

## ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫ НАДРЕЗА НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Основную роль в увеличении характеристик сопротивления усталости деталей с концентраторами напряжений после поверхностного пластического деформирования (ППД) играют остаточные напряжения сжатия [1]. Для оценки влияния ППД на предел выносливости деталей применяются два критерия. Первым критерием, использованным в работах [1-3], являются сжимающие остаточные напряжения на поверхности опасного сечения детали. Формула для определения предела выносливости при изгибе в случае симметричного цикла  $\sigma_{-1}$  упрочнённой детали в этом случае имеет следующий вид:

$$\sigma_{-1} = \sigma_{-1}^0 - \psi_{\sigma} |\sigma_z^{nos}|, \quad (1)$$

где  $\sigma_{-1}^0$  – предел выносливости неупрочнённой детали,  $\psi_{\sigma}$  – коэффициент влияния ППД на предел выносливости по критерию  $\sigma_z^{nos}$ ,  $\sigma_z^{nos}$  – осевые (меридиональные) остаточные напряжения на поверхности опасного сечения упрочнённой детали.

При использовании ППД часто наблюдается подповерхностный максимум сжимающих остаточных напряжений, то есть к поверхности упрочнённых деталей остаточные напряжения уменьшаются. Этот спад бывает весьма существенным, в некоторых случаях остаточные напряжения снижаются к поверхности до нуля и даже становятся растягивающими [4], но увеличение предела выносливости наблюдается и в этих случаях.

Эти данные указывают на то, что критерий оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей по остаточным напряжениям должен учитывать влияние остаточных напряжений не только на поверхности, но и по глубине поверхностного слоя опасного сечения деталей.

При определении второго критерия в работе [5] использовалось аналитическое решение задачи [6] по определению дополнительных остаточных напряжений в наименьшем сечении упрочнённой детали после нанесения на неё надреза полуэллиптического профиля. Определив основную часть решения [6], был предложен второй критерий  $\bar{\sigma}_{ocm}$  – критерий среднеинтегральных остаточных напряжений влияния упрочнения на предел выносливости детали в следующем виде:

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

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  $t_{кр}$ ,  $t_{кр}$  – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при испытании упрочнённой детали (образца) на пределе выносливости.

Предел выносливости упрочнённой детали  $\sigma_{-1}$  при использовании критерия  $\bar{\sigma}_{ост}$  определяется по следующей формуле:

$$\sigma_{-1} = \sigma_{-1}^0 - \bar{\psi}_\sigma \cdot |\bar{\sigma}_{ост}|, \quad (3)$$

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

Для оценки возможности использования обоих критериев при прогнозировании влияния ППД на предел выносливости при изгибе в случае симметричного цикла были проведены опыты на сплошных цилиндрических неупрочнённых и упрочнённых образцах из стали 20 диаметром 25 мм с круговыми надрезами полукруглого профиля различной глубины. Используемая сталь 20 имела следующие механические характеристики:  $\sigma_T = 395$  МПа,  $\sigma_s = 522$  МПа,  $\delta = 26,1$  %,  $\psi = 65,9$  %,  $S_k = 1416$  МПа.

Гладкие образцы диаметром 25 мм упрочнялись пневмодробеструйной обработкой (ПДО) стальными шариками диаметром 1,5-2,5 мм в течение 10 минут, а также обкаткой 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. Далее на неупрочнённые и упрочнённые 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 измерялись методом колец и полосок. Толщина поверхностного слоя со сжимающими остаточными напряжениями при ОР больше, чем при ПДО, причём с увеличением усилия обкатки глубина слоя со сжимающими остаточными напряжениями увеличивается.

Остаточные напряжения в образцах с надрезами определялись расчётным путём – к дополнительным остаточным напряжениям от перераспределения остаточных усилий после опережающего поверхностного упрочнения добавлялись остаточные напряжения гладких образцов. Причём дополнительные остаточные напряжения определялись как аналитическим [6], так и численными методами. Необходимо отметить, что результаты вычисления дополнительных остаточных

напряжений двумя методами имели хорошее совпадение. Величины остаточных напряжений на поверхности дна надрезов  $\sigma_z^{нов}$  представлены в табл. 1.

Следует обратить внимание на значительную величину сжимающих остаточных напряжений после обкатки роликом (ОР2), достигающих -908 МПа на дне надреза радиусом  $R = 0,3$  мм, что существенно превышает не только предел текучести, но и предел прочности исследуемой стали 20. В работе [7] было установлено, что сжимающие остаточные напряжения в упрочнённом (наклёпанном) слое могут превышать сопротивление разрыву  $S_k$  материала детали (образца) на 15%. В исследуемом случае этот предел не превышен, так как  $S_k = 1416$  МПа.

Испытания на усталость неупрочнённых и упрочнённых образцов с надрезами при изгибе в случае симметричного цикла проводились на машине УММ-01; база испытаний –  $3 \cdot 10^6$  циклов нагружения. Значения предела выносливости образцов представлены в табл. 1. Упрочнённые ППД образцы, выстоявшие базу испытаний при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при бóльших напряжениях. На изломах этих образцов были видны нераспространяющиеся трещины усталости, критическая глубина  $t_{кр}$  которых приведена в табл. 1.

