

УДК 621.787:539.319

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Павлов В.Ф., Вакулюк В.С., Сазанов В.П., Семёнова О.Ю., Чуриков Д.С.  
Самарский университет, г. Самара, Россия, [sopromat@ssau.ru](mailto:sopromat@ssau.ru)

*Ключевые слова:* поверхностное упрочнение, образцы из стали 20, прогнозирование предела выносливости, концентрация напряжений, критерий среднеинтегральных остаточных напряжений.

Основную роль в повышении характеристик сопротивления усталости деталей с концентраторами напряжений после поверхностного пластического деформирования (ППД) играют сжимающие остаточные напряжения [1]. Для оценки влияния остаточных напряжений на предел выносливости упрочнённых ППД деталей используются два критерия: критерий осевых  $\sigma_z^{нов}$  остаточных напряжений на поверхности концентратора и критерий среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  [2], вычисленный по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали, равной критической глубине  $t_{кр}$  нераспространяющейся трещины усталости.

Зависимости для определения приращения предела выносливости  $\Delta\sigma_{-1}$  детали при изгибе в случае симметричного цикла имеют вид

$$\Delta\sigma_{-1} = \psi_{\sigma} \left| \sigma_z^{нов} \right|, \quad (1)$$

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_{\sigma} \left| \bar{\sigma}_{ост} \right|, \quad (2)$$

где  $\psi_{\sigma}$  и  $\bar{\psi}_{\sigma}$  – коэффициенты влияния поверхностного упрочнения по критериям  $\sigma_z^{нов}$  и  $\bar{\sigma}_{ост}$ , соответственно.

Для проверки возможности использования обоих критериев при оценке влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости были проведены эксперименты на сплошных цилиндрических неупрочнённых и упрочнённых образцах из стали 20 диаметром 25 мм с надрезами полукруглого профиля и напрессованной втулкой. Гладкие образцы диаметром 25 мм подвергались пневмодробеструйной обработке (ПДО) стальными шариками диаметром 1,5-2,5 мм и обкатке роликом (ОР) диаметром 60 мм и профильным радиусом 1,6 мм при усилиях  $P = 0,5$  кН (ОР1) и  $P = 1,0$  кН (ОР2). На неупрочнённые и упрочнённые гладкие образцы наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиусов  $R = 0,3$  мм,  $R = 0,5$  мм и  $R = 1,0$  мм.

Остаточные напряжения в гладких образцах определялись экспериментально методом колец и полосок [3], а в образцах с надрезами расчётным путём – суммированием дополнительных остаточных напряжений за счёт перераспределения остаточных усилий после опережающего поверхностного пластического деформирования и остаточных напряжений

гладких образцов. Значения остаточных напряжений  $\sigma_z^{нов}$  и среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты испытаний образцов с надрезами и напрессованной втулкой на усталость и определения остаточных напряжений

| Концентратор           | Неупрочнённые образцы $\sigma_{-1}$ , МПа | Упрочнённые образцы |                     |                        |               |               |                            |                     |
|------------------------|---|---------------------|---------------------|------------------------|---------------|---------------|----------------------------|---------------------|
|                        |   | обработка           | $\sigma_{-1}$ , МПа | $\sigma_z^{нов}$ , МПа | $\psi_\sigma$ | $t_{кр}$ , мм | $\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа | $\bar{\psi}_\sigma$ |
| надрез<br>$R = 0,3$ мм | 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               |
| надрез<br>$R = 0,5$ мм | 112,5                                     | ПДО                 | 130                 | -142                   | 0,123         | 0,525         | -52                        | 0,337               |
|                        |   | ОР1                 | 150                 | -349                   | 0,107         | 0,530         | -111                       | 0,338               |
|                        |   | ОР2                 | 172,5               | -515                   | 0,117         | 0,520         | -169                       | 0,355               |
| надрез<br>$R = 1,0$ мм | 112,5                                     | ПДО                 | 120                 | -46                    | 0,163         | 0,490         | -21                        | 0,357               |
|                        |   | ОР1                 | 130                 | -92                    | 0,190         | 0,510         | -46                        | 0,380               |
|                        |   | ОР2                 | 142,5               | -145                   | 0,207         | 0,495         | -79                        | 0,380               |
| напрес. втулка         | 100                                       | ОР1                 | 150                 | -220                   | 0,227         | 0,535         | -148                       | 0,338               |
|                        |   | ОР2                 | 170                 | -210                   | 0,333         | 0,540         | -201                       | 0,348               |

Испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла неупрочнённых и упрочнённых образцов с надрезами и напрессованной втулкой проводились на машине УММ-01; база испытаний –  $3 \cdot 10^6$  циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости  $\sigma_{-1}$  и критической глубины  $t_{кр}$  образцов представлены в табл. 1. Из приведённых в табл. 1 данных видно, что пневмодробеструйная обработка и обкатка роликом образцов с надрезами и напрессованной втулкой приводят к повышению предела выносливости, причём с увеличением усилия обкатки с  $P = 0,5$  кН до  $P = 1,0$  кН предел выносливости возрастает. Приращение предела выносливости образцов с надрезами после обкатки роликом выше, чем после пневмодробеструйной обработки, что объясняется бóльшей глубиной залегания сжимающих остаточных напряжений в гладких упрочнённых образцах при ОР, чем при ПДО.

Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов по критерию  $\sigma_z^{нов}$  приводит к значительному рассеянию соответствующего коэффициента  $\psi_\sigma$ . Этот коэффициент в проведённом исследовании изменяется в широких пределах: от 0,073 до 0,333 (табл. 1), то есть изменяется в 4,5 раза, что неприемлемо для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей. Оценка влияния поверхностного упрочнения по критерию  $\bar{\sigma}_{ост}$  приводит к существенно меньшему рассеянию соответствующего коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$ . Коэффициент  $\bar{\psi}_\sigma$  в проведённом исследовании изменяется от 0,334 до 0,380, составляя в среднем 0,350.

#### Выводы.

1. На основании проведённого исследования установлено, что при прогнозировании предела выносливости поверхностно упрочнённых цилиндрических деталей из стали 20 с

надрезами и напрессованной втулкой наиболее оправдано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$ .

2. Для сохранения эффекта упрочнения деталей после опережающего поверхностного пластического деформирования при увеличении глубины концентратора следует увеличивать толщину слоя со сжимающими остаточными напряжениями гладкой заготовки.

### Список литературы

1. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений и наклёпа на усталостную прочность / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов // Проблемы прочности. – 1976. – №5. – С. 25-27.

2. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.

3. Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок / С.И. Иванов // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ. – 1971. – №48. – С. 179-183.

### Сведения об авторах

Павлов Валентин Фёдорович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов. Область научных интересов: исследования в области механики остаточных напряжений.

Вакулюк Владимир Степанович, д.т.н., профессор. Область научных интересов: исследования в области механики остаточных напряжений.

Сазанов Вячеслав Петрович, к.т.н., доцент. Область научных интересов: исследования в области механики остаточных напряжений.

Семёнова Ольга Юрьевна, к.т.н., доцент. Область научных интересов: исследования в области механики остаточных напряжений.

Чуриков Дмитрий Сергеевич, аспирант. Область научных интересов: исследования в области механики остаточных напряжений.

## MULTI-CYCLIC FATIGUE OF MACHINES PARTS PREDICTION AFTER SUPERFICIAL PLASTIC DEFORMING

Pavlov V.F., Vakulyuk V.S., Sazanov V.P., Semyonova O.YU., CHurikov D.S.  
Samara University, Samara, Russia, sopromat@ssau.ru

*Key words: surface hardening, specimens made of steel 20, prediction of the endurance limit, stress concentration, average integral residual stresses criterion.*

The estimation of residual stresses caused by pneumatic blasting and rolling influence on the endurance limit of specimens made of steel 20 of 25 mm diameter with cuts of various radiuses and pressurized bush under bending has been examined.