

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КОНТАКТА ПРИ ПЛАКИРОВАНИИ ГИБКИМ ИНСТРУМЕНТОМ

© 2017

*А.В. Зотов*, кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей»  
*Н.В. Семенченко*, инженер-конструктор инновационно-технологического центра  
*И.Р. Галиев*, кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей»  
*Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)*

**Ключевые слова:** плакирование; гибкий инструмент; проволочный инструмент; метод эллиптических параметров; упругий стержень.

**Аннотация:** В статье рассмотрен новый эффективный высокопроизводительный метод совмещенной обработки поверхностей изделий машиностроения плакированием гибким инструментом (ПГИ), в качестве которого, как правило, используется дисковая проволочная щетка. ПГИ является комбинированным способом модификации поверхности обрабатываемого изделия, заключающимся в одновременном деформационном упрочнении поверхности и нанесении на нее покрытий из различных материалов, обладающих требуемыми функциональными характеристиками.

В статье представлена математическая модель определения геометрических и энергосиловых параметров зоны контакта при плакировании проволочным инструментом цилиндрических поверхностей обрабатываемых изделий. Модель построена посредством метода эллиптических параметров теории гибких упругих стержней. В основе модели лежит алгоритм расчетно-аналитического метода, содержащий цикл одновременного подбора угла, определяющего положение гибкого элемента в зоне контакта, и модулярного угла, входным параметром которого является ордината точки контакта в неподвижной системе координат.

Представлен анализ напряженного состояния ворса проволочного инструмента, являющегося базовым элементом плакирующих установок. Рассмотрено влияние конструктивных параметров проволочного инструмента и режимов плакирования на величину максимальных действительных напряжений, возникающих в ворсе при скольжении вдоль зоны контакта с обрабатываемым изделием. Представлены результаты моделирования напряженного состояния ворса проволочного инструмента в программе, реализующей метод конечно-элементного анализа и их сравнительный анализ с результатами расчета аналитическим методом. Максимальное расхождение значений напряжений, определенных по представленной математической модели и полученных посредством САЕ-анализа, составило 12 %.

### ВВЕДЕНИЕ

Ни в одной отрасли промышленности внедрение прогрессивных технологий и новой техники не дает столь быстрых и весомых результатов, как в машиностроении. В настоящий момент в структуре технологий машиностроения доля прогрессивных технологий составляет лишь 16–17 % [1]. Эффективность новых технологий оценивается по критериям ресурсосбережения, экологической безопасности, снижения трудоемкости, повышения прочности и износостойкости и увеличения точности обработки [2].

Всем перечисленным критериям отвечает комплекс новых технологий, целью которых является формирование поверхностного слоя обрабатываемых изделий с требуемыми эксплуатационными характеристиками посредством плакирования гибким (проволочным) инструментом (ПГИ) [3–7], в качестве которого, как правило, используется дисковая проволочная щетка.

ПГИ является комбинированным способом модификации поверхности обрабатываемого изделия, который заключается в одновременном деформационном упрочнении поверхности и нанесении на нее покрытий из различных материалов, обладающих своими функциональными характеристиками.

В настоящее время ПГИ используют при обработке изделий различного функционального назначения, таких как режущий инструмент [4; 8], зубчатые колеса и шестерни [9], детали технологического оборудования металлургического производства [3; 10], направляющие

скольжения металлорежущего оборудования [11; 12]. В большинстве случаев в основе модели определения контактных параметров заложены либо решения, основанные на экспериментальных предположениях о форме изгиба проволочки при ее скольжении вдоль зоны контакта – будь то парабола [13] или синусоида [3; 14], либо неоправданные допущения, заключающиеся в сведении задачи об упругой линии сильно изогнутой балки к анализу трехзвенного шарнирно-рычажного механизма [15] или эмпирическим зависимостям [16].

Так, в работе [17] предложена модель определения геометрических и энергосиловых характеристик зоны контакта гибкого инструмента с плоской поверхностью плакируемого изделия, основанная на методе эллиптических параметров теории гибких упругих стержней [18]. Производственная необходимость требует создания аналогичной модели обработки для условия цилиндрического контакта.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

На процесс термомеханического формирования поверхностного слоя при ПГИ существенное влияние оказывает участок скольжения сжато-изогнутого ворса по поверхности обрабатываемого изделия.

