

Павлов В.Ф., Петрова Ю.Н., Михалкина С.А., Катанаева Ю.А.

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ

После поверхностного пластического деформирования (ППД) в поверхностном слое деталей изменяется структура, возникают наклёп и сжимающие остаточные напряжения. Известно [1], что основную роль в повышении сопротивления усталости упрочнённых деталей с концентраторами играют сжимающие остаточные напряжения. Для оценки влияния остаточных напряжений на предел выносливости таких деталей применяются два критерия: осевые остаточные напряжения на поверхности концентратора $\sigma_z^{нов}$ и среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{осм}$ [2], вычисленные по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали, равной критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе детали на пределе выносливости.

В работе [3] 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 цилиндрических деталей определяется соотношением

$$t_{кр} = 0,0216D, \quad (1)$$

где D – диаметр опасного сечения детали.

Для проверки возможности использования обоих критериев при оценке влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости при изгибе в случае симметричного цикла σ_{-1} были проведены эксперименты на сплошных цилиндрических упрочнённых и неупрочнённых образцах из стали 20 диаметром 50 мм с круговыми надрезами полукруглого профиля и напрессованной втулкой. Исследуемая 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 $D_l = 50$ мм подвергались обкатке роликом 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 [4]. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a гладких образцов представлено на рис. 1. Можно видеть, что сжимающие остаточные напряжения и глубина их залегания с увеличением усилия обкатки возрастают.

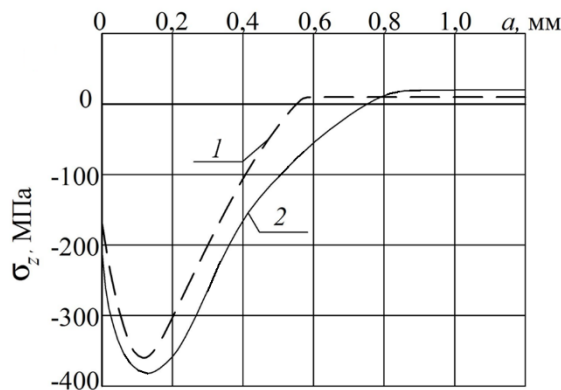


Рис. 1. Осевые остаточные напряжения σ_z в упрочнённых гладких образцах диаметром 50 мм после: 1 – ОР1; 2 – ОР2

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. При этом дополнительные остаточные напряжения вычислялись как аналитическим [5], так и численным методами. Следует заметить, что результаты определения дополнительных остаточных напряжений двумя методами имели хорошее совпадение.

Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a в наименьшем сечении образцов с надрезами $R = 0,3$ мм и $R = 0,5$ мм приведено на рис. 2, а значения остаточных напряжений на поверхности дна надрезов $\sigma_z^{нов}$ представлены в таблице 1.

Обращает на себя внимание значительная величина сжимающих остаточных напряжений, достигающих -1004 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 [6] 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.

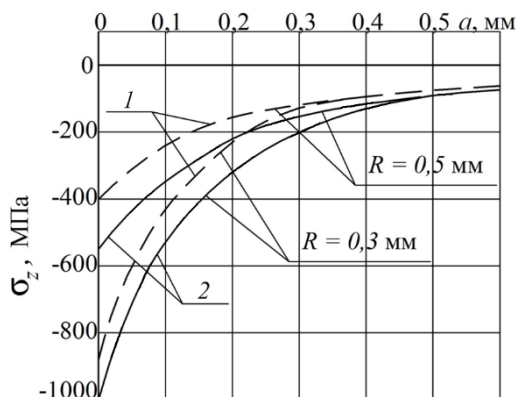


Рис. 2. Осевые остаточные напряжения σ_z в упрочнённых образцах диаметром 50 мм с надрезами $R = 0,3$ мм и $R = 0,5$ мм: 1 – ОП1; 2 – ОП2

Испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла неупрочнённых и упрочнённых образцов с надрезами и напрессованной втулкой проводились на машине УМП-02; 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 больших напряжениях. На изломах этих образцов были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, критическая глубина $t_{кр}$ которых соответствует зависимости (1) и приведена в табл. 1.

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

Концентратор	Неупроч. образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы							K_σ	$(\bar{\psi}_\sigma)_{расч}$
		Обработка	σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$		
Надрез $R = 0,3$ мм	87,5	ОП1	117,5	-898	0,033	1,040	-94	0,322	2,86	0,328
		ОП2	130	-1004	0,042	1,110	-128	0,332		
Надрез $R = 0,5$ мм	92,5	ОП1	122,5	-396	0,078	1,077	-82	0,366	2,47	0,353
		ОП2	132,5	-547	0,073	1,024	-112	0,357		
Надрез $R = 1,0$ мм	92,5	ОП1	110	-126	0,139	1,073	-46	0,380	2,32	0,363
		ОП2	115	-166	0,136	1,035	-62	0,363		
Напрессованная втулка	87,5	ОП1	107,5	-180	0,111	1,02	-64	0,313	2,97	0,321
		ОП2	112,5	-170	0,147	1,14	-82	0,305		

Из представленных в таблице 1 данных видно, что поверхностное пластическое деформирование обкаткой роликом образцов с надрезом и напрессованной втулкой приводит к существенному повышению предела выносливости, причём с увеличением усилия обкатки с $P = 0,5$ кН до $P = 1,0$ кН предел выносливости возрастает. Наблюдаемое

явление объясняется бóльшей глубиной залегания сжимающих остаточных напряжений в гладких упрочнённых образцах при увеличении усилия обкатки (рис. 1), результатом чего явилось повышение остаточных напряжений в опасном сечении образцов. Для сохранения эффекта упрочнения при опережающем поверхностном пластическом деформировании с увеличением радиуса надреза необходимо увеличивать толщину слоя со сжимающими остаточными напряжениями гладкой детали (заготовки).

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

Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов по критерию σ_z^{nos} – остаточным напряжениям на поверхности концентратора – приводит к значительному рассеянию коэффициента ψ_σ . Этот коэффициент в проведённом исследовании изменяется в широких пределах: от 0,033 до 0,147 (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 мёньшему рассеянию соответствующего коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$. Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ в проведённом исследовании изменяется от 0,305 до 0,380, составляя в среднем 0,342.

В работе [3] на основании многочисленных экспериментов была установлена зависимость между коэффициентом влияния $\bar{\psi}_\sigma$ поверхностного упрочнения на предел выносливости при изгибе по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ и эффективным коэффициентом концентрации напряжений K_σ в виде

$$(\bar{\psi}_\sigma)_{расч} = 0,514 - 0,065 K_\sigma. \quad (2)$$

В таблице 1 приведены значения коэффициента K_σ , определённые по данным работы [7]. Расчётные величины коэффициента $(\bar{\psi}_\sigma)_{расч}$ представлены также в таблице 1. Из приведённых данных видно, что опытные значения коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ для каждого радиуса надреза и напессованной втулки незначительно отличаются от расчётных значений, вычисленных по формуле (2).

Проведённое исследование показало, что при прогнозировании предела выносливости поверхностно упрочнённых цилиндрических образцов с надрезами и напрессованной втулкой наиболее оправдано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$.

Для прогнозирования предела выносливости упрочнённых образцов с надрезами и напрессованной втулкой использование в качестве критерия остаточных напряжений на поверхности концентратора $\sigma_z^{нов}$ не представляется возможным, так как соответствующий коэффициент, учитывающий влияние этого критерия на предел выносливости, имеет существенное рассеяние.

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. 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.
3. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулук. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Серенсен, С.В. Несущая способность и расчёт деталей машин на прочность [Текст] / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.