

---

---

**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ  
МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

---

---

УДК 662.459

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ  
КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ НА ВЕЛИЧИНУ И ХАРАКТЕР  
ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПАР ТРЕНИЯ**© 2020 г. А. П. Яковлева<sup>1,\*</sup>, А. Ю. Албагачиев<sup>2</sup><sup>1</sup> *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*<sup>2</sup> *Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия**\*e-mail: yakovleva525@mail.ru*

Поступила в редакцию 25.03.2019 г.

Принята к публикации 25.12.2019 г.

В статье выполнен анализ влияния остаточных напряжений в поверхностном слое цилиндрических пар трения на эксплуатационный показатель-износостойкость. Исследованы напряжения I рода после применения комбинированной обработки. Сущность комбинированной обработки заключается в последовательном выполнении электромеханической обработки и алмазном выглаживании. Получена формула для расчета остаточных напряжений возникающих в поверхностном слое после комбинированной обработки. Для удобства расчетов разработана компьютерная программа для вычисления параметра вычисления остаточных напряжений на языке Visual studio 2017 C#. Метод комбинированной обработки создает резерв для повышения эксплуатационных показателей за счет создания сжимающих остаточных напряжений.

Ключевые слова: комбинированная обработка, износ, цилиндрические пары трения, остаточные напряжения, эксплуатационные показатели

**DOI:** 10.31857/S0235711920020157

В народном хозяйстве широко используются машины и механизмы в которых работают пары трения (штоки, поршни, пробки, седла, золотники, пальцы, валки для размалывания неметаллических материалов). Это детали двигателей, насосов, прядильных машин, культиваторов и др., которые применяют в авиационной, строительной, автомобильной технике, сельхозтехнике и др. Из-за их низкой эксплуатационной надежности велик расход запасных частей. По данным центральных заводских лабораторий ОАО “КАДВИ”, ОАО “РемПутьМаш”, ОАО “Пермские моторы”, ОАО “Калужский турбинный завод” и др. при проведении плановых ремонтных работ 80% деталей имели повышенный износ. Установлено, что наибольшее число отказов (до 80%) обусловлено процессами изнашивания или комплексными причинами, где износ играет доминирующую роль.

Одной из основных особенностей работы цилиндрических пар трения является неравномерность изнашивания вдоль образующей, повышенный износ, вызванный условиями трения: импульсным приложением нагрузки, многократным перемещением контактирующих поверхностей, что приводит к пластическим деформациям, макрорезанию и в конечном итоге к потере работоспособности.

Эксплуатационные показатели определяются параметрами поверхностных слоев деталей: характеристиками точности формы; волнистостью; твердостью; остаточными напряжениями.

Они формируются под влиянием технологических факторов – режимов и методов обработки, инструмента, способов отделочно-упрочняющей обработки и влияния фактора наследственности.

Уровень остаточных напряжений является важным параметром, определяющим качество изделий, который может играть как положительную, так и отрицательную роль в изменении прочности, жесткости, устойчивости и износостойкости изделий, определяя тем самым их работоспособность при эксплуатации в различных видах и условиях нагружения [1–8].

Значительные остаточные напряжения могут возникать после механической обработки – точения, фрезерования, шлифования. Особенность этих напряжений состоит в том, что они действуют практически только в поверхностном слое глубиной в несколько десятых миллиметра. Но как показывает опыт эксплуатации, именно эти напряжения могут влиять на износостойкость и прочность детали, особенно при действии переменных напряжений [1–7].

Например, в поверхностном слое в процессе шлифования возникают сжимающие температурные напряжения, которые превосходят предел текучести материала и вызывают пластическую деформацию сжатия. После окончания процесса и установления нормальной температуры эта деформация сохраняется, что приводит к растяжению поверхностного слоя со стороны внутренних слоев, т.е. к образованию в нем растягивающих остаточных напряжений. На основании ряда экспериментальных исследований [5–7] можно считать, что после шлифования в поверхностном слое возникают растягивающие напряжения  $40\text{--}80\text{ кГ/мм}^2$ , на глубине  $20\text{--}50\text{ мкм}$ .

Технологические остаточные напряжения обуславливают качество и эксплуатационные характеристики металлопродукции [1, 3–5]. Существующие методики определения остаточных напряжений носят в основном экспериментальный характер, не обладают универсальностью, применение их зачастую затруднено и приводит к значительным погрешностям [6, 7].

В настоящей статье исследованы напряжения I рода, т.к. именно они являются наиболее значимыми с точки зрения практического применения.