Выбор теории гибких упругих стержней основан на факте нелинейной зависимости перемещений при изгибе проволочных элементов инструмента в процессе нагружения при скольжении вдоль зоны контакта

с обрабатываемой цилиндрической поверхностью, хотя деформации остаются малыми и материал ворса гибкого инструмента работает упруго.

При варьировании параметров процесса ПГИ появляется возможность прогнозирования качественных характеристик обрабатываемых поверхностей (микротопография, остаточные напряжения, адгезия покрытия и т. д.), устанавливается взаимосвязь ключевых факторов (геометрических и энергосиловых), возникающих в процессе обработки, с входными параметрами процесса плакирования (натяг гибкого инструмента к обрабатываемой поверхности, диаметр ворса, вылет ворса и т. д.).

Специфическим в случае больших перемещений при изгибе обстоятельством является столь же большое перемещение векторов внешних сил и моментов, под действием которых происходит изгиб (рис. 1).

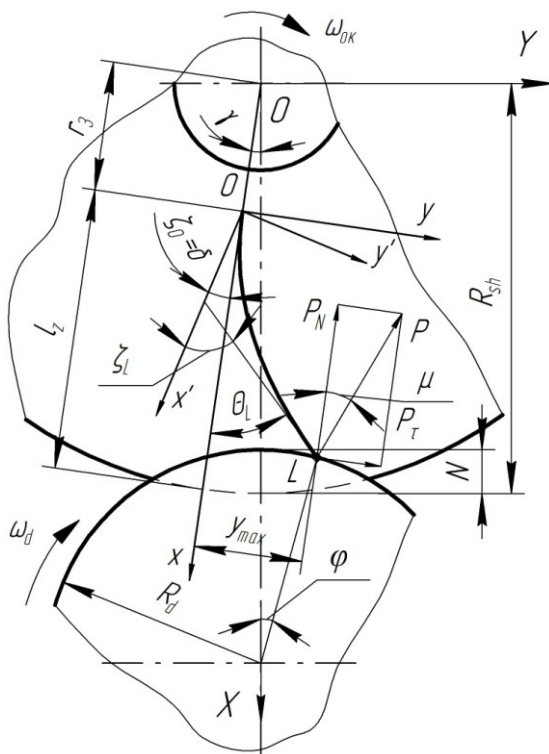


Рис. 1. Схема контакта ворса с обрабатываемой поверхностью

Алгоритм расчетно-аналитического метода выстроим на основе известной математической модели обработки плоских поверхностей [17] и акцентируем внимание на особенностях цилиндрического контакта.

Считаем, что коэффициент трения на всем протяжении зоны контакта постоянен, следовательно, постоянен и угол трения  $\mu$ .

Тогда угловой коэффициент подобия в точке  $o$  (рис. 1):

$$\zeta_{oi} = \mu \pm |\gamma_i| \pm |\varphi_i|,$$

где  $\mu$  – угол трения, град;

$\gamma_i$  – угол, определяющий положение гибкого элемента в зоне контакта, град;

$\varphi_i$  – угол, определяющий положение точки контакта на поверхности детали, град (на участке входа ворса в контакт – до оси  $X$  углы  $\gamma$  и  $\varphi$  положительные, далее до выхода ворса из контакта – отрицательные).

Угол входа ворса в контакт с цилиндрической поверхностью:

$$\gamma_{vh} = \arccos \frac{R_{sh}^2 + (R_{sh} + R_d - N)^2 - R_d^2}{2 \cdot R_{sh} \cdot (R_{sh} + R_d - N)},$$

где  $R_{sh}$  – радиус проволочного инструмента, мм;

$R_d$  – радиус обрабатываемой детали, мм;

$N$  – натяг ворса инструмента к обрабатываемой детали, мм.

Общий вид уравнений определения положения точки  $L$  в подвижной системе координат  $xoy$  (рис. 1):

$$x_{Li} = \left[ \left( \frac{2}{\beta} (E(\psi_{Li}) - E(\psi_{oi}) - 1) \right) \cos(\zeta_{oi}) + \frac{2}{\beta} k_i \cos(\psi_{oi}) \sin(\zeta_{oi}) \right] \cdot l_z, \quad (1)$$

$$y_{Li} = \left[ \frac{2}{\beta} k_i \cos(\psi_{oi}) \cos(\zeta_{oi}) - \left( \frac{2}{\beta} (E(\psi_{Li}) - E(\psi_{oi}) - 1) \right) \sin(\zeta_{oi}) \right] \cdot l_z$$

где  $\beta$  – силовой коэффициент подобия;

$E(\psi_o)$  – эллиптический интеграл Лежандра второго рода;

$E(\psi_L)$  – полный эллиптический интеграл Лежандра второго рода;

$l_z$  – длина изгибающейся части ворса, мм.

