

В. С. Вакулук, В. А. Кирпичев, В. Ф. Павлов, В. П. Сазанов

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННЫХ ОБРАЗЦОВ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ

Изучено влияние глубины надреза и степени концентрации напряжений на предел выносливости поверхностно упрочненных образцов из стали 20 в зависимости от характера распределения остаточных напряжений поверхностного слоя. Установлено, что для прогнозирования приращения предела выносливости за счет поверхностного упрочнения наиболее оправдано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений. *Поверхностное упрочнение; глубина надреза; степень концентрации напряжений; остаточные напряжения; прогнозирование предела выносливости; среднеинтегральные остаточные напряжения*

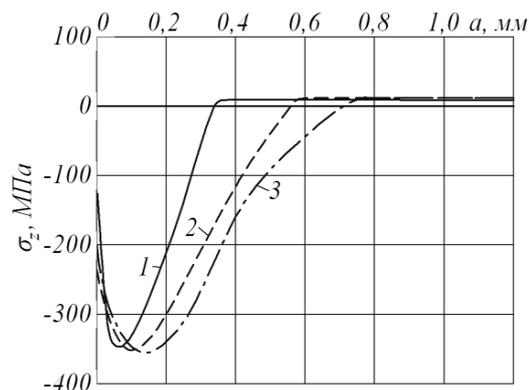
В исследовании изучалось влияние таких концентраторов напряжений как напрессованная втулка и надрезов различного радиуса при поверхностном пластическом деформировании образцов из стали 20 ( $\sigma_b = 522$  МПа,  $\sigma_T = 395$  МПа,  $\delta = 26,1\%$ ,  $\psi = 65,9\%$ ,  $S_k = 1416$  МПа) на предел 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 часть упрочненных и неупрочненных гладких образцов диаметром 25 мм наносились круговые надрезы полукруглого профиля трех радиусов:  $R = 0,3$  мм,  $R = 0,5$  мм и  $R = 1,0$  мм. Оставшаяся часть упрочненных и неупрочненных гладких образцов использовалась для испытаний на усталость с напрессованной втулкой.

Остаточные напряжения в гладких образцах определялись экспериментально методом колец и полосок [1]. Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя  $a$  гладких образцов приведено на рис. 1. В гладких образцах после ПДО толщина поверхностного слоя с 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 упрочненные ПДО образцы надрезов с радиусами  $R = 0,3$  мм и  $R = 0,5$  мм материал на дне концентраторов находился в ненаклепан-

ном состоянии. Такое же состояние наблюдалось после нанесения на упрочненные 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 ненаклепанном состоянии.

В остальных случаях обкатки роликом материал на дне надрезов находился в наклепанном состоянии ( $P = 0,5$  кН –  $R = 0,3$  мм;  $P = 1,0$  кН –  $R = 0,3$  мм и  $R = 0,5$  мм). В случае напрессованной втулки для двух вариантов упрочнения образцов роликом материал в опасном сечении находился в наклепанном состоянии.



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

Остаточные напряжения в упрочненных образцах с надрезами определялись аналитическим методом – суммированием дополнительных остаточных напряжений за счет перераспределения остаточных усилий при нанесении надреза и остаточных напряжений гладких об-

разцов [2], а также численным методом с использованием программного комплекса Nastran\ Patran. Следует отметить, что остаточные напряжения в образцах с надрезом, определенные аналитическим и численным методами, имели хорошее совпадение. Распределение осевых  $\sigma_z$  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 с сжимающими остаточными напряжениями. Эта закономерность объясняется концентрацией остаточных напряжений в области дна надреза в результате его нанесения на предварительно упрочненную поверхность.

