

## КРИТЕРИЙ КАЧЕСТВА УПРОЧНЕННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ ПАРАМЕТР УПРАВЛЕНИЯ ТЕХПРОЦЕССОМ ППД

© 2011 Т. А. Хибник, Ю. И. Кольцун

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Рассмотрены механизмы возникновения и развития усталостных трещин в случае неоптимальных режимов поверхностного пластического деформирования. Предложен эффективный коэффициент качества технологического упрочнения поверхностного слоя.

*Поверхностное пластическое деформирование, остаточные напряжения, эпюры остаточных напряжений, усталостная трещина, эффективный коэффициент качества технологического упрочнения.*

Для повышения усталостной прочности и срока службы деталей машин широко применяют поверхностное пластическое деформирование (ППД), реализуемое различными способами [1]. Эффективность методов ППД зависит от выбора рационального способа и назначения оптимальных режимов обработки [2,3], которые оказывают существенное влияние на зарождение и развитие трещин.

В настоящей работе предпринята попытка проанализировать эффективность технологического упрочнения поверхностного слоя не путем определения оптимальных внешних параметров обработки, таких как: давление воздуха или масла, варьирование диаметром дроби или шариков, изменением скорости их хаотического движения и т.д., и последующих испытаний на усталость, а путем анализа внутренних факторов, таких как эпюры распределения осевых остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя после различных видов обработки без проведения испытаний на усталость, по которым можно добиваться необходимых значений параметров технологических режимов ППД, снижающих вероятность зарождения трещин с поверхности и под поверхностью упрочненного слоя.

На рис. 1 [4] приведены графики осевых остаточных напряжений в образцах после различных видов обработки.

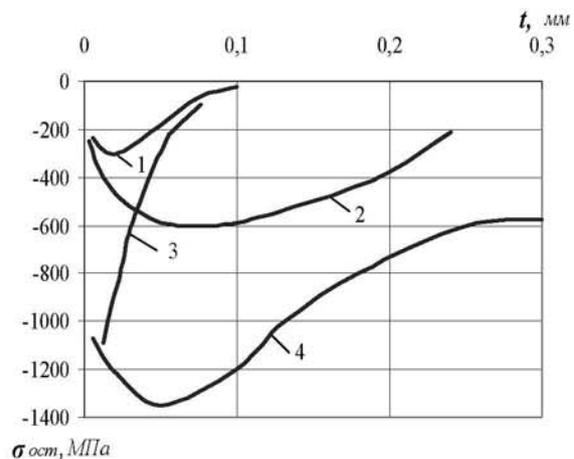


Рис. 1. Графики осевых остаточных напряжений в образцах после различных видов обработки поверхности: 1 - точение; 2 - гидродробеструйная обработка; 3 - обработка микрошариками; 4 - алмазное выглаживание

Анализ данных кривых показывает, что формы эпюр осевых остаточных напряжений имеют три вида: вогнутую, выпуклую, выпуклую с подповерхностным максимумом. Для создания общей картины вне зависимости от вида ППД и материала в работе предложены обобщенные модели распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя  $t$ , представленные на рис. 2. Толщина поверхностного слоя меняется в пределах от 0,1 до 0,5 мм, а  $\sigma_{zост}$  от 100 до 500 МПа.

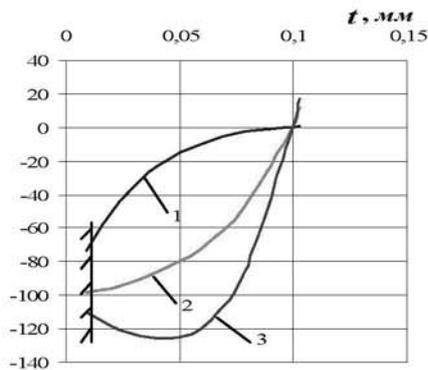


Рис. 2. Обобщенные модели форм эпюр осевых остаточных напряжений  $\sigma_{zост}$  после ППД стале

лей: 1 – вогнутая, 2- выпуклая, 3 – выпуклая с подповерхностным максимумом

Оценить математически влияние на сопротивление усталости детали распределения эпюры осевых остаточных напряжений по толщине упрочненного слоя можно с помощью критериального параметра – средневзвешенная интегральная величина  $\bar{\sigma}_{ост}$ , определяемая либо глубиной усталостной трещины  $a$  в пределах малой толщины  $t$  упрочненного слоя, или в пределах безопасной глубины усталостной трещины

$a_{безоп}$  для эпюр осевых остаточных напряжений, распределенных в пределах толщины  $t > a_{безоп}$ . Выражение для критериального параметра  $\bar{\sigma}_{ост}$  выведено для полуэллиптического надреза [5] и имеет вид

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

где  $\sigma_{ост}(\xi)$  – осевые остаточные технологические напряжения,

$\xi = \frac{y}{t} = \cos \theta$  – текущая толщина залегающая осевых остаточных напряжений  $\sigma(\xi)$ .