Таблица 1. Результаты испытаний образцов с надрезами на усталость и определения остаточных напряжений

Радиус надреза $R$	Неупроч. образцы $\sigma_{-1}^0$ , МПа	Упрочнённые образцы						
		обработка	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\sigma_z^{нов}$ , МПа	$\psi_\sigma$	$t_{кр}$ , мм	$\bar{\sigma}_{осм}$ , МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
$R = 0,3$ 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
$R = 0,5$ 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
$R = 1,0$ 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

Из приведённых в табл. 1 данных видно, что пневмодробеструйная обработка и обкатка роликом образцов с надрезами различной глубины приводят к существенному повышению предела выносливости, причём с увеличением усилия обкатки с  $P = 0,5$  кН до  $P = 1,0$  кН предел выносливости образцов возрастает. Приращение предела выносливости образцов с надрезами после ОР выше, чем после ПДО. Этот результат объясняется бóльшей глубиной залегания сжимающих остаточных напряжений в гладких упрочнённых образцах при ОР, чем при ПДО, результатом

чего явилось увеличение сжимающих остаточных напряжений в опасном сечении образцов с надрезами. С увеличением глубины надреза предел выносливости образцов при одной и той же упрочняющей обработке уменьшается, что объясняется уменьшением сжимающих остаточных напряжений в опасном сечении образцов (табл. 1).

Критерий среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  определялся по формуле (2) по толщине опасного сечения образцов, равной критической глубине  $t_{кр}$  нераспространяющейся трещины усталости. Величины критерия  $\bar{\sigma}_{ост}$  приведены в табл.1.

Оценка влияния ППД на предел выносливости образцов с надрезами различной глубины по первому критерию  $\sigma_z^{нов}$  – остаточным напряжениям на поверхности концентратора – приводит к существенному рассеянию соответствующего коэффициента  $\psi_\sigma$ , вычисленному по формуле (1). Этот коэффициент в данном исследовании изменяется в широких пределах: от 0,073 до 0,207 (табл. 1), то есть изменяется в 2,8 раза, что неприемлемо для оценки предела выносливости упрочнённых ППД деталей.

Оценка влияния ППД по второму критерию  $\bar{\sigma}_{ост}$  – среднеинтегральным остаточным напряжениям – приводит к значительно меньшему изменению соответствующего коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$ , вычисленному по формуле (3). Коэффициент  $\bar{\psi}_\sigma$  в данном исследовании изменяется от 0,334 до 0,380, то есть изменяется в 1,07 раза, составляя в среднем значение 0,350.

Таким образом, проведённое исследование показало, что для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей (образцов) из стали 20 с надрезами различной глубины наиболее оправдано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$ , причём с увеличением глубины надреза предел выносливости уменьшается.

### Библиографический список

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. Кравченко, Б.А. Обработка и выносливость высокопрочных материалов / 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 / С.В. Серенсен, С.П. Борисов, Н.А. Бородин // Проблемы прочности. – 1969. – №2. – С. 3-7.
4. Школьник, Л.М. Повышение прочности шестерён дробеструйным наклёпом / Л.М. Школьник, В.П. Девяткин // Вестник машиностроения. – 1950. – №12. – С. 7-12.

5. 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.

6. 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.

7. Радченко, В.П. Наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений при поверхностном упрочнении деталей / 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.

УДК 621.787:539.319

**Сургутанов Н.А., Сургутанова Ю.Н., Денискина Е.А., Чуриков Д.С.,  
Дерягин В.П.**

## **АНАЛИЗ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ВЕРШИНЕ ТРЕЩИНЫ В ДЕТАЛЯХ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ**

Известно, что разрушение образцов и элементов конструкций от действия многократных циклических нагрузок происходит при более низких напряжениях по сравнению с однократно статическим нагружением. Следовательно, прочность, жёсткость и ресурс конструкций определяется, прежде всего, сопротивлением усталости.

В современном авиамашиностроении одним из основных путей достижения высоких показателей по надёжности и ресурсу работы деталей является рациональное конструирование. Оптимизация конструкций приводит к наличию различных концентраторов напряжений, обычно являющихся местом локализации разрушений при циклическом нагружении. Основными методами, позволяющими значительно повысить сопротивление усталости в условиях концентрации напряжений, являются применяемые при изготовлении деталей способы упрочняющей технологии, в частности, широко используемое в современном машиностроении поверхностное пластическое деформирование (ППД) [1].

Работы последних лет в области механики остаточных напряжений позволили определить воздействие различных видов и режимов упрочняющей обработки на уровень остаточных напряжений. Однако влияние данных режимов на распространение и остановку усталостной трещины изучено недостаточно.

Для определения критической глубины трещины используется такая характеристика повреждённой нагруженной конструкции, как коэффициент интенсивности напряжений (КИН)  $K_I$  (индекс  $I$  обозначает тип разрушения – отрыв).