

Сазанов В.П., Семёнова О.Ю., Сургутанов Н.А., Денисов Л.В.

**ПРИМЕНЕНИЕ РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ  
ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ УПРОЧНЕНИЯ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ СТАЛЕЙ**

Исследование выполнено с использованием расчётно-экспериментального метода прогнозирования предела выносливости при упрочнении деталей методами поверхностного пластического деформирования (ППД). С целью его апробирования проанализированы результаты испытаний на усталость и экспериментального определения остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя нескольких партий сплошных и полых цилиндрических образцов:

- из стали 20 диаметрами  $D = 10$  мм,  $d = 0$  мм;  $D = 25$  мм,  $d = 0$  мм и  $D = 25$  мм,  $d = 15$  мм;
- из стали 45 диаметрами  $D = 15$  мм,  $d = 5$  мм;  $D = 25$  мм,  $d = 15$  мм и  $D = 50$  мм,  $d = 40$  мм ( $D$  – наружный диаметр,  $d$  – внутренний диаметр).

Гладкие образцы из стали 20 подвергались пневмодробеструйной обработке (ПДО), из стали 45 – гидродробеструйной обработке (ГДО). В качестве образцов-свидетелей использовались втулки с наружным диаметром  $D = 51,5$  мм и внутренним диаметром  $d = 45$  мм, в которых определялись остаточные напряжения по толщине упрочнённого поверхностного слоя методом колец и полосок [1].

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 [2].

При определении первоначальных деформаций в конечно-элементной модели образца-свидетеля использовалось экспериментальное распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине  $a$  упрочнённого поверхностного слоя втулки (рисунок 1).

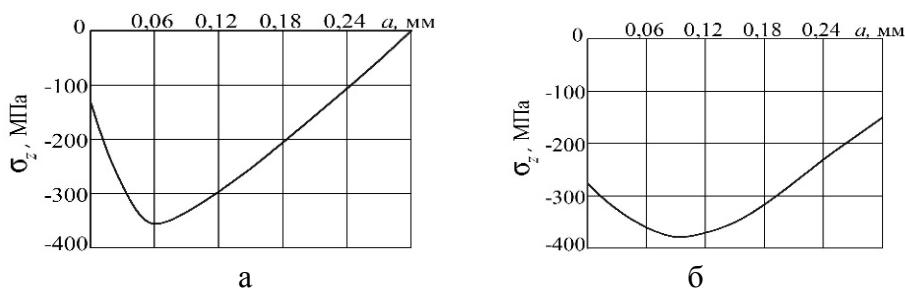


Рисунок 1 – Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений в образцах-свидетелях из сталей 20 (а) и 45 (б) (втулки диаметром 51,5×45 мм) после ПДО (а) и ГДО (б)

Следующий этап расчётов выполнялся на конечно-элементных моделях исследуемых гладких образцов различного диаметра по первоначальным деформациям образца-свидетеля (втулки). При оценке приращения предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей в соответствии с теорией наибольших касательных напряжений определяющими являются осевые  $\sigma_z$  остаточные напряжения [3, 4]. Поэтому сравнение расчётных и экспериментальных распределений остаточных напряжений для исследуемых гладких образцов выполнялось по осевой компоненте. На рисунках 2, 3 представлены экспериментальные и расчётные распределения осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине  $a$  поверхностного слоя для исследуемых гладких образцов различного диаметра.