Сравнение  $\bar{\sigma}_{ост}$  с остаточными напряжениями на поверхности  $\sigma_{ост}^{нов}$  [6] позволяет установить критериальное отношение  $K_{V_T} = \bar{\sigma}_{ост} / \sigma_{ост}^{нов}$ , которое можно назвать эффективностью технологического упрочнения поверхностного слоя. График зависимости  $K_{V_T} = (f)t$  представлен на рис. 3.

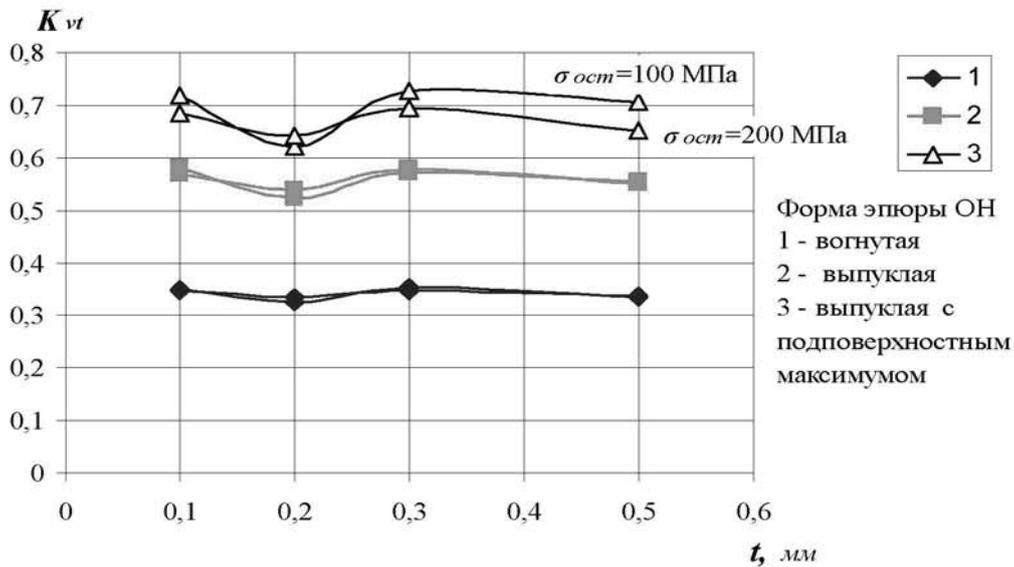


Рис. 3. График зависимости  $K_{V_T} = (f)t$

Из рис. 3 видно, что наименьшее значение  $K_{V_T}$  приходится на эпюры вогнутой формы, наибольшее – на эпюры с выпуклой формой и выпуклой с подповерхностным максимумом.

Рассмотрим механизмы зарождения и развития трещин, которые могут возникнуть в случае неоптимальных режимов обработки ППД: 1) с поверхности вглубь материала; 2) из глубины (под поверхностью) к поверхности материала.

В силу увеличения сдвиговых деформаций на границе раздела упрочненного слоя и основного материала возникает вероятность образования трещины по типу II (поперечный сдвиг). Это можно представить равенством (2) местных касательных напряжений  $\tau_M$  и предела выносливости по трещинообразованию  $\tau_{-1}^{TP}$ , при котором произойдет расслоение на границе раздела упрочненного слоя и основного материала, т.е. возникнет трещина под поверхностью.

$$\tau_M = \tau_{-1}^{TP}. \quad (2)$$

Следовательно гарантированное условие отсутствия трещины можно определить неравенством (3):

$$\tau_M < \tau_{-1}^{TP}. \quad (3)$$

Левая часть неравенства (3) может принимать любые значения меньше  $\tau_{-1}^{TP}$ . Тогда, если правую часть равенства (2) умножить на управляющий параметр  $A$ , изменяющийся в диапазоне от  $0 < A < 1$ , то новое равенство (4) будет входить в область определения неравенства (3):

$$\tau_M = A \tau_{-1}^{TP}. \quad (4)$$

Введём в неравенство (3) безразмерную единицу. Её всегда можно заменить на критерий, отвечающий данной теме исследования, при условии, когда его значение, например,  $K_{VT} = 1$ . Данное изложение представлено в виде (5), (6):

$$\tau_M < 1 \cdot \tau_{-1}^{TP}, \quad (5)$$

$$\tau_M < \frac{\bar{\sigma}_{ост}}{\sigma_{ост}} \cdot \tau_{-1}^{TP} = K_{VT} \cdot \tau_{-1}^{TP}. \quad (6)$$

