

Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Каранаева О.В., Сургутанов Н.А.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ УПРОЧНЁННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ПО ОСТАТОЧНЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ ОБРАЗЦА-СВИДЕТЕЛЯ

Для повышения сопротивления усталости деталей машин широкое применение на практике находят различные методы упрочнения поверхностным пластическим деформированием (ППД). После обработки ППД в тонком поверхностном слое деталей наводятся сжимающие остаточные напряжения, изменяется структура и увеличивается твёрдость материала. Многочисленными исследованиями, например [1-6], установлено, что основную роль в повышении характеристик сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей играют сжимающие остаточные напряжения.

В основе расчётно-экспериментального метода определения остаточных напряжений лежит известная гипотеза о том, что обрабатываемые совместно деталь и образец-свидетель при ППД получают одинаковые первоначальные деформации. Однако во всех случаях практического применения эта гипотеза требует проведения тщательной экспериментальной и расчётной проверки. Именно с этой целью были проанализированы результаты испытаний на усталость и экспериментального определения остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя нескольких партий цилиндрических образцов из различных сталей с наружным диаметром в гладкой части от 10 до 50 мм [4]. Параметры исследуемых образцов приведены в табл. 1, где  $D$  – наружный диаметр,  $d$  – диаметр отверстия.

Таблица 1 – Параметры исследованных образцов

Материал	Сталь 20	Сталь 45	Сталь 40Х	Сталь 30ХГСА
Упрочнение	ПДО	ГДО	ГДО	ГДО
Размеры образца $D \times d$ , мм	10x0 25x0 25x15	15x5 25x15 50x40	25x0 25x10 25x19	10x0 15x0 15x5 15x10

Все образцы перед испытаниями подвергались пневмодробеструйной (ПДО) и гидродробеструйной обработке (ГДО) стальной дробью. В качестве образца-свидетеля при проведении исследований вышеуказанных партий образцов использовалась втулка с наружным диаметром 51,5 мм и внутренним диаметром 45 мм. Расчётная часть исследований выполнялась методом конечно-элементного моделирования с использованием комплекса PATRAN/NASTRAN. Моделирование остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя гладких образцов было выполнено методом термоупругости [7]. При определении первоначальных деформаций в конечно-элементной модели образца-свидетеля в качестве исходных данных использовалось экспериментальное распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя втулки, полученное методом колец и полосок.

Следующий этап расчёта выполнялся на конечно-элементных моделях исследуемых гладких образцов различного диаметра по первоначальным деформациям

образца-свидетеля (втулки). При оценке приращения предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей определяющими являются осевые  $\sigma_z$  остаточные напряжения, поэтому сравнение расчётных и экспериментальных распределений остаточных напряжений для исследуемых гладких образцов выполнялось по осевой компоненте.

Полученные расчётным методом распределения осевых остаточных напряжений после пневмо- и гидродробеструйной обработки в гладких образцах различного диаметра использовались для расчёта распределения остаточных напряжений в образцах с круговыми надрезами полукруглого профиля радиуса  $R = 0,3$  мм, нанесёнными на гладкие образцы после упрочнения, то есть после опережающего поверхностного пластического деформирования (ОППД). На рис. 1 приведены экспериментальные [4] и расчётные эпюры осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине  $a$  поверхностного слоя опасного сечения образцов из стали 20 с надрезами после ОППД. Установлено, что распределения сжимающих остаточных напряжений, полученные по экспериментальным и расчётным эпюрам гладких образцов, отличаются по наибольшим значениям не более, чем на 7%.

Расчёт приращения предела выносливости упрочнённых образцов с надрезами проводился с использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  по методике, изложенной в работе [4]. В табл. 2 представлены расчётные  $(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$  и экспериментальные  $(\Delta\sigma_{-1})_{эксп}$  [4] значения приращений пределов выносливости.

