

Кирпичёв В. А., Филатов А. П., Каранаева О. В., Денискина Е. А., Бурнаев С. С.

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ В УСЛОВИЯХ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

Для исследования влияния размеров поперечного сечения поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами напряжений на сопротивление многоциклового усталости были проведены эксперименты на сплошных цилиндрических упрочнённых и неупрочнённых образцах различного диаметра из стали 20 с круговыми надрезами полукруглого профиля. 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 сплошного сечения диаметром $D = 10$ мм, $D = 25$ мм и $D = 50$ мм подвергались пневмодробеструйной обработке (ПДО), а также обкатке роликом при усилии $P = 0,5$ кН (ОР1) и $P = 1,0$ кН (ОР2). Затем на все упрочнённые и неупрочнённые гладкие образцы наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиуса $R = 0,3$ мм.

Остаточные напряжения в гладких образцах определялись экспериментально методом колец и полосок [1]. 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 при одной и той же упрочняющей обработке с увеличением диаметра образцов увеличиваются, что объясняется повышением жёсткости образцов с увеличением размеров их поперечного сечения.

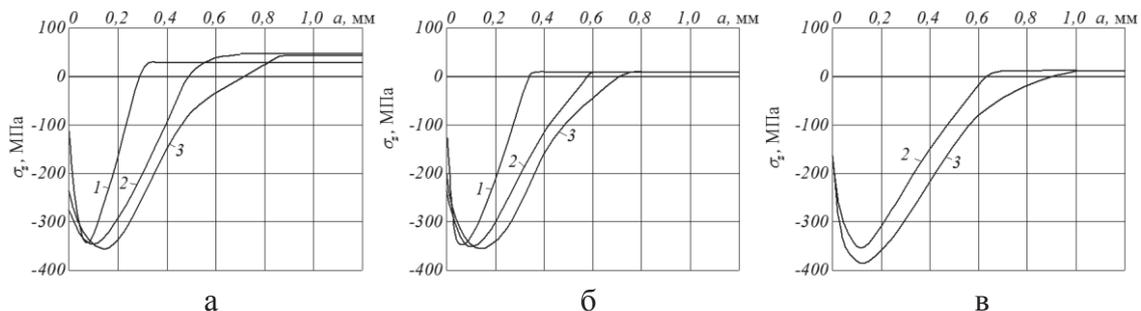


Рисунок 1 – Остаточные напряжения σ_z в упрочнённых гладких образцах диаметром 10 мм (а), 25 мм (б) и 50 мм (в) после: 1 – ПДО; 2 – ОР1; 3 – ОР2

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 [2], так и численным методами. Следует отметить,

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 надрезом $R = 0,3$ мм приведено на рис. 2, а значения остаточных напряжений на поверхности дна надрезов $\sigma_z^{нов}$ представлены в табл. 1. Необходимо обратить внимание на то, что наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений в упрочнённых образцах с надрезом превышает не только предел текучести, но и предел прочности стали 20. Наблюдаемому явлению дано объяснение в работе [3], где показано, что наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений в упрочнённом поверхностном слое деталей может превышать даже сопротивление разрыву S_k материала на 15 %. Этот предел в исследуемых случаях не превышен.

Испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла неупрочнённых и упрочнённых образцов диаметром 10 мм в гладкой части проводились на машине МУИ-6000, диаметром 25 мм – на машине УММ-01, диаметром 50 мм – на машине УМП-02; база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения.

