

Павлов В.Ф., Семёнова О.Ю., Колычев С.А., Киселёв П.Е., Скачкова Е.Ю.

## ВЛИЯНИЕ РАДИУСА НАДРЕЗА НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ОБРАЗЦОВ ПРИ ОПЕРЕЖАЮЩЕМ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Исследовалось влияние радиуса кругового надреза полукруглого профиля при опережающем поверхностном пластическом деформировании (ОППД) цилиндрических образцов из стали 20 ( $\sigma_e = 522$  МПа,  $\sigma_T = 395$  МПа,  $\delta = 26,1$  %,  $\psi = 65,9$ ,  $S_k = 1416$  МПа) диаметром 50 мм с отверстием диаметром 40 мм на предел выносливости при изгибе. Гладкие образцы подвергались обкатке роликом диаметром 60 мм и профильным радиусом 1,6 мм при усилии 0,5 кН (ОР1) и 1,0 кН (ОР2). На упрочнённые и неупрочнённые образцы фасонным резцом наносились круговые надрезы полукруглого профиля трёх радиусов:  
 $R = 0,3$  мм,  $R = 0,5$  мм,  $R = 1,0$  мм.

Остаточные напряжения в гладких образцах определялись экспериментально методом колец и полосок [1]. Остаточные напряжения в упрочнённых образцах с надрезами определялись как аналитическим методом – суммированием дополнительных остаточных напряжений за счёт нанесения надреза и остаточных напряжений гладких образцов [2], так и численным методом с использованием программного комплекса Nastran/Patran. На рис. 1 представлены эпюры осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений в образцах с надрезами по толщине поверхностного слоя  $a$  наименьшего сечения, а в таблице 1 – значения остаточных напряжений  $\sigma_z^{nov}$  на поверхности надреза. Из приведённых на рис. 1 и в таблице 1 данных видно, что с увеличением радиуса надреза сжимающие остаточные напряжения в опасном сечении образцов уменьшаются.

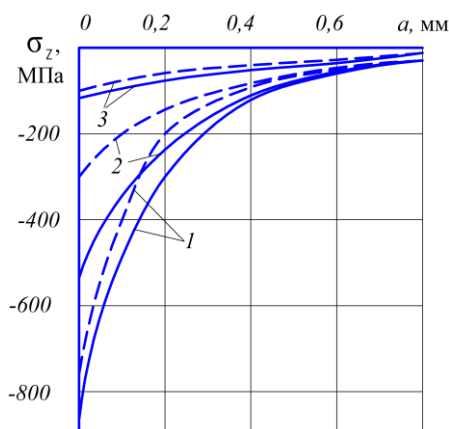


Рис. 1. Осевые остаточные напряжения после ОР1 (---) и ОР2 (—) в образцах с надрезами: 1 –  $R = 0,3$  мм; 2 –  $R = 0,5$  мм; 3 –  $R = 1,0$  мм

Следует обратить внимание на значительную величину сжимающих остаточных напряжений, достигающих на дне надреза при  $R = 0,3$  мм -861 МПа, что существенно выше не только предела текучести, но и предела прочности исследуемой стали 20. В работе [3] показано, что сжимающие остаточные напряжения в упрочнённом (наклёпанном) слое могут превышать сопротивление разрыву  $S_k$  материала детали (образца) на 15%. В рассматриваемом случае этот предел не превышен, так как  $S_k = 1416$  МПа.

Испытания упрочнённых и неупрочнённых образцов на усталость при поперечном изгибе в случае симметричного цикла проводились на машине УМП-02, база испытаний –  $3 \cdot 10^6$  циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости  $\sigma_{-1}$  представлены в таблице 1. Из данных таблицы 1 видно, что с увеличением радиуса надреза при одном и том же усилии обкатки приращение предела выносливости упрочнённых образцов уменьшается. Эта закономерность обусловлена снижением сжимающих остаточных напряжений в опасном сечении образцов с увеличением глубины надрезов после ОПД.

Выстоявшие базу испытаний упрочнённые образцы при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при бóльшем напряжении. На изломах этих образцов были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, средняя критическая глубина  $t_{кр}$ , которых для каждой партии образцов приведена в таблице 1. Следует отметить, что полученные в исследовании значения  $t_{кр}$  соответствуют установленной в работе [4] зависимости критической глубины нераспространяющейся трещины усталости от размеров опасного сечения детали.

Таблица 1 – Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

Надрез $R$ , мм	Неупрочн. образцы $\sigma_{-1}$ , МПа	Упрочнённые образцы						
		Упрочн. обр-ка	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\sigma_z^{нов}$ , МПа	$\psi_\sigma$	$t_{кр}$ , мм	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
0,3	55	ОР1	92,5	-747	0,050	0,73	-117	0,321
		ОР2	107,5	-861	0,061	0,73	-158	0,332
0,5	60	ОР1	87,5	-311	0,088	0,71	-82	0,335
		ОР2	105	-517	0,087	0,72	-133	0,338
1,0	57,5	ОР1	70	-87	0,144	0,69	-38	0,329
		ОР2	75	-114	0,154	0,68	-52	0,337

Оценка влияния упрочнения на предел выносливости образцов проводилась по остаточным напряжениям на поверхности надреза  $\sigma_z^{нов}$  и среднеинтегральным

остаточным напряжениям  $\bar{\sigma}_{ост}$  [5], вычисленным по толщине опасного сечения образцов, равной критической глубине  $t_{кр}$  нераспространяющейся трещины усталости. Из приведённых в таблице 1 данных видно, что коэффициент влияния упрочнения  $\psi_{\sigma}$  по критерию  $\sigma_z^{нов}$  изменяется в три раза и поэтому не может быть использован при прогнозировании предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей. Коэффициент влияния упрочнения  $\bar{\psi}_{\sigma}$  по критерию  $\bar{\sigma}_{ост}$  изменяется только в 1,1 раза, что позволяет рекомендовать этот критерий для использования на практике.

Таким образом, проведённые эксперименты показали, что, во-первых, для сохранения эффекта упрочнения при ОПД с увеличением радиуса надреза необходимо увеличивать толщину слоя гладкой детали со сжимающими остаточными напряжениями и, во-вторых, для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей следует использовать критерий среднеинтегральных остаточных напряжений.

#### **Библиографический список**

1. Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок [Текст] / С.И. Иванов // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып. 53. – С. 32-42.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.