В исследовании влияния остаточных напряжений на работоспособность деталей машин и механизмов внесли вклад Биргер И.А., Давиденков Н.Н., Кобрин М.М., Колмогоров Л.Г., Поздеев А.А., Сулов А.Г., Чепа П.А. и др.

В поверхностном слое металла всегда имеются различные дефекты, которые служат зародышами трещин, поэтому надежность деталей определяется величиной работы распространения трещины. Сжимающие остаточные напряжения, создаваемые на поверхности деталей различными технологическими методами, препятствуют зарождению и распространению усталостных микротрещин, увеличивая их работу. Поэтому для деталей, работающих в условиях трения скольжения, в случаях реализации усталостного и абразивного износа в процессе эксплуатации, важно создать поверхностный слой с сжимающими остаточными напряжениями [7, 8]. Перспективными методами являются методы комбинированной обработки.

Сущность комбинированной обработки заключается в последовательном выполнении электромеханической обработки (ЭМО) и алмазном выглаживании. С помощью этой технологии представляется возможным осуществить технологическое управление как геометрическими характеристиками, так и физико-механическими свойствами рабочих поверхностей пар трения [9–11].

Положительной особенностью комбинированной обработки является то, что величина и характер остаточных напряжений, полученных на предшествующих операци-

ях, не влияют на формирование напряжений и является барьером при технологической наследственности [12–17].

Экспериментальное определение остаточных напряжений трудоемко и не всегда возможно получить истинное значение. Поэтому актуальной задачей является нахождение аналитических методов, которые могут подтвердить или опровергнуть результат, полученный экспериментально.

На формирование остаточных напряжений при комбинированной обработке влияют температура, силовой фактор, характер структурных и фазовых превращений.

Фактически остаточные напряжения представляют собой алгебраическую сумму температурных, силовых и структурных напряжений [8, 17]

$$\sigma_{\text{ост}} = \sigma_{\text{темп}} + \sigma_{\text{ф}} + \sigma_{\text{мех}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\text{темп}}$  – температурные остаточные напряжения;  $\sigma_{\text{ф}}$  – структурно-фазовые остаточные напряжения;  $\sigma_{\text{мех}}$  – механические остаточные напряжения.

Температурные остаточные напряжения возникают в результате нагрева и последующего охлаждения обрабатываемой поверхности. Внешний слой металла нагреваясь в процессе комбинированной обработки стремится удлиниться, однако этому препятствует более холодный внутренний слой, следовательно, первый подвергается сжатию, а второй – растяжению. При интенсивном нагреве, когда сила тока превышает значение  $I = 500$  А напряжения на поверхности превзойдут предел текучести, что вызовет пластическую деформацию сжатия наружного слоя металла. Во время последующего охлаждения внешний слой стремится сжаться до размеров, меньше первоначальных на величину пластической деформации сжатия. Этому будет препятствовать упругонапряженный внутренний слой. В результате во внешнем слое возникнут остаточные напряжения, которые можно определить, преобразуя формулу [8, 17]

$$\sigma_{\text{темп}}(z) = \alpha E \Delta \Theta(z),$$

где  $z$  – текущая координата, определяющая глубину упрочненного поверхностного слоя, м;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения материала детали,  $\text{K}^{-1}$ ;  $\Delta \Theta(z)$  – максимальная температура на глубине поверхностного слоя детали  $z$ .

Максимальную температуру в зоне упрочнения можно представить

$$\begin{aligned} \Delta \Theta(z) = \infty E \frac{(1 - \alpha_T)(P_g V_p + N)}{\lambda_1 I_{\text{инс}} \sqrt{\pi}} & \left\{ \left( 1 - \frac{t}{\Delta t} \right) t \left[ 2\sqrt{at} * e^{\left( \frac{z^2}{4at} \right)} - \sqrt{\pi} * \operatorname{erfc} \left( \frac{z}{2\sqrt{at}} \right) \right] - \right. \\ & - \frac{1}{2a} \left( 1 - \frac{t}{\Delta t} \right) * \left[ \frac{(2\sqrt{at})^3 e^{\left( \frac{z^2}{4at} \right)}}{3} - \frac{4z^2 e^{\left( \frac{z^2}{4at} \right)} \sqrt{at}}{3} + \frac{2}{3} z^3 * \sqrt{\pi} \operatorname{erfc} \left( \frac{z}{2\sqrt{at}} \right) \right] - \\ & - \frac{1}{80a^2 \Delta t} \left[ (2\sqrt{at})^5 e^{\left( \frac{z^2}{4at} \right)} - \frac{2}{3} z^2 (2\sqrt{at})^3 * e^{\left( \frac{z^2}{4at} \right)} + \frac{4}{3} z^4 2\sqrt{at} * e^{\left( \frac{z^2}{4at} \right)} - \right. \\ & \left. \left. - \frac{4}{3} z^5 \sqrt{\pi} * \operatorname{erfc} \left( \frac{z}{2\sqrt{at}} \right) \right] \right\}. \quad (2) \end{aligned}$$

