

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБКАТЫВАНИЯ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РОЛИКАМИ

*Борис Бутаков<sup>1</sup>, Александра Зубехина-Хайят<sup>2</sup>*

<sup>2</sup>*Николаевский национальный аграрный университет  
Ул. Парижской коммуны, 9, г. Николаев, Украина. E-mail: [mayla-robot@mail.ru](mailto:mayla-robot@mail.ru)*

*Boris Butakov<sup>1</sup>, Alexandra Zubehina-Hayat<sup>2</sup>*

<sup>2</sup>*Nikolaev National Agrarian University  
St. Paris Commune, 9, Nikolaev, Ukraine. E-mail: [mayla-robot@mail.ru](mailto:mayla-robot@mail.ru)*

**Аннотация.** В статье описана технология процесса обкатывания гибкими игольчатыми роликами резьб с широкой впадиной и архимедовых червяков. Предложен способ обкатывания резьб и червяков с большими углами подъема линии витка.

Разработанные технология и устройства внедрены в производство на ОАО «Николаевский глиноземный завод». На устройство для раскатывания нежестких втулок гибкими игольчатыми роликами подана заявка на патент Украины. С помощью теоретических и экспериментальных исследований показано, что с учетом жесткости системы станок-инструмент-деталь, стабилизации усилия обкатывания, локализации пластической деформации в тонком поверхностном слое удалось достичь оптимальных режимов обкатывания и за счет этого расширить номенклатуру обкатываемых и раскатываемых деталей.

Повышение качества и надежности машин и их элементов является одной из важных и первоочередных задач современного этапа развития отечественного машиностроения. Эта проблема может быть решена с помощью разработки и освоения эффективных методов упрочнения деталей машин и повышения их долговечности.

С целью повышения износостойкости пар трения, контактной и усталостной прочности деталей широко применяется поверхностная пластическая деформация обкаткой их роликами. Реализация оптимального основного режима обкатки (рабочего усилия) связана с жесткостью технологической системы станок-инструмент-деталь. В смысле сохранения оптимального режима обкатки представляет опасность не столько снижение жесткости, сколько ее непостоянство.

**Ключевые слова:** шероховатость, обкатывание, кривизна винтовой поверхности, жесткость, поверхностное пластическое деформирование, гибкие ролики.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

На ремонт и восстановление работоспособности машин расходуются большие материальные и трудовые ресурсы, это объясняется низкой прочностью поверхностного слоя сопряженных деталей машин,

который составляет долю процента от всей массы деталей. Для повышения долговечности машин решающее значение имеет упрочнение поверхности деталей в процессе их изготовления. Во многих случаях работоспособность деталей машин и оборудования определяется главным образом их сопротивлением износу. Поэтому повышение износостойкости элементов машин и аппаратов имеет большое значение для повышения их долговечности.

Увеличение прочности и твердости металла поверхностным наклепом, а также прирост опорной поверхности при обкатке роликами дает возможность рассматривать его как один из эффективных способов повышения работоспособности и исключительно износостойкости деталей машин.

При трении со смазкой большое значение имеет способность трущихся поверхностей, хранить под нагрузкой масляную пленку, которая предотвращает возникновение точек непосредственного контакта металлических поверхностей. Результаты многих исследований показывают, что обкатанные поверхности обладают повышенной несущей способностью. Нагрузка заедания обкатанных стальных и чугуновых роликов в паре со стальными обоймами в среднем на 20% выше, чем шлифованных.

Очень большая проблема возникает при получении оптимальной шероховатости поверхности, на токарных и зуборезных станках, во время обработки сложных поверхностей винтов, червяков, зубчатых колес. Для повышения износостойкости пар трения предлагается упрочнение методом поверхностно-пластической деформации.

С целью повышения износостойкости пар трения, контактной и усталостной прочности деталей широко применяется поверхностная пластическая деформация обкатыванием их роликами. Реализация оптимального основного режима обкатывания (рабочего усилия) связана с жесткостью технологической системы станок-инструмент-деталь. В смысле сохранения оптимального режима обкатывания представляет опасность не столько снижение жесткости, сколько ее непостоянство.