Максимальный прогиб ворса щетки  $y_{max}$  (рис. 1) соответствует наибольшему значению координаты  $y_{Li}$  (1) при скольжении проволочки.

Уравнения связи подвижной  $xoy$  и неподвижной  $XOY$  систем координат выразим через соотношения:

$$(R_{sh} + R_d - N - X_{Li})^2 + Y_{Li}^2 = R_d^2$$

$$X_{Li} = R_{sh} + R_d - N - \sqrt{R_d^2 - [(r_3 + x_{Li}) \sin(\gamma_i) + y_{Li} \cos(\gamma_i)]^2}$$

$$Y_{Li} = \pm \sqrt{N - R_{sh} + A} \cdot \sqrt{N - R_{sh} - 2R_d + A} \cdot j,$$

где  $r_3$  – радиус фиктивной заделки проволочки, мм;

$A = (r_3 + x_{Li}) \cdot \cos(\gamma_i) - y_{Li} \cdot \sin(\gamma_i)$  – коэффициент замещения;

$j$  – комплексная единица.

Теперь в соответствии с теорией гибких упругих стержней мы можем определить распределение контактной силы  $P_i$ , изгибающего момента  $M_i$ , напряжений изгиба  $\sigma_i$  проволочек по всей длине скольжения сжатого ворса гибкого инструмента [17]:

$$P_{Li} = \beta_i^2 \frac{EJ}{l_z^2} g^4, \quad (2)$$

где  $E$  – модуль упругости, МПа;  
 $J$  – осевой момент инерции площади поперечного сечения, мм<sup>4</sup>;  
 $g$  – коэффициент, учитывающий динамику вращения проволочного инструмента [19].

Изгибающий момент  $M_i$ , действующий на конец  $i$ -го гибкого элемента:

$$M_i = \frac{\omega_i}{\beta_i} \cdot P_{Li} \cdot l_z \quad (3)$$

Максимальные напряжения, возникающие в гибких элементах при деформационной обработке:

$$\sigma_{\max i} = \frac{\omega_i}{\beta_i} \cdot P_{\max i} \cdot l_z \cdot \frac{d_v}{2J} \quad (4)$$

где  $P_{\max i}$  – максимальная контактная сила на участке скольжения ворса, Н;  
 $d_v$  – диаметр ворса, мм.

Зная моменты  $i$ -х элементов (3), несложно определить суммарный вращающий момент в зоне контакта:

$$M = \sum_{i=1}^k M_i \cdot \frac{B}{d_v} \quad (5)$$

где  $B$  – ширина гибкого инструмента, мм.

Мощность двигателя инструмента, расходуемую в процессе плакирования с учетом (5), определим соотношением

$$N_{dv} = N_d + N_z,$$

где  $N_d$  – мощность двигателя, расходуемая в зоне плакирования, Вт;

$N_z$  – мощность двигателя, расходуемая в зоне контакта с элементом материала покрытия, Вт [3].

Таким образом, получена математическая модель расчета геометрических и энергосиловых параметров зоны контакта при плакировании цилиндрических изделий гибким инструментом, построенная на базе нелинейной теории больших перемещений при плоском изгибе тонких упругих стержней.

Для пояснения методики вычисления параметров модели был создан алгоритм, структурная схема которого представлена на рис. 2.

Согласно данному алгоритму, в первую очередь осуществляется ввод параметров режима обработки и конструктивных характеристик гибкого инструмента, а также координаты рассматриваемой ворсинки  $Y'_L$ . Следующим шагом для первого значения угла  $\gamma_i$ , определяющего положение гибкого элемента в зоне контакта, и связанного с ним углового коэффициента подбора  $\zeta_i$ , посредством циклического перебора значений производится подбор модулярного угла  $\alpha_i$  [20] до выполнения условия  $(R_{sh} + R_d - N - X_{Li})^2 + Y_{Li}^2 = R_d^2$ . Затем происходит проверка условия равенства заданной координаты рассматриваемой ворсинки  $Y'_L$  и рассчитанной координаты  $Y_L$ . В случае выполнения условия  $Y'_L = Y_L$  следует расчет и вывод требуемых параметров: контактной силы на участке скольжения  $P_{Li}$  (2), изги-

