

Сазанов В.П., Филатов А.П., Семёнова О.Ю., Письмаров А.В.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСЧЁТНЫХ МЕТОДОВ  
ОЦЕНКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ПРИ ВЫБОРЕ  
УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ 30ХГСА**

Объектом настоящего исследования являлись цилиндрические образцы с надрезами из стали 30ХГСА, подвергнутые поверхностному упрочнению двумя методами: гидродробеструйной обработке и обкатке роликами. Предметом исследования являлись остаточные напряжения в поверхностном слое образцов после упрочнения. Цель работы – исследование влияния данных остаточных напряжений на многоцикловую усталость, а также установление возможности использования разработанных расчётных методик для оценки эффективности поверхностного упрочнения.

В данной работе для исследования был применён расчётно-экспериментальный метод, который основан на использовании конечно-элементного моделирования (комплекс PATRAN/NASTRAN) и результатов экспериментального определения остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя механическими способами. В качестве апробации рассматривались два метода поверхностного пластического деформирования (ППД), которые наиболее широко применяются в технологических процессах упрочнения деталей – гидродробеструйная обработка (ГДО) и обкатка роликом (ОР).

Оценка влияния поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости детали  $\Delta\sigma_{-1}$  при изгибе в случае симметричного цикла с использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  проводилась по следующей зависимости, предложенной в работе [1]:

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

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

Для проведения экспериментальной части исследования точением с последующим шлифованием были изготовлены стандартные образцы диаметром 10 мм из стали 30ХГСА. Одна половина образцов после изготовления подвергалась электрополированию, другая – поверхностному упрочнению на режимах, характерных для практики авиационных предприятий. На гладкие неупрочнённые и упрочнённые образцы

безнаклёпным способом с использованием электрополирования наносились надрезы полукруглого профиля радиусом  $R = 0,3$  мм.

Эпюры осевых остаточных напряжений  $\sigma_z$  по толщине  $a$  поверхностного слоя в гладких образцах после гидродробеструйной обработки и после обкатки роликом, определённые методом колец и полосок [2], приведены на рис. 1 [3].

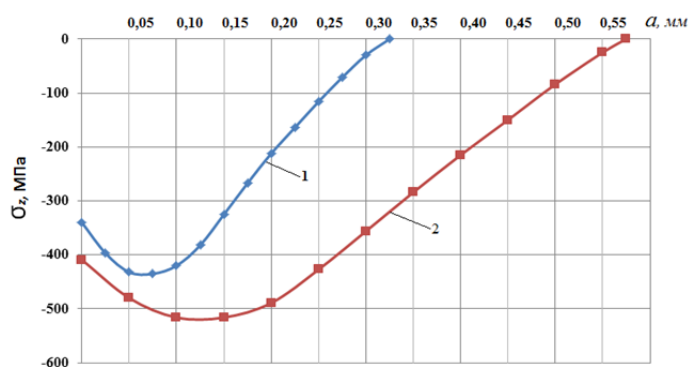


Рис. 1. Остаточные напряжения в гладких образцах после ГДО (1) и ОР (2)

Из рис. 1 видно, что сжимающие остаточные напряжения после упрочнения дробью в образцах не превышают  $-450$  МПа, а после обкатки роликом не превышают  $-550$  МПа и обе зависимости имеют подповерхностный максимум. Толщина слоя со сжимающими остаточными напряжениями после обкатки роликом примерно в два раза больше по сравнению с обработкой на гидродробеструйной установке.

Расчётная часть исследований выполнялась методом конечно-элементного моделирования с использованием комплекса PATRAN/NASTRAN [4]. При определении первоначальных деформаций [5, 6] в конечно-элементной модели гладкого образца в качестве исходных данных использовалось экспериментальное распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине  $a$  упрочнённого поверхностного слоя (рис. 1). Полученные расчётным методом распределения первоначальных деформаций в гладких образцах 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. Эпюры осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений в наименьшем (опасном) сечении образцов с надрезами приведены на рис. 2.