Большое влияние на формирование температуры будет оказывать мощность, которая возникает при прохождении электрического тока при электромеханической обработке. Ее можно представить, как

$$N = IU.$$

Формула (2) является сложной для расчетов и можно воспользоваться вариантом для приближительных расчетов

$$\Delta\Theta(z) = \infty E \frac{2\alpha_T (P_g V_p + IU)}{\lambda_1 A \sqrt{\pi}} \left\{ \sqrt{at} * e^{\left(\frac{z^2}{4at}\right)} - z \left[ 1 - \operatorname{erfcf} \left( \frac{z}{2\sqrt{at}} \right) \right] \right\}.$$

Сократим формулу

$$\Delta\Theta(z) = \infty E \frac{2\alpha_T (P_g V_p + IU)}{\lambda_1 A \sqrt{\pi}} \left( \sqrt{ate} e^{\left(\frac{-z^2}{4at}\right)} \right). \quad (3)$$

Т.к. величина  $z \left[ 1 - \operatorname{erfcf} \left( \frac{z}{2\sqrt{at}} \right) \right]$  является бесконечно малой и не оказывает существенного влияния на значение температуры на поверхности при комбинированной обработке.

В формуле (3):  $z$  – текущая координата, м;  $\alpha_T$  – коэффициент распределения тепловых потоков (коэффициент теплопоглощения Шарона);  $P_g$  – приведенная сила давления инструмента при комбинированной обработке, Н;  $V_p$  – скорость вращения детали, м/с;  $I$  – сила тока, А;  $U$  – напряжение, В;  $\lambda_1, \lambda_2$  – теплопроводность материала детали и инструмента соответственно, Вт м<sup>-1</sup> К<sup>-1</sup>;  $A = l_{\text{инс}} B$ ;  $B$  – ширина упругого контакта ролика по Герцу;  $l_{\text{инс}}$  – длина касания инструмента с обрабатываемой поверхностью (ширина ролика-электрода), м;  $a$  – температуропроводность материала детали, м<sup>2</sup>/с;  $t$  – время контакта, с.

При комбинированной обработке  $B$  – ширину упругого контакта ролика по Герцу, можно условно считать равной ширине ролика-электрода. Поэтому,

$$\Delta\Theta(z) = \infty E \frac{2\alpha_T (P_g V_p + IU)}{\lambda_1 l_{\text{инс}}^2 \sqrt{\pi}} \left( \sqrt{ate} e^{\left(\frac{-z^2}{4at}\right)} \right). \quad (4)$$

Рассчитать значение интеграла дополнительной функции ошибок можно по формуле

$$\operatorname{erfcf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-x^2} dx.$$

Однако, эта величина не оказывает существенного влияния на температуру в зоне контакта при комбинированной обработке.

Коэффициент распределения тепловых потоков  $\alpha_T$  можно найти по формуле [17]

$$\alpha_T = \frac{\sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1}}{\sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1} + \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}},$$

где  $\lambda_1, \lambda_2$  – теплопроводность материала детали и инструмента соответственно, Вт м<sup>-1</sup> К<sup>-1</sup>;  $\rho_1, \rho_2$  – плотность материала детали и инструмента соответственно, м<sup>3</sup>;  $c_1, c_2$  – удельная теплоемкость материала детали и инструмента соответственно, Дж кг<sup>-1</sup> К<sup>-1</sup>.

Структурно-фазовые остаточные напряжения  $\sigma_{\phi}$  определим по формуле [17]

$$\sigma_{\phi} = -E \left( 1 - \sqrt[3]{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \right), \quad (5)$$

где  $E$  – модуль упругости материала, Па;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотность материала до и после обработки соответственно.

Формула (5) показывает, если вновь образовавшаяся фаза имеет большой объем и, следовательно, меньшую плотность  $\rho_2$  по сравнению с  $\rho_1$ , на обработанной поверхности возникают остаточные напряжения сжатия. В противном случае возникают остаточные напряжения растяжения.