бающего момента  $M_i$  (3), напряжений изгиба  $\sigma_i$  (4), максимального прогиба ворса гибкого инструмента  $y_{\max}$  (1). Если же условие  $Y'_L = Y_L$  не выполнено, то угол  $\gamma_i$  уменьшается на величину шага, и цикл повторяется вновь. Если смотреть в целом, то данный алгоритм содержит цикл одновременного подбора угла, определяющего положение гибкого элемента в зоне контакта, и модулярного угла, входным параметром которого является ордината точки контакта в неподвижной системе координат.

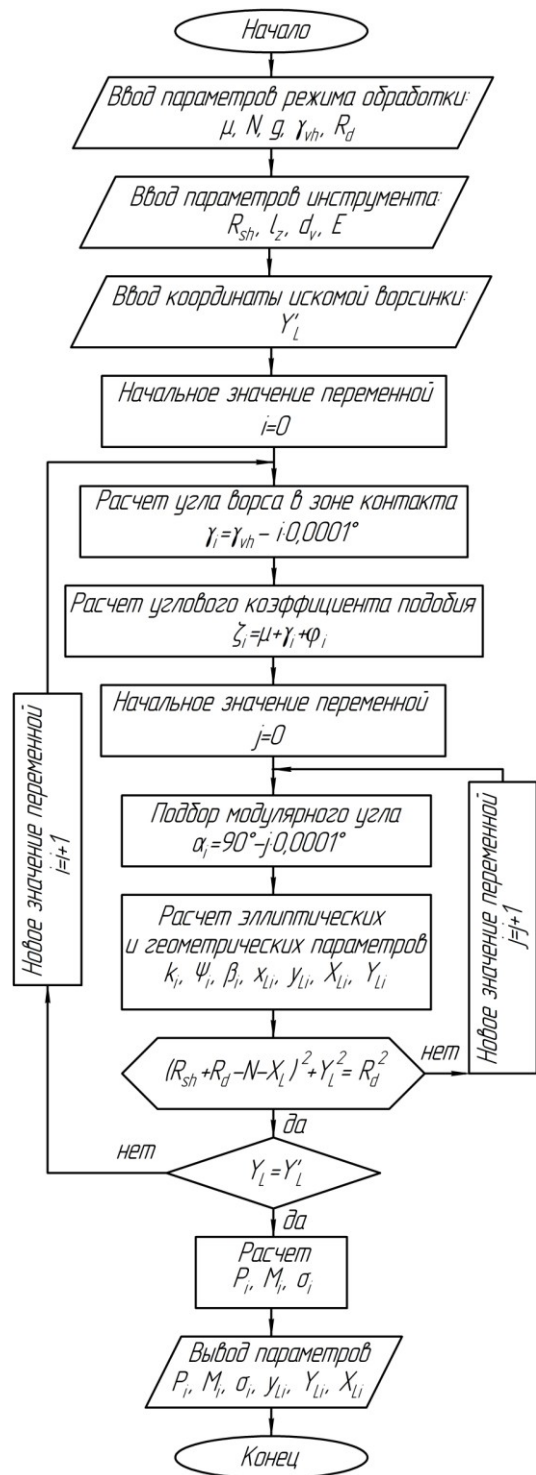


Рис. 2. Структурная схема алгоритма расчетно-аналитического метода

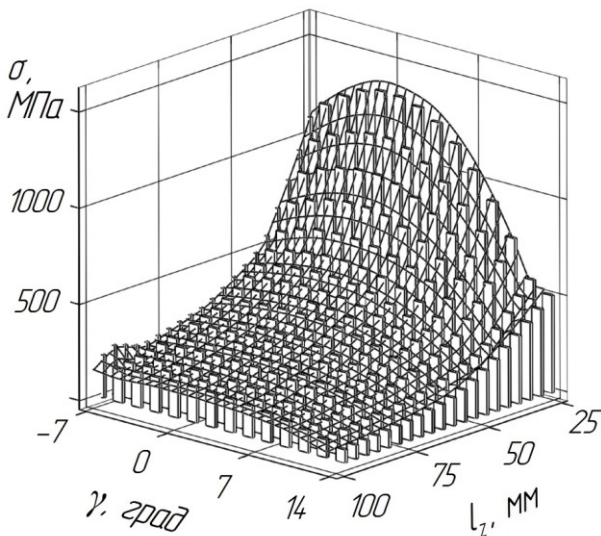
## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Закономерности приведенной выше модели проанализируем посредством САЕ-моделирования напряженного состояния вorsa проволоочного инструмента в программе *NX Advanced Simulation*.

