

Павлов В.Ф., Филатов А.П., Сургутанова Ю.Н., Каранаева О.В., Богданова И.В.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ УПРОЧНЁННЫХ РОЛИКОМ ОБРАЗЦОВ С НАПРЕССОВАННОЙ ВТУЛКОЙ

В исследовании изучалось влияние сжимающих остаточных напряжений на предел выносливости поверхностно упрочнённых роликом цилиндрических образцов диаметром 25 мм из сталей 20 и 40Х с напрессованной втулкой. Механические характеристики используемых для образцов материалов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Механические характеристики материалов

| Материал | $\sigma_s$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | $S_k$ , МПа |
|----------|------------------|----------------------|--------------|------------|-------------|
| Сталь 20 | 522              | 395                  | 26,1         | 65,9       | 1416        |
| 40Х      | 751              | 444                  | 17,6         | 60,7       | 1330        |

Влияние поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости образцов при изгибе  $\Delta\sigma_{-1}$  в случае симметричного цикла оценивалось по двум критериям. Во-первых, по критерию осевых остаточных напряжений  $\sigma_z^{nos}$  на поверхности образцов, использованному в работах [1-3]:

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

где  $\psi_\sigma$  – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию  $\sigma_z^{nos}$ .

Во-вторых, оценка производилась также по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ocm}$  [4]:

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

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

$$\bar{\sigma}_{ocm} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi; \quad (3)$$

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

Сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое образцов создавались обкаткой роликом (ОР) диаметром 60 мм с профильным радиусом 1,6 мм при усилиях  $P = 0,5$  кН и  $P = 1,0$  кН. Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя  $a$  определялось экспериментально методом колец и полосок [5] и представлено на рис. 1. Из данных рис. 1 видно, что при обкатке роликом на одних и тех же режимах ( $P = 1,0$  кН) характер распределения сжимающих остаточных напряжений в образцах из стали 40Х существенно отличается от характера распределения остаточных напряжений в образцах из стали 20. Сжимающие остаточные напряжения в образцах из стали 40Х (эюра 3) значительно выше как по величине, так и по глубине залегания, чем в образцах из стали 20 (эюра 2), то есть распределение остаточных напряжений в образцах из стали 40Х является более полным. Это различие в характере распределения остаточных напряжений существенно сказывается на сопротивлении усталости упрочнённых обкаткой роликом образцов из сталей 20 и 40Х.

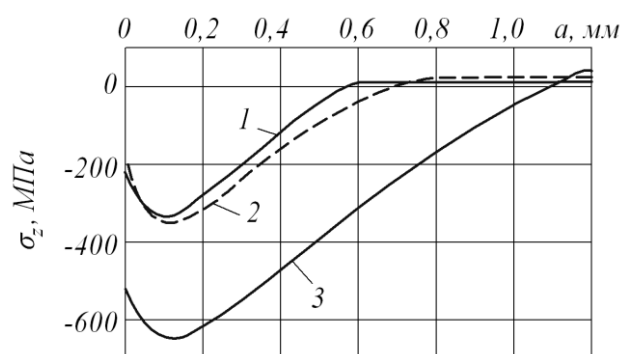


Рис. 1. Осевые остаточные напряжения  $\sigma_z$  в упрочнённых обкаткой роликом образцах из стали 20 (1, 2) и стали 40Х (3) при  $P = 0,5$  кН (1) и  $P = 1,0$  кН (2, 3)

Испытания образцов с напрессованной втулкой на усталость при изгибе в случае симметричного цикла проводились на машине УММ-01, база испытаний –  $3 \cdot 10^6$  циклов нагружения. Значения пределов выносливости образцов  $\sigma_{-1}$  представлены в таблице 2. Можно видеть, что приращение предела выносливости упрочнённых роликом при  $P = 1,0$  кН образцов из стали 40Х почти в два раза выше, чем образцов из стали 20, что объясняется бóльшей величиной сжимающих остаточных напряжений и более полным их распределением по толщине поверхностного слоя [6].

На примере образцов из стали 20, обкатанных роликом при  $P = 0,5$  кН и  $P = 1,0$  кН, можно проанализировать влияние характера распределения остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя на предел выносливости. При практически одинаковых осевых остаточных напряжениях на поверхности образцов ( $\sigma_z^{нов} = -220$  МПа и  $\sigma_z^{нов} = -210$  МПа) и наибольших напряжениях ( $\sigma_z^{наиб} = -350$  МПа и  $\sigma_z^{наиб} = -360$  МПа) бóльшая глубина залегания сжимающих остаточных напряжений при  $P = 1,0$  кН ( $a = 0,70$

мм), чем при  $P = 0,5$  кН ( $a = 0,52$  мм) приводит к большему увеличению предела выносливости. Приращение предела выносливости поверхностно упрочнённых образцов при  $P = 0,5$  кН составляет 50 МПа, а при  $P = 1,0$  кН – 70 МПа, то есть на 40% выше. Этот результат указывает на то, что распределение сжимающих остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых деталях должно быть наиболее полным по толщине поверхностного слоя, равной критической глубине  $t_{кр}$  нераспространяющейся трещины усталости.