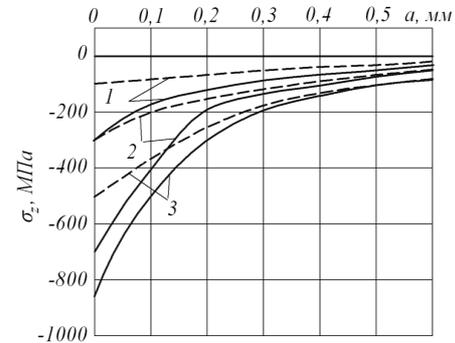
Необходимо обратить внимание на величину наибольших сжимающих остаточных напряжений на дне надреза, достигающих при  $R = 0,3$  мм – 908 МПа (ОР,  $P = 1,0$  кН), которая превышает не только предел текучести, но и предел прочности материала образцов. Наблюдаемому явлению дано объяснение в работе [3], в которой показано, что наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений в упрочненном поверхностном слое при плоском напряженном 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 и напрессованной втулкой проводились на машине УММ-01 [4], база испытаний –  $3 \cdot 10^6$  циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости  $\sigma_{-1}$  представлены в таблице. Выстоявшие базу испытаний упрочненные образцы при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при большем напряжении.

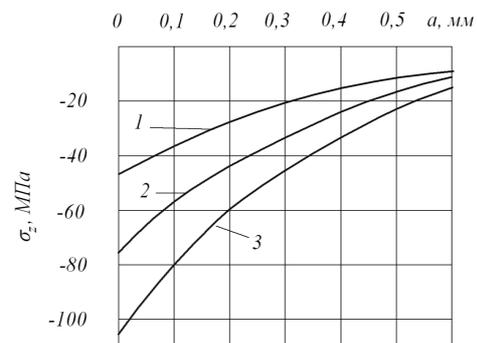
Во всех упрочненных образцах были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, средняя глубина  $t_{кр}$  которых для каждой партии образцов представлена в таблице.

На рис. 4, 5 приведены фотографии изломов упрочненных образцов, на которых видны нераспространяющиеся трещины усталости 2 (рис. 4) и 1 (рис. 5), имеющие серповидную форму. Серповидная форма трещины обусловлена тем, что изгиб образцов при испытаниях на

усталость осуществлялся в одной плоскости. За критическую  $t_{кр}$  принималась глубина трещины в наиболее удаленной от нейтральной оси точке опасного сечения образца.



**Рис. 2.** Осевые  $\sigma_z$  остаточные напряжения в упрочненных образцах с надрезами ( $\text{—}$  –  $R = 0,3$  мм;  $\text{- - -}$  –  $R = 0,5$  мм) после: 1 – ПДО; 2 – ОР,  $P = 0,5$  кН; 3 – ОР,  $P = 1,0$  кН



**Рис. 3.** Осевые  $\sigma_z$  остаточные напряжения в упрочненных 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 [5, 6] зависимостью

$$t_{кр} = 0,0216 \cdot D, \quad (1)$$

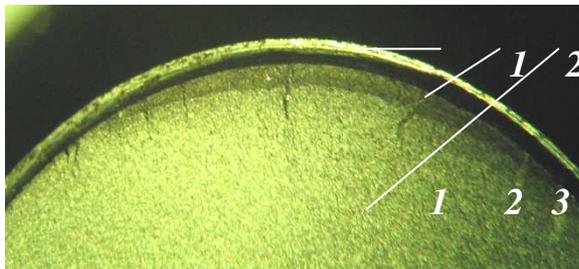
где  $D$  – диаметр опасного сечения упрочненного образца (детали) с концентратором напряжений.

Из данных таблицы видно, что с увеличением радиуса надреза приращение предела выносливости образцов за счет упрочнения снижается, так как уменьшаются сжимающие остаточные напряжения в их опасном сечении.

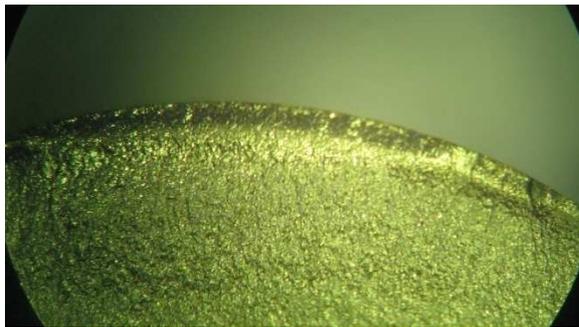
Поэтому для сохранения эффекта упрочнения при опережающем поверхностном пластическом деформировании с увеличением радиуса надреза необходимо увеличивать толщину слоя гладкой детали с сжимающими остаточными напряжениями.

**Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений**

Концентра- тор <i>R</i> , мм	$K_\sigma$	Неупроч. образцы $\sigma_{-1}$ , МПа	Упрочненные образцы						
			обработка	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\sigma_z^{нов}$ , МПа	$\Psi_\sigma$	$t_{кр}$ , 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
напрес. втулка	2,33	100	ОР, $P = 0,5$ кН	150	-220	0,227	0,535	-148	0,338
			ОР, $P = 1,0$ кН	170	-210	0,235	0,540	-201	0,348



**Рис. 4.** Излом упрочненного ПДО образца диаметром 25 мм с надрезом  $R = 0,5$  мм: 1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома



**Рис. 5.** Излом упрочненного ОР ( $P = 1,0$  кН) образца диаметром 25 мм с напрессованной втулкой: 1 – нераспространяющаяся трещина, 2 – зона долома

При практически одинаковых наибольших остаточных напряжениях и остаточных напряжений на поверхности гладких обкатанных роликом образцов большая глубина залегания сжимающих остаточных напряжений при  $P = 1,0$  кН, чем при  $P = 0,5$  кН, приводит к большему увеличению предела выносливости образцов с напрессованной втулкой. Результаты

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

Для оценки приращения предела выносливости  $\Delta\sigma_{-1}$  за счет поверхностного упрочнения использовались два критерия влияния остаточных напряжений на предел выносливости при изгибе в случае симметричного цикла. Первым критерием [7, 8] являются осевые остаточные напряжения  $\sigma_z^{нов}$  на поверхности концентратора. Зависимость для определения приращения предела выносливости  $\Delta\sigma_{-1}$  упрочненных образцов (деталей) в этом случае имеет вид

$$\Delta\sigma_{-1} = \Psi_\sigma \cdot |\sigma_z^{нов}|, \tag{2}$$

где  $\Psi_\sigma$  – коэффициент влияния упрочнения по критерию  $\sigma_z^{нов}$  на предел выносливости по разрушению.

Для определения второго критерия в работе [9] использовалось решение задачи [2] о дополнительных остаточных напряжениях в наименьшем сечении образца (детали) после нанесения на упрочненную поверхность надреза полуэллиптического профиля. Выделив основную часть решения [2], был получен второй критерий  $\bar{\sigma}_{ост}$  влияния упрочнения на предел выносливости образца (детали) в виде

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

где  $\sigma_z(\xi)$  – осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении образца (детали),  $\xi =$

$= a/t_{кр}$  – расстояние от дна концентратора до текущего слоя, выраженное в долях  $t_{кр}$ ,  $t_{кр}$  – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе образца (детали) на пределе выносливости.

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

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_{\sigma} \cdot |\bar{\sigma}_{ост}|, \quad (4)$$

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

Значения остаточных напряжений на поверхности концентраторов  $\sigma_z^{пов}$  и среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  приведены в таблице. По результатам испытаний на усталость неупрочненных и упрочненных образцов по формулам (2) и (4) вычислялись коэффициенты  $\psi_{\sigma}$  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  $\psi_{\sigma}$ . Этот коэффициент в настоящем исследовании изменяется в широких пределах – от 0,073 до 0,235, то есть более чем в три раза, что неприемлемо для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочненных 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 проведенном исследовании

изменяется от 0,334 до 0,380 и практически совпадает с значениями  $\bar{\psi}_{\sigma}$ , вычисленными по следующей формуле, полученной на основании обработки большого количества экспериментальных данных [10]:

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

где  $K_{\sigma}$  – эффективный коэффициент концентрации напряжений, значения которого определялись по справочным данным [11, 12] и представлены в таблице.