В качестве объекта моделирования примем вorsa инструмента диаметром 0,2 мм, радиусом фиктивной заделки 100 мм при плакировании оловянной бронзой цилиндрической детали диаметром 200 мм, выдерживая натяг инструмента к обрабатываемой поверхности 1,5 мм и варьируя длину изгибающейся части вorsa от 25 до 100 мм.

На рис. 3 представлены зависимости напряжений от длины изгибающейся части вorsa при скольжении в процессе плакирования, выраженной через угол  $\gamma$ , определяющий положение гибкого элемента в зоне контакта.

По представленным зависимостям видно, что адекватность математической модели определения параметров зоны контакта посредством метода эллиптических параметров подтверждается моделированием в программе, реализующей расчет напряженного состояния посредством метода конечных элементов. Так, расхождение напряжений при варьировании длины изгибающейся части вorsa в среднем не превышает 7 %, а максимальное расхождение составляет 12 %.



**Рис. 3.** Зависимость напряжений, возникающих в гибких элементах, от длины изгибающейся части вorsa вдоль зоны контакта: сетчатый график – результаты САЕ-моделирования; столбчатый график – результаты аналитического расчета по алгоритму математической модели

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Создана математическая модель определения геометрических и энергосиловых параметров зоны цилиндрического контакта гибкого инструмента с обрабатываемым изделием на участке скольжения, основанная на точном решении дифференциального уравнения упругой линии методом эллиптических параметров те-

рии гибких упругих стержней. В основе модели лежит алгоритм расчетно-аналитического метода, содержащий цикл одновременного подбора угла, определяющего положение гибкого элемента в зоне контакта, и модулярного угла, входным параметром которого является ордината точки контакта в неподвижной системе координат.

Подтверждена адекватность приведенных закономерностей моделированием в программе, реализующей метод конечно-элементного анализа. Максимальное расхождение значений напряжений, определенных по представленной математической модели и полученных посредством САЕ-анализа, составило 12 %.

Данная модель была использована при назначении режимов плакирования плунжеров гидравлических прессов на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», что позволило вывести эксплуатационные режимы работы пары трения «плунжер – цилиндр» на оптимальные показатели.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов В.Н., Почекуева О.В. Инновационно-технологическое развитие машиностроения как фактор инновационного совершенствования обрабатывающей промышленности // Проблемы прогнозирования. 2009. № 4. С. 37–45.
2. Borisov V.N., Pochukaeva O.V. Innovative development of the engineering industry // Studies on Russian Economic Development. 2013. Vol. 24. № 1. С. 26–34.
3. Анцупов В.П. Теория и практика плакирования изделий гибким инструментом. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 1999. 241 с.
4. Завалишин А.Н., Смирнов О.Н., Тулупов С.А. Модификация поверхности металлических изделий с использованием покрытий. М.: Орбита-М, 2012. 336 с.
5. Belevskii L.S., Belevskaya I.V., Efimova Y.Y. Friction nanostructuring treatment of metallic surfaces and deposition of functional coatings using a flexible tool // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2015. Vol. 56. № 3. С. 359–364.
6. Belevskii L.S., Koptseva N.V., Belevskaya I.V., Efimova Y.Y. Deformation of a surface layer and coating application using a flexible tool // Russian metallurgy (Metally). 2015. № 9. С. 753–758.
7. Maksimchenko N.N. Frictional cladding by means of a flexible tool // Russian Engineering Research. 2013. Vol. 33. № 12. С. 692–696.
8. Анцупов В.П., Завалишин А.Н., Кадошников В.И., Дема Р.Р. Повышение стойкости режущего инструмента нанесением композиционных антифрикционных покрытий // Технология машиностроения. 2003. № 4. С. 25–26.
9. Basiniuk U.L., Levantsevich M.A., Maksimchenko N.N., Mardasevich A.I. Improvement of triboengineering properties and noise reduction of tooth gears by cladding functional coatings on working surfaces of interfaced teeth // Journal of Friction and Wear. 2013. Vol. 34. № 6. С. 438–443.
10. Платов С.И., Дема Р.Р., Зотов А.В. Модель формирования толщины плакированного слоя на деталях пар трения технологического оборудования // Вестник Магнитогорского государственного технического