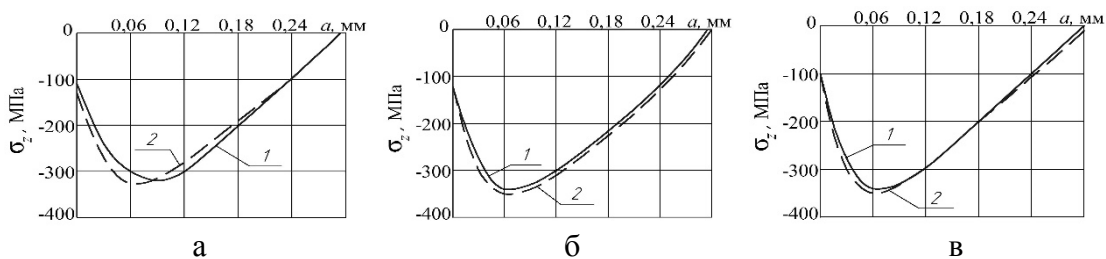


Рисунок 2 – Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений после ПДО, определённых экспериментальным (1) и расчётным (2) методами в гладких образцах из стали 20: а)  $D = 10$  мм,  $d = 0$  мм; б)  $D = 25$  мм,  $d = 0$  мм; в)  $D = 25$  мм,  $d = 15$  мм

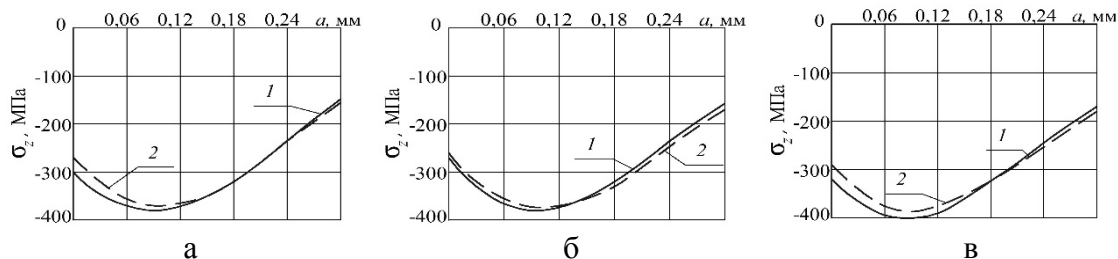


Рисунок 3 – Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений после ГДО, определённых экспериментальным (1) и расчётным (2) методами в гладких полых образцах из стали 45: а)  $D = 15$  мм,  $d = 5$  мм; б)  $D = 25$  мм,  $d = 15$  мм; в)  $D = 50$  мм,  $d = 40$  мм

На рисунках 4, 5 представлены экспериментальные и расчётные эпюры осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине  $a$  поверхностного слоя опасного сечения образцов с надрезами после опережающего поверхностного пластического деформирования. При этом распределения сжимающих остаточных напряжений, полученные по экспериментальным и расчётным эпюрам гладких образцов, отличаются по наибольшим значениям не более, чем на 7% для стали 20 и на 4% для стали 45.

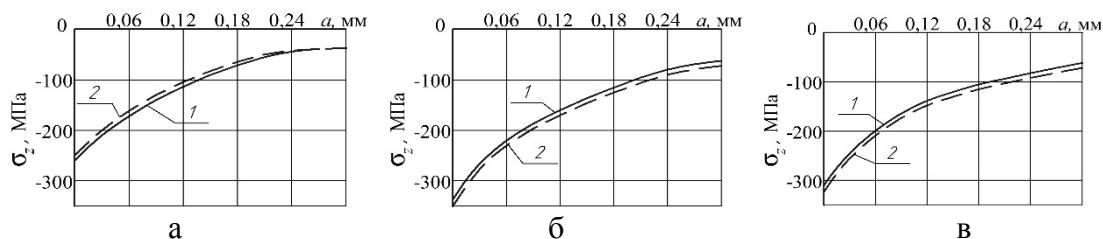


Рисунок 4 – Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений в образцах из стали 20 с надрезами  $R = 0,3$  мм, вычисленных по экспериментальным (1) и по расчётным (2) данным: а)  $D = 10$  мм,  $d = 0$  мм; б)  $D = 25$  мм,  $d = 0$  мм; в)  $D = 25$  мм,  $d = 15$  мм