Задачей теоретических исследований является разработка способов и технологии обкатывания роликами деталей сельскохозяйственных машин с уче-

том жесткости технологической системы. При этом необходимо исключить появление волнистости поверхности в процессе обкатывания, что позволит объединить упрочняющее и чистовое обкатывание и повысить эффективность упрочнения.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

При изготовлении и эксплуатации деталей машин на их поверхностях образуются неровности и микронеровности, а слой металла, непосредственно прилегающий к поверхности, имеет нередко новые структуру, фазовый и химический состав по сравнению с сердцевиной, в нем возникают остаточные напряжения [1]. В условиях эксплуатации этот слой подвергается наиболее сильному физико-химическому воздействию: механическому, тепловому, магнитоэлектрическому, световому, химическому и др. [2 - 4]. Часто разрушение деталей начинается с поверхности, например при изнашивании, эрозии, кавитации, усталости, контактной усталости и многих других случаях. Поэтому к поверхностному слою предъявляются более высокие требования, чем к глубинным слоям детали.

Одним из эффективных и простых методов упрочнения поверхностного слоя является метод ППД. Детали небольших размеров, особенно закаленных, обычно обрабатывают шариковыми обкатниками или алмазными выглаживателями [5 - 7]. Для интенсификации ППД применяют ультразвуковое [8, 9] или ударное [10] обкатывание. В массовом производстве часто используется ротационная обработка шариками или роликами [11, 12]. При изготовлении деталей точной механики и оптики, а также измерительного инструмента для получения требуемого микрорельефа применяют вибронакатывание [13, 14]. Для упрочняющего и чистового обкатывания крупных деталей в тяжелом машиностроении широкое применение находят устройства с цилиндрическими, торо- и бочкообразными роликами [15].

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Номенклатура резб и червяков, которые могут обкатываться цилиндрическими роликами с прямолинейной образующей, ограничивается предельной величиной кривизны винтовой поверхности в плоскости роликов. Эта кривизна зависит от диаметра, углов подъема линии витка и профиля резьбы.

Обкатывание винтовых поверхностей с положительной кривизной в плоскости роликов моделировалось обкатыванием конусов, а поверхностей с отрицательной кривизной - обкатыванием гипербо-

Для моделирования взяты архимедовы червяки с модулями 10-24 мм, имеющие большие углы подъема линий витка. Трапецеидальные и упорные резьбы, имеющие значительно меньшие углы подъема линии витка и менее глубокие впадины, не моделировались.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Крупные упорные резьбы обкатываются самоустанавливающимися цилиндрическими роликами малого диаметра [16]. При обкатывании резб с большими углами подъема плоскость роликов поворачивают вокруг оси, проходящей через середину впадины резьбы на угол  $\lambda_p$  (рис.1, а), в общем случае отличающийся от угла подъема резьбы  $\lambda$ . Кроме этого плоскость роликов смещают относительно осевого сечения детали на величину  $h$ , достаточную для образования угла  $\beta$  между плоскостью роликов и образующей резьбы на среднем диаметре нарезки. При  $\beta = 6^\circ$  создается составляющая силы, поджимающая ролики к корпусу приспособления. Смещение и разворот плоскости роликов приводят к появлению конечной (положительной или отрицательной) кривизны профиля резьбы в плоскости роликов.

Номенклатура резб и червяков, которые могут обкатываться цилиндрическими роликами, исходя из возможности их деформации по всей глубине профиля, определялась экспериментально обкатыванием моделей.

Обкатывание винтовых поверхностей с положительной кривизной в плоскости роликов моделировалось обкатыванием конусов, а поверхностей с отрицательной кривизной - обкатыванием гипербо-

При обкатывании моделей сохранены следующие параметры процесса: а) кривизна обкатываемой поверхности в плоскости роликов; б) величина относительного скольжения в контакте ролика с деталью.