Если неизвестна плотность материала после обработки, то для расчета остаточных напряжений, при структурных изменениях (остаточный аустенит переходит в мартенсит) в поверхностном слое после комбинированной обработки воспользуемся формулой

$$\sigma_{\phi} = \frac{E}{3(1-\mu)} \frac{(P_{2\alpha} - P_{1\alpha})(\rho_{\gamma} - \rho_{\alpha})}{\rho_{\gamma} - P_{2\alpha}(\rho_{\gamma} - \rho_{\alpha})}, \quad (6)$$

где  $E$  – модуль упругости материала, Па;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $P_{1\alpha}$  – относительное содержание  $\alpha$ -фазы в поверхностном слое детали до обработки, %;  $P_{2\alpha}$  – относительное содержание  $\alpha$ -фазы в поверхностном слое детали после обработки, %;  $\rho_{\gamma}$  и  $\rho_{\alpha}$  – плотность  $\gamma$ - и  $\alpha$ -фаз соответственно.

Для простоты вычислений будем использовать формулу (5).

Механические остаточные напряжения возникают за счет действия на материал детали усилия со стороны инструмента при ЭМО и при алмазном выглаживании. В результате сжатия в поверхностном слое детали происходит упругопластическая деформация, которая приводит к увеличению плотности дислокаций и отдельного объема деформируемого слоя. Этому препятствуют слои, лежащие ниже. В результате такого взаимодействия в поверхностном слое возникают остаточные напряжения

$$\sigma_{\text{мех}}(z) = -\frac{P_g}{\pi} * \left[ \frac{3}{2(l_{\text{инс}}^2 + z^2)} - \frac{1.2}{l_{\text{инс}}^2} \ln \left( \frac{z}{2l_{\text{инс}}} \right) - \frac{3}{10l_{\text{инс}}^2} \right], \quad (7)$$

где  $z$  – текущая координата, м;  $P_g$  – приведенная сила давления, Н;

$$P_g = \sum_{i=1}^n P_i,$$

$P_i$  – сила прижима электрода-инструмента и алмазного выглаживателя, Н;  $l_{\text{инс}}$  – длина касания инструмента с обрабатываемой поверхностью (ширина ролика-электрода), м.

Ввиду того, что площадь касания алмазного выглаживателя и детали значительно меньше касания электрода-инструмента и детали, все расчеты ведем по большему значению.

Возникновение структурно-фазовых остаточных напряжений в поверхностном слое детали обусловлено структурно-фазовыми превращениями материала [8, 17]. В результате пластического деформирования резко увеличивается внутренняя энергия материала (около 10% затрачиваемой на деформацию энергии поглощается деформируемым материалом), что увеличивает вероятность протекания фазовых превращений.

В коррозионностойких аустенитных сталях, из которых изготавливают цилиндрические пары трения, при охлаждении или холодной пластической деформации происходит образование  $\alpha$ -фазы мартенситного типа. Количество образующегося мартенсита при данной температуре возрастает с увеличением степени деформации, а при увеличении температуры (т.е. при отдалении от точки мартенситного превращения

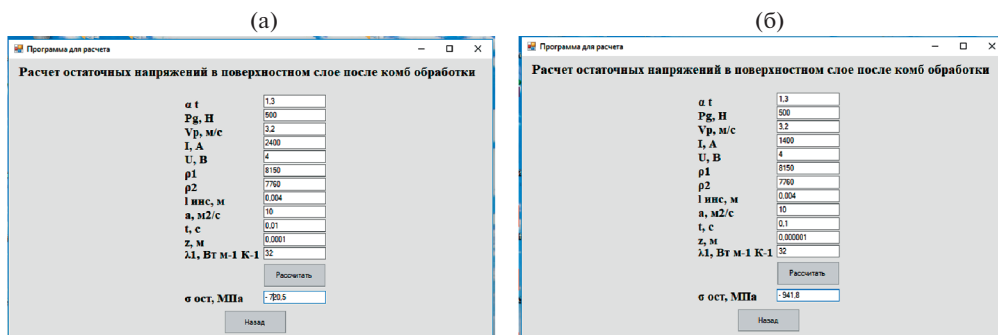


Рис 1. Варианты расчета остаточных напряжений в поверхностном слое цилиндрических пар трения.

$M_H$ ) интенсивность мартенситного превращения снижается [7, 8, 12–17]. Существует температура (точка  $M_D$ ) выше которой образование мартенсита деформации в аустенитных сталях невозможно даже при очень больших деформациях.

Таким образом, пластическая деформация интенсифицирует мартенситное превращение в коррозионностойких аустенитных сталях.