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

Необходимо отметить, что на значения коэффициентов  $\psi_{\sigma}$  и  $\bar{\psi}_{\sigma}$  не оказывает влияние состояние материала на поверхности концентраторов. Из данных таблицы видно, что не наблюдается определенной зависимости между величинами коэффициентов  $\psi_{\sigma}$ ,  $\bar{\psi}_{\sigma}$  и наклепанным или ненаклепанным состоянием материала образцов.

## ВЫВОДЫ

На предел выносливости поверхностно упрочненных образцов и деталей значительное влияние оказывает не только величина, но и характер распределения сжимающих остаточных напряжений в опасном сечении по толщине поверхностного слоя, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости.

Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочненных образцов и деталей из стали 20 с надрезами и напрессованной втулкой по критерию остаточных напряжений на поверхности опасного сечения не представляется возможным, так как соответствующий коэффициент  $\psi_{\sigma}$  изменяется более чем в три раза.

Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочненных образцов и деталей из стали 20 с надрезами и напрессованной втулкой по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений с учетом степени концентрации напряжений дает приемлемые для практики результаты, так как соответствующий коэффициент  $\bar{\psi}_{\sigma}$  изменяется в значительно меньших пределах.

Значения коэффициентов  $\psi_{\sigma}$  и  $\bar{\psi}_{\sigma}$  не зависят от того, в каком состоянии находится материал на поверхности опасного сечения образцов и деталей – наклепанном или ненаклепанном.

С увеличением радиуса надреза при опережающем поверхностном пластическом деформировании необходимо увеличивать толщину поверхностного слоя с сжимающими остаточными напряжениями в опасном сечении образцов и деталей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иванов С. И.** К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения. Куйбышев: КуАИ, 1971. Вып. 53. С. 32–42.

2. **Иванов С. И., Шатунов М. П., Павлов В. Ф.** Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. Куйбышев: КуАИ, 1974. Вып. 1. С. 88–95.

3. **Радченко В. П., Павлов В. Ф.** Наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений при поверхностном упрочнении деталей // Прочность материалов и элементов конструкций: тр. МНТК. Киев: ИПП им. Г. С. Писаренко НАНУ, 2011. С. 354–357.

4. **Филатов Э. Я., Павловский В. Э.** Универсальный комплекс машин для испытания материалов и конструкций на усталость. Киев: Наукова Думка, 1985. 92 с.

5. **Павлов В. Ф.** Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение I. Сплошные детали // Известия вузов. Машиностроение. 1988. № 8. С. 22–25.

6. **Павлов В. Ф., Кирпичев В. А., Иванов В. Б.** Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочненных деталей с концентраторами напряжений. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. 64 с.

7. **Иванов С. И., Павлов В. Ф.** Влияние остаточных напряжений и наклепа на усталостную прочность // Проблемы прочности. 1976. № 5. С. 25–27.

8. **Серенсен С. В., Борисов С. П., Бородин Н. А.** К вопросу об оценке сопротивления усталости поверхностно упрочненных образцов с учетом кинетики остаточной напряженности // Проблемы прочности. 1969. № 2. С. 3–7.

9. **Павлов В. Ф.** О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. 1986. № 8. С. 29–32.

10. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочненных деталей при различной степени концентрации напряжений / В. А. Кирпичев [и др.] // Прочность материалов и элементов конструкций: тр. МНТК. Киев: ИПП им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2011. С. 678–685.

11. **Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М.** Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. М.: Машиностроение, 1975. 488 с.

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

#### ОБ АВТОРАХ

**Вакулюк Владимир Степанович**, доц. каф. сопротивления материалов Самарск. гос. аэрокосмическ. ун-та им. акад. С. П. Королева. Канд. техн. наук. Иссл. в обл. механики деформируемых тел и конструкций.

**Кирпичев Виктор Алексеевич**, проф. той же каф. Д-р техн. наук. Иссл. в обл. механики деформируемых тел и конструкций.

**Павлов Валентин Федорович**, проф., зав. той же каф. Д-р техн. наук. Иссл. в обл. механики деформируемых тел и конструкций.

**Сазанов Вячеслав Петрович**, доц. той же каф. Канд. техн. наук. Иссл. в обл. механики деформируемых тел и конструкций.