- го университета им. Г.И. Носова. 2013. № 1. С. 69–72.
11. Леванцевич М.А., Максимченко Н.Н., Калач В.Н. Исследование влияния покрытий на антискачковые свойства направляющих скольжения // СТИН. 2012. № 9. С. 4–8.
  12. Зотов А.В., Драчев О.И., Расторгуйев Д.А. Относительная износостойкость пар смешанного трения скольжения, плакированных гибким инструментом // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 8. С. 12–17.
  13. Белевский Л.С., Санкин Ю.В. Анализ геометрических и энергетических параметров зоны контакта ворса металлической щетки с обрабатываемой поверхностью // Теория и практика производства метизов: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГМИ, 1989. Вып. 15. С.169–178.
  14. Кургузов Ю.И., Кургузов М.Ю. Упрочнение кромок лопаток рабочих колес газотурбинных двигателей // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2010. № 4. С. 120–127.
  15. Проскуряков Ю.Г., Ершов В.С. Исследование зоны контакта механической щетки с обрабатываемым изделием // Исследование технологических процессов упрочняюще-калибрующей и формообразующей обработки металлов: межвуз. сб. Ростов н/Д., 1970. С. 144–154.
  16. Перепичка Е.В. Очистно-упрочняющая обработка изделий щетками. М.: Машиностроение, 1989. 136 с.
  17. Зотов А.В. Методика расчета геометрических и силовых параметров зоны контакта при плакировании изделий гибким инструментом // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2012. № 3. С. 85–88.
  18. Попов Е.П. Теория и расчет гибких упругих стержней. М.: Наука, 1986. 296 с.
  19. Кургузов Ю.И., Папшев Д.Д. Технологическое обеспечение качества поверхности при упрочнении механическими щетками // Вестник машиностроения. 1986. № 4. С. 54–58.
  20. Бобровский А.В., Зотов А.В., Семенченко Н.В. Расчет параметров цилиндрического контакта при плакировании гибким инструментом : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014612919, 20.04.2014.
- surfaces using coatings]. Moscow, Orbita-M Publ., 2012. 336 p.
5. Belevskii L.S., Belevskaya I.V., Efimova Y.Y. Friction nanostructuring treatment of metallic surfaces and deposition of functional coatings using a flexible tool. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2015, vol. 56, no. 3, pp. 359–364.
  6. Belevskii L.S., Koptseva N.V., Belevskaya I.V., Efimova Y.Y. Deformation of a surface layer and coating application using a flexible tool. *Russian metallurgy (Metally)*, 2015, no. 9, pp. 753–758.
  7. Maksimchenko N.N. Frictional cladding by means of a flexible tool. *Russian Engineering Research*, 2013, vol. 33, no. 12, pp. 692–696.
  8. Antsupov V.P., Zavalishchin A.N., Kadoshnikov V.I., Dema P.P. Hardening of cutting tool by applying composite anti-friction coatings. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2003, no. 4, pp. 25–26.
  9. Basiniuk U.L., Levantsevich M.A., Maksimchenko N.N., Mardasevich A.I. Improvement of tribengineering properties and noise reduction of tooth gears by cladding functional coatings on working surfaces of interfaced teeth. *Journal of Friction and Wear*, 2013, vol. 34, no. 6, pp. 438–443.
  10. Platov S.I., Dema R.R., Zotov A.V. Model of the formation thickness clad layer for friction pairs of process equipment. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2013, no. 1, pp. 69–72.
  11. Levantsevich M.A., Maksimchenko N.N., Kalach V.N. The study of influence of coatings on the anti-spike properties of plain slideways. *STIN*, 2012, no. 9, pp. 4–8.
  12. Zotov A.V., Drachev O.I., Rastorguyev D.A. Relative wear resistance of couples of slide mixed friction coated using flexible tool. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 8, pp. 12–17.
  13. Belevskiy L.S., Sankin Yu.V. The analysis of geometry and energy parameters of contact area of hog bristles with treated surface. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov "Teoriya i praktika proizvodstva metizov"*. Magnitogorsk, MGMI Publ., 1989. Vyp. 15, pp. 169–178.
  14. Kurguzov Yu.I., Kurguzov M.Yu. Hardening of blades' edges of the driving wheel gas-turbine engines. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskkiye nauki*, 2010, no. 4, pp. 120–127.
  15. Proskuryakov Yu.G., Ershov V.S. The study of contact area of mechanical brush with treated goods. *Mezhvuzovskiy sbornik "Issledovaniye tekhnologicheskikh protsessov uprochnyayushche-kalibruyushchey i formobrazuyushchey obrabotki metallov"*. Rostov-on-Don, 1970, pp. 144–154.
  16. Perepichka E.V. *Ochistno-uprochnyayushchaya obrabotka izdeliy shchetkami* [Cleaning-and-strengthening treatment of goods using hogs]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 136 p.
  17. Zotov A.V. Design procedure geometrical and power parameters of the contact zone in cladding articles by flexible tool. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 3, pp. 85–88.