Для определения критической глубины  $t_{кр}$  нераспространяющейся трещины усталости выстоявшие базу испытаний упрочнённые роликом образцы при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при большем напряжении. На изломах этих образцов просматривались нераспространяющиеся усталостные трещины, средняя глубина которых приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты определения остаточных напряжений и испытаний на усталость образцов с напрессованной втулкой

| Материал | $K_\sigma$ | Неупрочнённые образцы $\sigma_{-1}$ , МПа | Упрочнённые образцы |                     |                        |               |               |                            |                     |
|----------|------------|---|---------------------|---------------------|------------------------|---------------|---------------|----------------------------|---------------------|
|          |            |   | Обработка           | $\sigma_{-1}$ , МПа | $\sigma_z^{нов}$ , МПа | $\psi_\sigma$ | $t_{кр}$ , мм | $\bar{\sigma}_{осм}$ , МПа | $\bar{\psi}_\sigma$ |
| Сталь 20 | 2,33       | 100                                       | ОР, $P=0,5$ кН      | 150                 | -220                   | 0,227         | 0,535         | -148                       | 0,338               |
|          | 2,33       |   | ОР, $P=1,0$ кН      | 170                 | -210                   | 0,333         | 0,540         | -201                       | 0,348               |
| 40X      | 3,95       | 162,5                                     | ОР, $P=1,0$ кН      | 285                 | -520                   | 0,235         | 0,523         | -484                       | 0,253               |

Критерий среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{осм}$  вычислялся по формуле (3) с использованием распределения остаточных напряжений, приведённого на рис. 1, по толщине поверхностного слоя образцов, равной критической глубине  $t_{кр}$  нераспространяющейся трещины усталости. Значения  $\bar{\sigma}_{осм}$  приведены в табл. 2. Коэффициенты влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости  $\psi_\sigma$  и  $\bar{\psi}_\sigma$ , которые определялись по формулам (1), (2), также представлены в табл. 2.

Сравнивая значения коэффициента  $\psi_\sigma$ , учитывающего влияние поверхностного упрочнения по критерию  $\sigma_z^{нов}$ , для образцов из стали 20, можно видеть, что величина этого коэффициента для двух вариантов упрочнения различается на 47%, то есть отличие весьма существенно. Такое различие коэффициента  $\psi_\sigma$  не позволяет с достаточной для практики точностью использовать критерий осевых остаточных напряжений  $\sigma_z^{нов}$  на поверхности опасного сечения для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости детали.

Анализируя значения коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$ , учитывающего влияние поверхностного упрочнения по критерию  $\bar{\sigma}_{осм}$ , можно видеть, что для упрочнённых роликом образцов из

стали 40Х этот коэффициент меньше, чем для образцов из стали 20. Это различие объясняется бóльшей чувствительностью стали 40Х к концентрации напряжений по сравнению со сталью 20, что подробно исследовано в работе [7].

В табл. 2 приведены значения эффективного коэффициента концентрации напряжений  $K_\sigma$ , определённого для вала с напрессованной втулкой по данным работы [7]. Видно, что для образцов из стали 40Х коэффициент  $K_\sigma$  в 1,7 раза больше, чем для образцов из стали 20. В работе [6] на основании многочисленных экспериментов была установлена зависимость между коэффициентом влияния  $\bar{\psi}_\sigma$  и эффективным коэффициентом концентрации напряжений  $K_\sigma$  в виде:

$$\bar{\psi}_\sigma = 0,514 - 0,065K_\sigma. \quad (4)$$

Значения коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$ , вычисленные по зависимости (4), составили: для случая образцов из стали 20 – 0,362, для случая образцов из стали 40Х – 0,257, то есть коэффициенты  $\bar{\psi}_\sigma$ , полученные в настоящем исследовании (табл. 2), незначительно отличаются от вычисленных по формуле (4) величин.

Таким образом, критерий среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  может быть использован для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых валов с напрессованной втулкой.

#### Библиографический список

1. Кравченко, Б.А. Обработка и выносливость высокопрочных материалов [Текст] / Б.А. Кравченко, К.Ф. Митряев. – Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 1968. – 131 с.
2. Серенсен, С.В. К вопросу об оценке сопротивления усталости поверхностно упрочнённых образцов с учётом кинетики остаточной напряжённости [Текст] / С.В. Серенсен, С.П. Борисов, Н.А. Бородин // Проблемы прочности. – 1969. – №2. – С. 3-7.
3. Туровский, М.Л. Концентрация напряжений в поверхностном слое цементированной стали [Текст] / М.Л., Туровский, Н.М. Шифрин // Вестник машиностроения. – 1970. – №11. – С. 37-40.
4. 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.
5. 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.
6. 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.

7. Серенсен, С.В. Несущая способность и расчёт деталей машин на прочность [Текст] / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.