Подставляя (5), (6) и (7) в (1) получим формулу для расчета остаточных напряжений возникающих в поверхностном слое детали после комбинированной обработки

$$\sigma_{\text{ост}} = \infty E \frac{2\alpha_T (P_g V_p + IU)}{\lambda_2 l_{\text{инс}}^2 \sqrt{\pi}} \left( \sqrt{ate} \left( \frac{-z^2}{4at} \right) - \frac{P_g}{\pi} \left[ \frac{3}{2(l_{\text{инс}}^2 + z^2)} - \frac{1.2}{l_{\text{инс}}^2} \ln \left( \frac{z}{2l_{\text{инс}}} \right) - \frac{3}{10l_{\text{инс}}^2} \right] + E \left( 1 - \sqrt[3]{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \right) \right). \quad (8)$$

Для удобства расчетов разработана компьютерная программа для вычисления параметра остаточных напряжения по формуле (8) на языке Visual studio 2017 C#. Все данные заносятся в таблицу и на выходе получаем значение и знак остаточных напряжений в зависимости от режимов комбинированной обработки (рис. 1).

Таким образом, метод комбинированной обработки создает резерв для повышения эксплуатационных показателей за счет создания сжимающих остаточных напряжений (значения получаются со знаком “–” (рис. 1)).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поздеев А.А., Няшин Ю.И., Трусов П.В. Остаточные напряжения: теория и приложение. М. 1982. С. 112.
2. Косарев В.А., Азиков Н.С., Алипов А.Е. Методика решения физической нелинейных задач прочности конструкций с концентраторами напряжений // Авиационная промышленность. 2014. № 2. С. 26.
3. Investigation of non-local cracking in layered stainless steel with nanostructured interface / X. Guo, A.Y.T. Leung, A.Y. Chen, H.H. Ruan, J. Lu // Scripta Materialia. 2010. V. 63. Iss. 4. P. 403.
4. Haghpanah B., Nayeb-Hashemi H., Vaziri A. Elasto-plastic Stresses in a Functionally Graded Rotating Disk // ASME J. of Engineering Materials Technology. 2012. V. 134. Iss. 2. P. 021004.

5. A fast and accurate analysis of the interacting cracks in linear elastic solids / D.F. Li, C.F. Li, S.Q. Shu, Z.X. Wang, J. Lu // International Journal of Fracture. 2008. V. 151. P. 169.
6. Азиков Н.С., Гайдаржи Ю.В. Несущая способность косоугольных композиционных панелей // Ж. Конструкции из композиционных материалов. 2015. № 1 (137). С. 3.
7. Биргер И.А. Остаточные напряжения. Издание второе, М.: ЛЕНАНД, 2015, 234 с.
8. Албагачиев А.Ю., Преображенская Е.В. Исследование остаточных напряжений при совместной отделочно-упрочняющей обработке деталей машин. Материалы научно-технической конференции МГАПИ “Новые материалы и технологии”. М.: 2001. С. 19.
9. Яковлева А.П. Исследование свойств поверхностного слоя стальных деталей, упрочненных электромеханической обработкой // Ж. Авиационная промышленность. 2012. № 2. С. 8.
10. Яковлева А.П. Повышение ресурса работы пар трения металлорежущего оборудования. Сборник: Машиностроение: инновационные аспекты развития материалы I международной научно-практической конференции. 2018. С. 102.
11. Яковлева А.П. Эффективность применения комплексирования на токарных станках с ЧПУ // Справочник. Инженерный журнал. 2018. № 11. С. 36.  
<https://doi.org/10.14489/hb.2018.11.P.036>
12. Суслов А.Г. Инженерия поверхности деталей – резерв повышения конкурентности машин // Справочник. Инженерный журнал. 2001. № 4. Приложение. С. 3.
13. Безъязычный В.Ф. Влияние качества поверхностного слоя после механической обработки на эксплуатационные свойства деталей машин // Справочник. Инженерный журнал. 2001. № 4. С. 9.
14. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей машин, технологической оснастки и инструментов // Справочник. Инженерный журнал. 2000. № 1. С. 6.
15. Албагачиев А.Ю., Иревли С.В. Эффективные технологические методы обеспечения качества деталей машин. М.: МГАПИ, 2002. 120 с.
16. Албагачиев А.Ю., Иревли С.В. Ресурсосберегающий способ обработки деталей машин. Сборник трудов международной научно-практической конференции “Производство-технология-экология”. Т. 1. М.: МГТУ “СТАНКИН”. С. 15.
17. Фадеев П.Л., Албагачиев А.Ю. Повышение надежности деталей машин. М.: Машиностроение. 1993. 96 с.