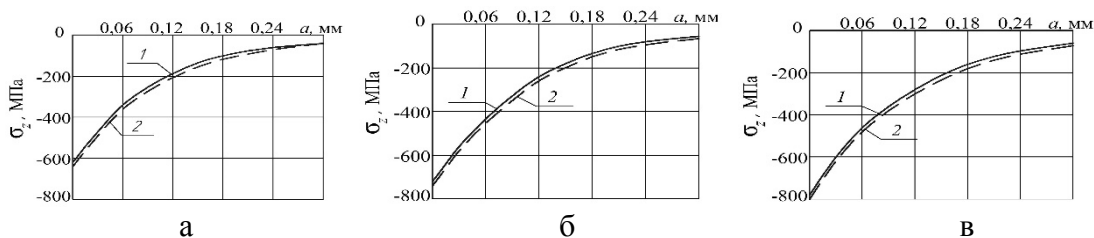


Рисунок 5 – Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений в полых образцах из стали 45 с надрезами  $R = 0,3$  мм, вычисленных по экспериментальным (1) и по расчётным (2) данным:

а)  $D = 15$  мм,  $d = 5$  мм; б)  $D = 25$  мм,  $d = 15$  мм; в)  $D = 50$  мм,  $d = 40$  мм

В приведённом исследовании оценка влияния поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости деталей из сталей 20 и 45 при изгибе в случае симметричного цикла  $\Delta\sigma_{-1}$  с использованием критерия среднеинтегральных напряжений  $\bar{\sigma}_{ocm}$  [3] производилась по следующей зависимости:

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_{\sigma} |\bar{\sigma}_{ocm}|, \quad (1)$$

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

Коэффициент  $\bar{\psi}_{\sigma}$  зависит только от степени концентрации напряжений и вычисляется для случая изгиба по следующей формуле [4]:

$$\bar{\psi}_{\sigma} = 0,612 - 0,081\alpha_{\sigma}, \quad (2)$$

где  $\alpha_{\sigma}$  – теоретический коэффициент концентрации напряжений. Значения критерия  $\bar{\sigma}_{ocm}$ , глубины трещины  $t_{кр}$ , коэффициентов  $\alpha_{\sigma}$  и  $\bar{\psi}_{\sigma}$  представлены в таблицах 1, 2. После вычисления критерия  $\bar{\sigma}_{ocm}$  и коэффициента  $\bar{\psi}_{\sigma}$  по формуле (1) определялись расчётные значения приращений пределов выносливости  $(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$  упрочнённых образцов с надрезами радиуса  $R=0,3$  мм (таблицы 1, 2) и сравнивались с экспериментальными значениями  $(\Delta\sigma_{-1})_{эксп}$ , приведёнными в работе [4].

Таблица 1 – Результаты расчётного и экспериментального определения пределов выносливости образцов с надрезами из стали 20

$D$ , мм	$d$ , мм	$t_{кр}$ , мм	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\alpha_{\sigma}$	$\bar{\psi}_{\sigma}$	$(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$ , МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{эксп}$ , МПа	Расхождение, %
10	0	0,203	-122	2,7	0,393	48	45	6
25	0	0,527	-89	2,9	0,377	33,6	30	11
25	15	0,453	-91	3,0	0,369	33,5	32,5	3

Таблица 2 – Результаты расчётного и экспериментального определения пределов выносливости образцов с надрезами из стали 45

$D$ , мм	$d$ , мм	$t_{кр}$ , мм	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\alpha_{\sigma}$	$\bar{\psi}_{\sigma}$	$(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$ , МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{эксп}$ , МПа	Расхождение, %
15	5	0,303	-159	2,8	0,385	61,2	57,5	6
25	15	0,453	-131	3,0	0,369	48,3	45	7
50	40	0,733	-87	3,1	0,361	31,4	30	4

Из данных таблицы 1, 2 видно, что расхождение между расчётными и экспериментальными значениями приращений пределов выносливости не превышает 11% для стали 20 и 7% для стали 45. Следовательно, используя результаты определения остаточных напряжений в образцах-свидетелях, представляется возможным прогнозировать предел выносливости поверхностно упрочнённых цилиндрических деталей из стали 20 после ПДО и из стали 45 после ГДО различных диаметров (10-50 мм) в условиях концентрации напряжений с достаточной для многоциклового усталости точностью.

#### 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. 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.
3. 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.
4. 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.