

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА МНОГОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ ДЕТАЛЕЙ

*Павлов В.Ф., Вакулюк В.С., Сазанов В.П., Семёнова О.Ю.  
Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королева, г. Самара*

**Ключевые слова:** поверхностное упрочнение, предел выносливости, остаточные напряжения, наклёп, среднеинтегральные остаточные напряжения.

**Аннотация.** Для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей машин используются два критерия: остаточные напряжения на поверхности опасного сечения детали и среднеинтегральные остаточные напряжения по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости. Многочисленными экспериментальными и расчётными исследованиями установлено, что для оценки приращения предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей следует использовать критерий среднеинтегральных остаточных напряжений.

## THE EVALUATION OF SURFACE HARDENING INFLUENCE ON PARTS' MULTICYCLIC FATIGUE

*Pavlov V.F., Vakulyuk V.S., Sazanov V.P., Semyonova O.Yu.  
Samara National Research University, Samara*

**Keywords:** surface hardening, endurance limit, residual stresses, peening, average integral residual stresses.

**Abstract.** Two criteria are used for the evaluation of surface hardening influence on the endurance limit of machines' parts: residual stresses on a dangerous section surface and average integral residual stresses through the part's dangerous section surface layer thickness that equal a critical depth of a non-propagating fatigue crack. It's been stated by numerous experimental and calculation investigations that the average integral residual stresses criterion should be used for the evaluation of surface hardened parts endurance limit increase.

В настоящее время для повышения сопротивления усталости деталей машин широкое применение на практике находят различные методы поверхностного упрочнения. После упрочнения в поверхностном слое деталей возникают сжимающие остаточные напряжения и наклёп. Экспериментально установлено [1], что основную роль в повышении характеристик сопротивления усталости за счёт упрочнения играют сжимающие остаточные напряжения. Для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей с концентраторами применяются два критерия [2].

Первым критерием, использованным в работах [1-4], являются остаточные напряжения на поверхности концентратора. Зависимость для определения приращения предела выносливости  $\Delta P_R$  ( $\Delta\sigma_R$  – растяжение, изгиб;  $\Delta\tau_R$  – кручение) упрочнённой детали в этом случае имеет вид

$$\Delta P_R = \psi_P \cdot \left| \sigma_z^{нов} \right|, \quad (1)$$

где  $\psi_P$  ( $\psi_\sigma$  – растяжение, изгиб;  $\psi_\tau$  – кручение) – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию  $\sigma_z^{нов}$ ,  $\sigma_z^{нов}$  – осевые (меридиональные) остаточные напряжения на поверхности концентратора в опасном сечении упрочнённой детали.

При упрочнении деталей часто наблюдается подповерхностный максимум сжимающих остаточных напряжений, то есть к поверхности деталей остаточные напряжения уменьшаются. Этот спад бывает весьма существенным, иногда остаточные напряжения снижаются к поверхности до нуля и даже становятся растягивающими [5], однако увеличение предела выносливости наблюдается и в этих случаях.

Эти эксперименты указывают на то, что критерий оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей с концентраторами по остаточным напряжениям должен базироваться на учёте остаточных напряжений не только на поверхности, но и по толщине поверхностного слоя опасного сечения деталей.

Для определения второго критерия в работе [6] использовалось аналитическое решение задачи [7] о дополнительных остаточных напряжениях в наименьшем сечении поверхностно упрочнённой детали после нанесения на неё надреза полуэллиптического профиля. Выделив основную часть решения [7], был получен второй критерий  $\bar{\sigma}_{ост}$  – критерий среднеинтегральных остаточных напряжений влияния упрочнения на предел выносливости детали в виде

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

где  $\sigma_z(\xi)$  – осевые (меридиональные) остаточные напряжения в опасном сечении детали,  $\xi = y/t_{кр}$  – расстояние от дна концентратора до текущего слоя, выраженное в долях  $t_{кр}$ ,  $t_{кр}$  – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе упрочнённой детали на пределе выносливости.

Приращение предела выносливости упрочнённой детали с концентратором напряжений  $\Delta P_R$  при использовании критерия  $\bar{\sigma}_{ост}$  определяется по следующей формуле:

$$\Delta P_R = \bar{\psi}_P \cdot |\bar{\sigma}_{ост}|, \quad (3)$$

где  $\bar{\psi}_P$  ( $\bar{\psi}_\sigma$  – растяжение, изгиб;  $\bar{\psi}_\tau$  – кручение) – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию  $\bar{\sigma}_{ост}$ .

