

Сазанов В.П., Михалкина С.А., Микушев Н.Н., Письмаров А.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ УПРОЧНЁННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ 40Х

Использованный в данном исследовании расчётно-экспериментальный метод оценки приращения предела выносливости с применением образцов-свидетелей и современных расчётных комплексов позволяет сохранить исследуемую деталь и получить распределение остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя в любом её сечении. В этом случае при измерении остаточных напряжений механическими методами разрушению подвергается только образец-свидетель. Такой образец, имеющий определённую форму и геометрические размеры, проходит весь технологический цикл обработки вместе со штатной деталью.

В основе вышеуказанного расчётно-экспериментального метода лежит известная концепция, согласно которой обрабатываемые совместно деталь и образец-свидетель при поверхностном пластическом деформировании получают одинаковые первоначальные деформации. Однако, во всех случаях практического применения, концепция требует проведения тщательной экспериментальной и расчётной проверки. С целью апробации и правильности выбора принятых положений и расчётных методов было проведено исследование результатов испытаний на усталость и экспериментального определения остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя нескольких партий цилиндрических образцов из стали 40Х с размерами $D \times d$: 25х0 мм; 25х10 мм; 25х19 мм, где D – наружный диаметр, d – внутренний диаметр [1].

Образцы перед испытаниями подвергались гидродробеструйной обработке (ГДО). В качестве образца-свидетеля при проведении исследований использовалась цилиндрическая втулка диаметром 51.5х45 мм, в которой определялись остаточные напряжения по толщине упрочнённого поверхностного слоя методом колец и полосок. Моделирование остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя выполнялось методом термоупругости [2] с использованием комплекса PATRAN/NASTRAN.

При определении первоначальных деформаций в конечно-элементной модели образца-свидетеля в качестве исходных данных использовалось экспериментальное

распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя a (рисунок 1) этого образца.



Рисунок 1 – Осевые σ_z остаточные напряжения в образце-свидетеле (втулка диаметром 51.5x45 мм) после ГДО

При оценке приращения предела выносливости определяющими являются осевые остаточные напряжения. Поэтому сравнение расчётных и экспериментальных распределений остаточных напряжений выполнялось по осевой компоненте. По результатам расчётов остаточных напряжений в гладких образцах по толщине поверхностного слоя установлено, что расхождение расчётных и экспериментальных значений наибольших осевых σ_z остаточных напряжений не превышает 8%.

Полученные расчётным методом распределения осевых остаточных напряжений в гладких образцах после гидродробеструйной обработки использовались для расчёта распределения остаточных напряжений в образцах с круговыми надрезами полукруглого профиля радиуса $R=0.3$ мм, нанесёнными на гладкие образцы после упрочнения ГДО. Остаточные напряжения в образцах с надрезами определялись как сумма дополнительных напряжений, возникающих за счёт перераспределения остаточных усилий при нанесении надзоров, и остаточных напряжений гладких образцов. Остаточные напряжения, полученные по экспериментальным и расчётным эпюрам гладких образцов, отличались по наибольшему значению не более, чем на 6%.

Прогнозирование влияния гидродробеструйной обработки на приращение предела выносливости образцов с надрезами при изгибе в случае симметричного цикла $\Delta\sigma_{-1}$ с использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ [1] проводилось по следующей зависимости:

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

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

$$\bar{\sigma}_{osm} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad (2)$$

$\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в опасном сечении образца по толщине поверхностного слоя a ; $\xi = a/t_{кр}$ – расстояние от поверхности опасного сечения образца до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$; $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей в опасном сечении упрочнённого образца (детали) при работе на пределе выносливости.

На основании многочисленных экспериментальных данных для образцов и деталей из различных материалов с различными концентраторами напряжений в работе [3] было установлено, что коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ зависит только от степени концентрации напряжений и вычисляется для случая изгиба по следующей формуле:

$$\bar{\psi}_\sigma = 0,612 - 0,081\alpha_\sigma, \quad (3)$$

где α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений, который определялся по данным справочника [4] и представлен в таблице 1.

Таблица 1

D , мм	d , мм	D_1 , мм	α_σ	$\bar{\psi}_\sigma$	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{осл}$, МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$, МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{эксп}$, МПа	Расхождение, %
25	0	24.4	2.9	0.377	0.527	-109	41.1	42.5	3
25	10	24.4	2.9	0.377	0.504	-110	41.4	42.5	3
25	19	24.4	3.0	0.369	0.380	-117	43.2	40	8

В работе [1] установлено, что критическая глубина $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости не зависит от вида поверхностного упрочнения, материала, типа и размеров концентратора, величины сжимающих остаточных напряжений, типа деформации, асимметрии цикла напряжений и определяется только размерами опасного поперечного сечения. Для полых цилиндрических образцов и деталей зависимость для $t_{кр}$ имеет следующий вид [1]:

$$t_{кр} = 0,0216D_1 \left[1 - 0,04 \left(\frac{d}{D_1} \right)^2 - 0,54 \left(\frac{d}{D_1} \right)^3 \right], \quad (4)$$

где D_1 – диаметр опасного сечения образца или детали. d – диаметр отверстия образца или детали. Расчётные значения $t_{кр}$, вычисленные по формуле (4), приведены в таблице 1.

Критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, значения которого представлены в таблице 1, вычислялся по формуле (2) по толщине поверхностного слоя опасного сечения образцов с надрезами, равной критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости. После вычисления критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ и коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ по формуле (1) определялись расчётные значения приращений пределов выносливости $(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$ упрочнённых гидродробеструйной обработкой образцов с надрезами радиуса $R = 0.3$ мм (таблица 1) и сравнивались с экспериментальными значениями $(\Delta\sigma_{-1})_{эксп}$, приведёнными в работе [1].

Из данных таблицы 1 видно, что погрешность расчётных и экспериментальных значений приращений пределов выносливости за счёт ГДО не превышает 8%. Следовательно, используя результаты определения остаточных напряжений в образцах-свидетелях, представляется возможным прогнозировать предел выносливости поверхностно упрочнённых цилиндрических деталей из стали 40Х в условиях концентрации напряжений с достаточной для многоциклового усталости точностью.

Библиографический список

1. 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.
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. Кирпичёв, В.А. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений [Текст] / В.А. Кирпичёв, А.П. Филатов, О.В. Каранаева, А.В. Чирков, О.Ю. Семёнова // Труды МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций». – Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАНУ, 2011. – С. 678-685.
4. Петерсон, Р.Е. Коэффициенты концентрации напряжений [Текст] / Р.Е. Петерсон. – М.: Мир, 1977. – 304 с.