{ост}$ – приводит к существенно меньшему рассеянию соответствующего коэффициента $\bar{\Psi}_\sigma$. Это объясняется тем, что критерий среднеинтегральных остаточных напряжений учитывает влияние на сопротивление усталости не только величины сжимающих остаточных напряжений, но и характера их распределения по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали (образца). Коэффициент $\bar{\Psi}_\sigma$ в проведённом исследовании изменяется от 0,334 до 0,380 и практически совпадает со значением $\bar{\Psi}_\sigma$, вычисленным по следующей формуле, полученной на основании обработки большого количества экспериментальных данных [10]:

$$\bar{\Psi}_\sigma = 0,514 - 0,065 K_\sigma, \quad (5)$$

где K_σ – эффективный коэффициент концентрации напряжений, значения которого определялись по справочным данным [11, 12] и представлены в таблице.

Таким образом, коэффициент $\bar{\Psi}_{\sigma}$, вычисленный с учётом степени концентрации напряжений по формуле (5), представляется возможным использовать для прогнозирования приращения предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами напряжений по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$.

Необходимо отметить, что на значения коэффициентов Ψ_{σ} и $\bar{\Psi}_{\sigma}$ не оказывает влияние состояние материала на поверхности концентраторов. Из данных таблицы видно, что не наблюдается определённой зависимости между величинами коэффициентов Ψ_{σ} и $\bar{\Psi}_{\sigma}$ и наклёпанным или ненаклёпанным состоянием материала образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов С.И. Влияние остаточных напряжений и наклёпа на усталостную прочность / 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 / С.В. Серенсен, С.П. Борисов, Н.А. Бородин // Проблемы прочности. – 1969. – № 2. – С. 3-7.
3. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – № 8. – С. 29-32.
4. Иванов С.И. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом / С.И. Иванов, М.П. Шатунов, В.Ф. Павлов // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ. – 1974. – Вып. 1. – С. 88-95.
5. Иванов С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок / С.И. Иванов // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ – 1971. – Вып. 53. – С. 32-42.
6. Радченко В.П. Наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений при поверхностном упрочнении деталей / В.П. Радченко, В.Ф. Павлов // Прочность материалов и элементов конструкций: тр. МНТК. – Киев: ИПП им. Г. С. Писаренко, НАНУ. – 2011. – С. 354-357.
7. Филатов Э.Я. Универсальный комплекс машин для испытания материалов и конструкций на усталость. / Э.Я. Филатов, В.Э. Павловский – Киев: Наукова Думка, 1985. – 92 с.
8. 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. 22-25.
9. Павлов В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
10. Кирпичёв В.А. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений / В.А. Кирпичёв, А.С. Букатый, А.П. Филатов, А.В. Чирков // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т. 15. – №4(44). – С. 81-85.
11. Серенсен С.В. Несущая способность и расчёт деталей машин на прочность. / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович – М.: Машиностроение, 1975. –

- 488 с.
12. *Петерсон Р.Е. Коэффициенты концентрации напряжений. / Р.Е. Петерсон – М.: Мир, 1977. – 304 с.*