На основании многочисленных и многолетних экспериментальных и расчётных исследований, проведённых на кафедре сопротивления материалов и в научно-исследовательской лаборатории №31 Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва установлено:

1. Для исследованных видов поверхностного упрочнения (гидро- и пневмодробеструйная обработка, обкатка роликом, алмазное выглаживание, обработка микрошариками, ультразвуковое упрочнение, азотирование, цементация, борирование), различных материалов (стали 30ХГСА, 12Х18Н9,

12Х18Н10Т, ЭИ961, ЭИ696, ВНС40, 16ХСН, ЭП479Ш, 38Х2МЮА, 40Х, 40ХН, 45, 40, 20; сплавы ЭИ437Б, ЭИ698ВД, ВКС-5, ВНС-17, ЭП718, ЖС6У, В93, В95, Д16Т, Д1П, 1953Т1, ВТ16, ВТ9, ВТ3-1), степеней равномерного и неравномерного наклёпа, величин (-29 – -2200 МПа) и характера распределения сжимающих остаточных напряжений, типов и размеров концентраторов, поперечных размеров деталей критерий среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  (формула (2)) хорошо отражает связь между остаточными напряжениями и приращением предела выносливости  $\Delta P_R$  (формула (3)).

2. Оценка приращения предела выносливости  $\Delta P_R$  упрочнённых деталей (формула (1)) по величине сжимающих остаточных напряжений  $\sigma_z^{нов}$  на поверхности опасного сечения не представляется возможной, так как соответствующий коэффициент влияния  $\psi_P(\psi_\sigma, \psi_\tau)$  в проведённых экспериментах при симметричном цикле изменяется в широких пределах – от 0,030 до 1,143, то есть в 38 раз.

3. Критическая глубина  $t_{кр}$  нераспространяющейся трещины усталости в опасном сечении упрочнённых деталей с концентраторами напряжений определяется только размерами поперечного сечения и не зависит от вида поверхностного упрочнения, материала, последовательности изготовления и упрочнения концентратора, наклёпа, типа и размеров концентратора, величины сжимающих остаточных напряжений, типа деформации и асимметрии цикла напряжений. Например, для сплошных цилиндрических образцов и деталей зависимость для  $t_{кр}$  имеет следующий вид:

$$t_{кр} = 0,0216D,$$

где  $D$  – диаметр опасного сечения образца или детали.

4. Коэффициент  $\bar{\psi}_P(\bar{\psi}_\sigma, \bar{\psi}_\tau)$  влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  зависит от типа деформации (изгиб, растяжение-сжатие и кручение), асимметрии цикла напряжений и степени концентрации напряжений. По результатам исследований разработаны методики учёта влияния этих факторов при определении коэффициента  $\bar{\psi}_P(\bar{\psi}_\sigma, \bar{\psi}_\tau)$ .

5. В случае симметричного цикла для образцов и деталей с надрезами коэффициент влияния поверхностного упрочнения по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений при изгибе и растяжении-сжатии в среднем составляет –  $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$ , при кручении –  $\bar{\psi}_\tau = 0,18$ . В случае асимметричного цикла напряжений на основе критерия среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  разработана методика построения диаграммы предельных амплитуд цикла напряжений и определения предельной амплитуды для упрочнённых деталей с концентраторами напряжений.

6. Исследования, проведённые на гладких и корсетных образцах, показали, что критерий среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  можно использовать и для прогнозирования предела выносливости поверхностно

упрочнённых гладких деталей, но лишь в том случае, когда сжимающие остаточные напряжения не изменяются под действием переменных напряжений.

7. Критерий среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  может быть использован и в случае работы детали при повышенной температуре, но при этом в расчёт необходимо брать остаточные напряжения детали в конце её ресурса, то есть с учётом релаксации. Эти напряжения экспериментально можно определить путём термоэкспозиции.

Таким образом, на основании проведённых расчётно-экспериментальных исследований с использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений разработан метод оценки влияния поверхностного упрочнения на многоцикловую усталость (предел выносливости) деталей машин с концентраторами напряжений с различными размерами поперечного сечения, при различных деформациях, при симметричном и асимметричном циклах напряжений.

### 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: монография / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СНИЦ РАН, 2012. – 125 с.
3. Кравченко, Б.А. Обработка и выносливость высокопрочных материалов / Б.А. Кравченко, К.Ф. Митряев. – Куйбышев: Куйбышев. книж. изд-во, 1968. – 131 с.
4. Серенсен С.В. К вопросу об оценке сопротивления усталости поверхностно упрочнённых образцов с учётом кинетики остаточной напряжённости / С.В. Серенсен, С.П. Борисов, Н.А. Бородин // Проблемы прочности. – 1969. – №2. – С. 3-7.
5. Школьник Л.М. Повышение прочности шестерён дробеструйным наклёпом / Л.М. Школьник, В.П. Девяткин // Вестник машиностроения. – 1950. – №12. – С. 7-12.
6. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.
7. Иванов С.И. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом / С.И. Иванов, М.П. Шатунов, В.Ф. Павлов // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1974. – Вып.1. – С. 88-95.

### Сведения об авторах:

*Павлов Валентин Фёдорович* – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов, Самарский университет, г. Самара;

*Вакулюк Владимир Степанович* – д.т.н., доцент, профессор кафедры сопротивления материалов, Самарский университет, г. Самара;

*Сазанов Вячеслав Петрович* – к.т.н., доцент кафедры сопротивления материалов, Самарский университет, г. Самара;

*Семёнова Ольга Юрьевна* – к.т.н., доцент, доцент кафедры высшей математики, Самарский университет, г. Самара.