В неравенстве (5), эквивалентном неравенству (2), местные напряжения  $\tau_M$  также могут принимать любые значения больше 0, но меньше  $1 \tau_{-1}^{TP}$ , что гарантирует отсутствие трещины. Критериальный параметр  $K_{VT}$  принимает аналогичные значения от 0 до 1. Это определяет идентичность областей определения  $K_{VT}$  и условия отсутствия трещинообразования (3).

В то же время условие прочности по трещинообразованию можно записать в следующем виде:

$$\tau_M \leq \left[ \tau_{-1}^{TP} \right] = \frac{\tau_{-1}^{TP}}{n}. \quad (7)$$

Как известно, при переменных напряжениях устанавливают допустимую величину запаса прочности  $n_\sigma = 1,5 \div 4,0$  [4] на основе опыта эксплуатации машин. Однако подповерхностная трещина расслоения (тип II) образуется, когда поверхность испытывает перенаклеп, а деталь в это время может находиться в статическом состоянии, при котором запас прочности  $n_\sigma = 1,3 \div 2,5$  [4]. В этом случае с учетом значения коэффициента запаса по текучести целесообразно принять  $n_{стат} = 1,5 \div 2,5$ . Тогда выражение (7) запишется в следующем виде:

$$\tau_M \leq \left[ \tau_{-1}^{TP} \right] = \frac{\tau_{-1}^{TP}}{n_{стат}}. \quad (8)$$

При  $n_{стат} = 1,5$ :

$$\tau_M \leq \left[ \tau_{-1}^{TP} \right] = 0,67 \cdot \tau_{-1}^{TP} = K_{VTmax} \cdot \tau_{-1}^{TP}.$$

При  $n_{стат} = 2,5$ :

$$\tau_M \leq \left[ \tau_{-1}^{TP} \right] = 0,4 \cdot \tau_{-1}^{TP} = K_{VTmin} \cdot \tau_{-1}^{TP}.$$

Как видно из рис. 3, значения  $K_{VT}$  находятся в диапазоне от 0,3 до 0,7. Повышение  $K_{VT} > 0,7$  может привести к образованию подповерхностной трещины, возникающей в результате резкого повышения сдвиговых деформаций на глубине смены знака эпюры остаточных напряжений. В процессе эксплуатации деталей с такими трещинами, их работоспособность снижается за счет неблагоприятного сочетания дефектной микрогеометрии поверхности с высокими местными нормальными напряжениями от большого множества микротрещин на небольшой глубине и высоких касательных напряжений на границе упрочненного слоя и основного материала. В этом случае в величине эквивалентных остаточных напряжений решающую роль играют касательные напряжения, способствующие отслоению поверхностного слоя. Данное явление называется перенаклепом. Когда по результатам определения остаточных напряжений значение

$K_{VT}$  соответствует величине в окрестности 0,65, эффект полноты эпюры сжимающих осевых остаточных напряжений преобладает над концентрацией местных растягивающих напряжений от субмикротрещин дефектной микрогеометрии поверхностного слоя, тогда несущая способность упрочненного поверхностного слоя является максимальной.

В случае  $K_{VT} < 0,4$  зарождение трещины происходит с поверхности. В этом случае большую роль играет микрогеометрия поверхностного слоя. Здесь эффект концентрации местных растягивающих нормальных напряжений в устье субмикротрещин начинает преобладать над эффектом повышения несущей способности поверхностного слоя в силу малой полноты эпюры осевых нормальных остаточных напряжений. Более резко это проявляется при  $K_{VT} < 0,25$ , что соответствует  $n_\sigma = 4,0$  [4].

Следует отметить, что  $K_{VT}$  является критериальной характеристикой качества технологического упрочнения и отличается от коэффициента влияния поверхностной обработки на сопротивление усталости деталей  $K_V$  [2], который больше единицы и разрабатывался для расчетов коэффициента запаса по усталости.