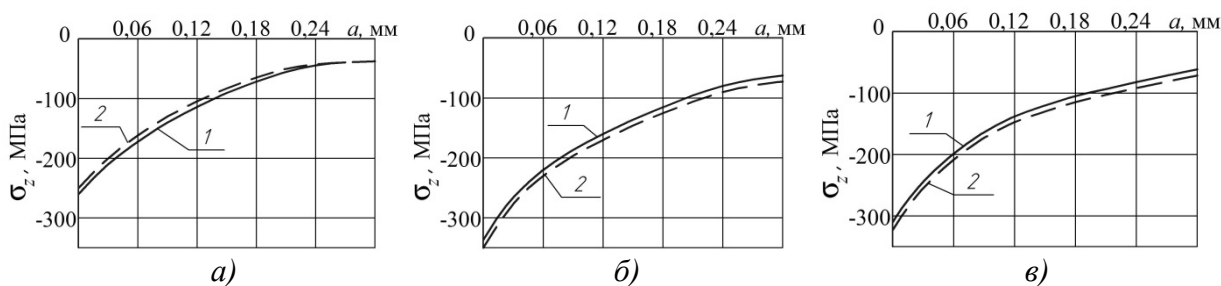


Рис. 1. Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений в образцах из стали 20 с надрезом  $R = 0,3$  мм, вычисленных по экспериментальным (1) и по расчётным (2) данным: (а) –  $D = 10$  мм,  $d = 0$ ; (б) –  $D = 25$  мм,  $d = 0$ ; (в) –  $D = 25$  мм,  $d = 15$  мм

Таблица 2 – Расчётные и экспериментальные значения приращений пределов выносливости образцов с надрезами

Материал	$D$ , мм	$d$ , мм	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$ , МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{эксп}$ , МПа	Расхождение, %
сталь 20	10	0	-122	48,0	45,0	6
	25	0	-89	33,6	30,0	11
	25	15	-91	33,5	32,5	3
сталь 45	15	5	-159	61,2	57,5	6
	25	15	-131	48,3	45,0	7
	50	40	-87	31,4	30,0	4
сталь 40Х	25	0	-109	41,1	42,5	3
	25	10	-110	41,4	42,5	3
	25	19	-117	43,2	40	8
сталь 30ХГСА	10	0	-240	94	90	5
	15	0	-196	75,5	77,5	3
	15	5	-211	81,3	77,5	5
	15	10	-218	82,1	80	3

Из данных табл. 2 видно, что расхождение между расчётными и экспериментальными значениями приращений пределов выносливости за счёт ПДО и ГДО не превышает 11 %. Следовательно, используя результаты определения остаточных напряжений в образцах-свидетелях, представляется возможным прогнозировать предел выносливости поверхностно упрочнённых деталей из исследуемых сталей различного диаметра (10-50 мм) в условиях концентрации напряжений с достаточной для многоциклового усталости точностью. Кроме того, использование образцов-свидетелей позволит назначать оптимальные (по сопротивлению усталости) режимы и методы поверхностного пластического деформирования деталей сложной формы, что приведёт к значительному сокращению длительных и дорогостоящих испытаний на усталость.

### Библиографический список

1. Павлов, В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение I. Сплошные детали [Текст] / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – №8. – С. 22-26.

2. Павлов, В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение II. Полые детали [Текст] / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – №12. – С. 37-40.

3. Радченко, В.П. Методика расчёта предела выносливости упрочнённых цилиндрических образцов с концентраторами напряжений при температурных выдержках в условиях ползучести [Текст] / В.П. Радченко, О.С. Афанасьева // Вестник СамГТУ. Сер.: физ.-мат. науки. – 2009. – №2 (19). – С. 264-268.

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 СНИЦ РАН, 2012. – 125 с.

5. Вакулюк, В.С. Сопротивление усталости детали в зависимости от толщины упрочнённого слоя при опережающем поверхностном пластическом деформировании [Текст] / В.С. Вакулюк // Вестник СГАУ. – 2012. – №3(34). – С. 172-176.

6. Кирпичёв, В.А. Остаточные напряжения и сопротивление усталости образцов с V-образными надрезами из стали ВНС40 [Текст] / В.А. Кирпичёв, М.Н. Саушкин, В.П. Сазанов, О.Ю. Семёнова // Вестник СГАУ. – 2012. – №5(36). – Ч. 1. – С. 95-99.

7. Сазанов, В.П. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании [Текст] / В.П. Сазанов, А.В. Чирков, В.А. Самойлов, Ю.С. Ларионова // Вестник СГАУ. – 2011. – №3(27). – Ч. 3. – С. 171-174.