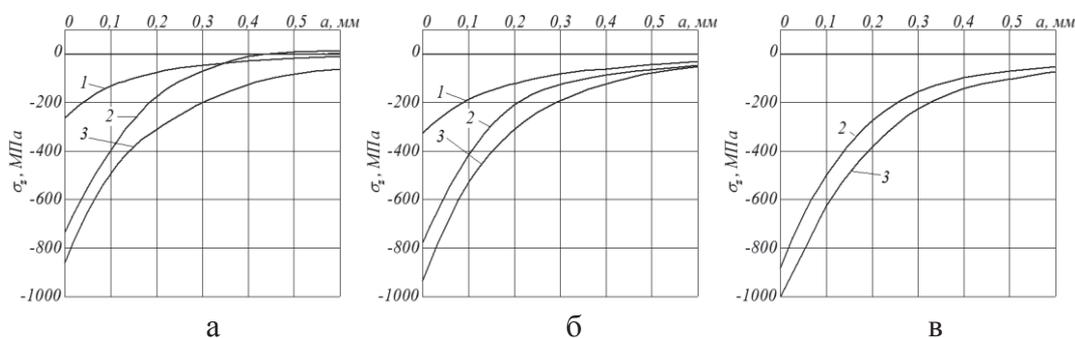


Рисунок 2 – Остаточные напряжения σ_z в упрочнённых образцах диаметром 10 мм (а), 25 мм (б) и 50 мм (в) с надрезами $R = 0,3$ мм после: 1 – ПДО; 2 – ОР1; 3 – ОР2

Результаты определения предела выносливости σ_{-1} представлены в табл. 1. Упрочнённые образцы, выстоявшие базу испытаний при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при бóльших напряжениях. На изломах этих образцов были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, критическая глубина $t_{кр}$ которых приведена в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний образцов на усталость и определения остаточных напряжений

D, мм	Неупрочнённые образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы						
		обработка	σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
10	110	ПДО	155	-263	0,171	0,203	-126	0,357
		ОР1	230	-732	0,164	0,195	-337	0,356
		ОР2	267,5	-861	0,183	0,205	-454	0,347
25	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
50	87,5	ОР1	117,5	-898	0,033	1,04	-94	0,322
		ОР2	130	-1004	0,042	1,11	-128	0,332

Из представленных в табл. 1 данных видно, что опережающее поверхностное пластическое деформирование образцов с надрезом пневмодробеструйной обработкой и обкаткой роликом приводит к повышению предела выносливости. Наиболее эффективна для исследованных образцов обкатка роликом, причём с увеличением усилия обкатки с $P = 0,5$ кН до $P = 1,0$ кН предел выносливости возрастает. Наблюдаемое явление объясняется большей глубиной залегания сжимающих остаточных напряжений в гладких упрочнённых образцах при увеличении усилия обкатки (рис. 1), результатом чего явилось повышение остаточных напряжений в образцах с надрезом.

С увеличением диаметра образцов от 10 мм до 50 мм приращение предела выносливости при одних и тех же режимах упрочняющей обработки уменьшается. Это связано с тем, что толщина слоя со сжимающими остаточными напряжениями при увеличении диаметра возрастает незначительно по сравнению с толщиной поверхностного слоя образцов, ответственной за повышение многоциклового усталости и равной критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости. Поэтому для сохранения эффекта упрочнения с увеличением диаметра детали следует увеличивать толщину упрочнённого поверхностного слоя (толщину слоя со сжимающими остаточными напряжениями) пропорционально критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости.

Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости детали в условиях концентрации напряжений по критерию $\sigma_z^{нов}$ – остаточным напряжениям на поверхности концентратора – приводит к значительному рассеянию соответствующего коэффициента ψ_σ . Этот коэффициент в проведённом исследовании изменяется в широких пределах: от 0,033 до 0,183 (табл. 1), то есть изменяется почти в 5,5 раза, что неприемлемо для

прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей.

Оценка влияния поверхностного упрочнения по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ – среднеинтегральным остаточным напряжениям – приводит к существенно меньшему рассеянию соответствующего коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$. Коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$ в проведённом исследовании изменяется от 0,322 до 0,357, составляя в среднем 0,341, и незначительно отличается от значения $\bar{\psi}_{\sigma} = 0,36$, установленного в [4] для упрочнённых образцов и деталей с аналогичной концентрацией напряжений.

Таким образом, проведённое исследование показало, что для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами напряжений различного диаметра наиболее оправдано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$. Для сохранения эффекта упрочнения с увеличением диаметра детали необходимо увеличивать толщину поверхностного слоя пропорционально диаметру.

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. 48. – С. 179-183.
- 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.