## REFERENCES

1. Borisov V.N., Pochekueva O.V. Innovative technological development in machine building as a factor of innovative improvement in manufacturing. *Problemy prognozirovaniya*, 2009, no. 4, pp. 37–45.
2. Borisov V.N., Pochukaeva O.V. Innovative development of the engineering industry. *Studies on Russian Economic Development*, 2013, vol. 24, no. 1, pp. 26–34.
3. Antsupov V.P. *Teoriya i praktika plakirovaniya izdeliy gibkim instrumentom* [Theory and practice of cladding goods using flexible tool]. Magnitogorsk, MGTU im. G.I. Nosova Publ., 1999. 241 p.
4. Zavalishchin A.N., Smirnov O.N., Tulupov S.A. *Modifikatsiya poverkhnosti metallicheskikh izdeliy s ispolzovaniyem pokrytiy* [Modifying of metal good

18. Popov E.P. *Teoriya i raschet gibkikh uprugikh sterzhney* [Theory and calculation of elastic rods]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 296 p.
19. Kurguzov Yu.I., Papshev D.D. Technology support of surface quality when hardening with hogs. *Vestnik mashinostroeniya*, 1986, no. 4, pp. 54–58.
20. Bobrovskiy A.V., Zotov A.V., Semenchenko N.V. *Raschet parametrov tsilindricheskogo kontakta pri plakirovanii gibkim instrumentom* [Calculation of cylinder contact parameters when cladding using flexible tool]. Certificate of official registration of a computer program no. 2014612919, 2014.

**SIMULATION OF PARAMETERS OF CYLINDER CONTACT AREA  
WHEN CLADDING WITH FLEXIBLE TOOL**

© 2017

*A.V. Zotov*, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Cars design and operation”  
*N.V. Semenchenko*, design engineer of Innovation and Technology Centre  
*I.R. Galiev*, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Cars design and operation”  
*Togliatti State University, Togliatti (Russia)*

*Keywords:* cladding; flexible tool; wire tool; elliptic parameters method; elastic rod.

*Abstract:* The paper considers new effective high production method of combined treatment of surfaces of machine industry goods using cladding with a flexible tool (CFT). As a rule, a wire wheel brush is used as such flexible tool. CFT is a combined method of modifying the surface of treated item involving the simultaneous deformational strengthening of surface and applying of coatings made of various materials with required functional properties. The paper presents the mathematical model of determining the geometry and energy parameters of the contact area when using cladding of cylindrical surfaces of treated items with a wire tool. The model is designed using the elliptic parameters method of the elastic rods theory. The model is based on the algorithm of the computational and analytical method containing the cycle of simultaneous selection of the angle identifying the position of a flexible element in the contact area and the modular angle the input parameter of which is the ordinate of the contact point in the fixed system of reference.

The paper presents the analysis of the stressed state of wire tool bristles, which is the basic element of cladding assemblies. The authors considered the influence of wire tool design parameters and the cladding modes on the values of maximum actual stresses that occur in the bristles when sliding along the area of contact with the treated item. The paper presents the results of modeling of the stressed state of the wire tool bristles in the program implementing the method of finite element analysis and their comparative analysis with the results of calculation using the analytical method. Maximum discrepancy between the stress values calculated according to the proposed mathematical model and obtained using CAE-analysis was 12 %.