Значения пределов выносливости образцов с надрезом при изгибе в случае симметричного цикла  $\sigma_{-1}$ , теоретического коэффициента концентрации напряжений  $\alpha_\sigma$ ,

коэффициента влияния  $\bar{\psi}_\sigma$ , среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ , приращений предела выносливости за счёт упрочнения по результатам эксперимента  $(\Delta\sigma_{-1})_{\text{эксп}}$  и расчёта  $(\Delta\sigma_{-1})_{\text{расч}}$  определялись по формулам работы [3] и приведены в табл. 1.

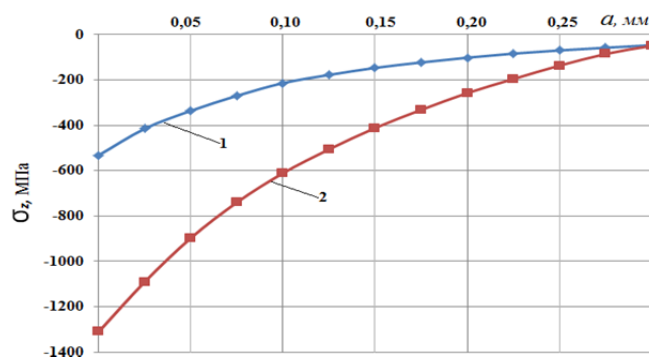


Рис. 2. Остаточные напряжения в образцах с надрезом  $R = 0,3$  мм после гидродробеструйной обработки (1) и обкатки роликом (2)

Из представленных в табл. 1 данных следует, что обкатка роликом по сравнению с гидродробеструйной обработкой даёт большее приращение предела выносливости за счёт более полной эпюры сжимающих остаточных напряжений.

Таблица 1 – Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

Неупрочнённые образцы $\sigma_{-1}$ , МПа	Упрочнённые образцы						
	упрочняющая обработка	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\alpha_\sigma$	$\bar{\psi}_\sigma$	$\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ , МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{\text{эксп}}$ , МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{\text{расч}}$ , МПа
180	ГДО	270	2,7	0,386	-208	90	82
	ОР	400	2,7	0,382	-583	220	229

Проведённые исследования по определению пределов выносливости при изгибе в случае симметричного цикла цилиндрических образцов диаметром 10 мм из стали 30ХГСА показали, что упрочнение поверхности обкаткой роликом является более эффективным методом по сравнению с гидродробеструйной обработкой при принятых режимах технологических процессов. При этом приращение предела выносливости относительно неупрочнённых образцов при ОР почти в 2,5 раза выше, чем при ГДО.

Установлено, что расхождение между расчётными и экспериментальными значениями приращений предела выносливости за счёт упрочнения цилиндрических

образцов с полукруглым надрезом не превышает 9% при ГДО и 4% при ОР.

Проведённые исследования показали, что применение расчётно-экспериментальных методов прогнозирования предела выносливости позволит назначать оптимальные (по сопротивлению многоциклового усталости) режимы и методы поверхностного пластического деформирования деталей сложной формы без проведения длительных и дорогостоящих испытаний на многоцикловую усталость.

### **Библиографический список**

1. 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.

2. 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.

3. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СамНЦ РАН, 2012. – 125 с.

4. 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.

5. Павлов, В.Ф. Расчёт остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям [Текст] / В.Ф. Павлов, А.К. Столяров, В.С. Вакулюк, В.А. Кирпичёв. – Самара: Издательство СамНЦ РАН, 2008. – 124 с.

6. Сазанов, В.П. Определение первоначальных деформаций в упрочнённом слое цилиндрической детали методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса PATRAN/NASTRAN [Текст] / В.П. Сазанов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк, В.Ф. Павлов // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19. – №2 (68). – С. 35-40.