Опираясь на критериальную оценку эффективности упрочнения поверхностного слоя  $K_{VT}$ , можно прогнозировать исходную область инициирования, т.е. возникновения и дальнейшего роста трещины. При стремлении  $K_{VT}$  к нулю усталостная трещина будет появляться на поверхности опасного сечения детали по типу отрыва (тип I) и развиваться вглубь детали. При значении  $K_{VT}$  в окрестности величины, равной 0,4...0,5, увеличивается вероятность возникновения трещины на глубине по типу I, соответствующей максимальному модулю осевых остаточных напряжений, которая развивается одновременно и вглубь материала, и по направлению к поверхности. При стремлении  $K_{VT}$  к единице возникает вероятность одновременного появления усталостных трещин на глубине по типу поперечного сдвига (тип II) [7] и на поверхности элемента детали по

типу отрыва (тип I) за счет неблагоприятной микрогеометрии поверхности, которые в этом случае будут развиваться навстречу друг другу.

Таким образом, изменяя технологические режимы параметров упрочнения поверхностного слоя, можно добиться необходимого значения критерия качества ППД  $K_{VT}$ , что позволяет регулировать характеристики сопротивления усталости детали с остаточными напряжениями путём увеличения несущей способности поверхностного слоя детали с трещиной. Подтверждением данного направления исследования являются новые методы ППД, один из которых статико-импульсная обработка. Данный вид обработки позволяет исключить возможность отслоения поверхностного слоя и возникновения концентрации напряжений на глубине за счет плавного перехода от упрочненной области к неупрочненной [8].

#### Библиографический список

1. Одинцов, Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием [Текст]: Справочник / Л.Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1986. – С. 386.
2. Когаев, В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. [Текст] / В.П. Когаев. – М.: Машиностроение, 1977. – С. 232.
3. Иоргачев, В.Д. Определение уровня остаточных напряжений в деталях машин при их поверхностном пластическом деформировании [Текст] / В.Д. Иоргачев, П.А. Линчевский // Труды Одесского политехнического университета. – 2003. - № 1 (19). – С. 18-21.
4. Биргер, И.А. Расчеты на прочность деталей машин [Текст]: Справочник / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иоселевич. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1979. – С. 702.
5. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом [Текст] / С.И. Иванов, М.П. Шатунов, В.Ф. Павлов // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. Куйбышев: КуАИ, 1974. - Вып. 1. - С.88-95.
6. Биргер, И.А. Проблемы остаточных

напряжений [Текст] /И.А. Биргер // Остаточные напряжения и методы регулирования: тр. всесоюз. симпозиума.- М.: ИПМ АН СССР, 1982.-С. 5-17.

7. Obreimoff, I.W. The splitting strength of mica / I. W. Obreimoff // Proceedings of the Royal Society of London. Ser. A. – Vol. XXVII. – № 804. – 1930. – P. 290-297.

8. Пат. № 2098259 Российская Федера-

ция, МКИ В24В 39/00. Способ статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием [Текст]/ А.Г. Лазуткин, А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев; заявитель и патентообладатель Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета. - Бюл. № 34. – 1997. – 3с.

## QUALITY CRITERIA HARDENED SURFACE LAYER, THE EFFECTIVE PARAMETER MANAGEMENT PROCESS TECHNOLOGY OF SURFACE PLASTIC DEFORMATION

©2011 T. A. Khibnick, Yu. I. Koltsovn

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov  
(National Research University)

In the paper we examined the mechanisms of emergence and development of fatigue cracks in the case is not optimal modes of surface plastic deformation. We proposed the effective quality factor of technological surface layer hardening.

*Surface plastic deformation, residual stress, diagrams of residual stresses, fatigue crack, the effective quality factor of technological hardening.*

### Информация об авторах

**Хибник Татьяна Алексеевна**, ассистент кафедры основ конструирования машин, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-46-10. E-mail: [tanya\\_hib@mail.ru](mailto:tanya_hib@mail.ru). Область научных интересов: механика разрушения, механика деформируемого твердого тела, мезомеханика, синергетика.

**Кольцун Юрий Иванович**, доктор технических наук, профессор кафедры сопротивления материалов Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-45-27. E-mail: [koltsovn\\_y.i@mail.ru](mailto:koltsovn_y.i@mail.ru). Область научных интересов: механика разрушения, механика деформируемого твердого тела, мезомеханика, синергетика.

**Khibnik Tatiyana Alekseevna**, the assistant of the department of the basis designing Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-46-10. E-mail: [tanya\\_hib@mail.ru](mailto:tanya_hib@mail.ru). Area of research: mechanics of the cracking, mechanics of a solid deformable body, mezomechanics, synergetics.

**Koltsovn Yuriy Ivanovich**, doctor of the technical sciences, professor of the department of the strength materials, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Area of research: mechanics of the cracking, mechanics of a solid deformable body, mezomechanics, synergetics.