Кривизна винтовой поверхности ( $K_v$ ) в плоскости роликов рассчитана нами в работе [16]. Радиус кривизны ( $R_v$ ) поверхности конуса в плоскости ролика ( $X_2Z_2$ , рис. 2), полученной поворотом на угол  $\beta$  осевого сечения конуса вокруг перпендикуляра к его образующей, определится с учетом формулы Эйлера [17]

$$R_k = \frac{r_{cp}}{\sin \alpha_k \cdot \sin^2 \beta} \quad (1)$$

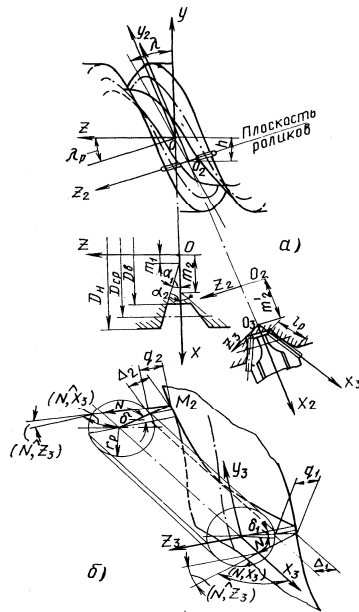
где  $r_{cp}$  - средний радиус конуса;  
 $\alpha_k$  - угол при основании конуса.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБКАТЫВАНИЯ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РОЛИКАМИ

Из условия сохранения относительного скольжения в направлении, перпендикулярном оси ролика, имеем:

$$r_{cp} = \frac{D_{cp} \cdot \sin \alpha_k}{2 \cos \alpha} \quad (2)$$

где  $D_{cp}$  - средний диаметр и угол профиля резьбы.



**Рис.1.**Обкатывание резьб с большими углами подъема  
**Fig.1.**Rolling threads with large angles of ascent

Угол конуса ( $\alpha_k$ ), с учетом (1) и (2) при  $R_k = 1 / K_b$  определится

$$\alpha_k = \arctg \left[ \frac{D_{cp} \cdot K_b}{2 \cos \alpha \cdot \sin^2 \beta} \right] \quad (3)$$

Из решения геометрической задачи пересечения цилиндра с винтовой и конической поверхностями определим значение длин контакта ролика с поверхностью резьбы и макета, отношение этих значений равно коэффициенту уточнения ( $K_v$ ). С учетом [16] записываются уравнения винтовой поверхности в системе координат  $X_3 Y_3 Z_3$  (рис. 1, а), где  $X_3$  является осью ролика. Расстояния  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  между точками  $M_1$  и  $M_2$  винтовой поверхности соответственно на наружном и внутреннем диаметре резьбы и поверхностью ролика при точечном контакте ролика с поверхностью резьбы на среднем диаметре нарезки (рис.1, б) определяется:

$$\Delta = \left| \frac{Z_3 \sin(N X_3)}{\cos(N Z_3)} \right| - r_p,$$

где  $r_p$  - радиус ролика;

$N X_3$  и  $N Z_3$  - соответственно углы между осями  $X_3$  и  $Z_3$  и нормалью  $N$  к винтовой поверхности, проходящей через точки  $M_1$  и  $M_2$  и ось  $X_3$ .

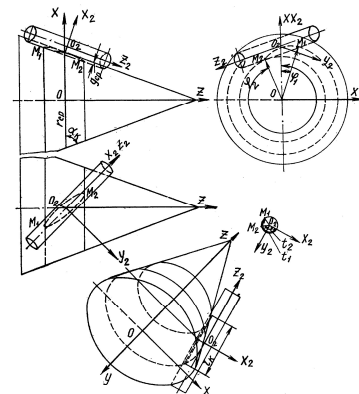
Величина вдавливания ролика в направлении оси  $Z_3$  до момента касания поверхностью ролика точек  $M_1$  и  $M_2$  винтовой поверхности

$$q_{cp} = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta_1}{\cos \delta_1} + \frac{\Delta_2}{\cos \delta_2} \right),$$

где углы  $\delta_1$  и  $\delta_2$  определяются равенством

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{Y_3}{Z_3}.$$

Длина контакта ролика ( $l_p$ ) с винтовой поверхностью определяется как разность абсцисс  $X_3$  точек  $M_1$  и  $M_2$ .



**Рис. 2.**Схема к расчету длины контакта ролика с конической поверхностью макета  
**Fig. 2.**Scheme of the calculation of the length of the contact roller with a conical surface layout

Координаты  $X_3, Y_3, Z_3$  точек  $M_1$  и  $M_2$  определяются при совместном решении уравнений винтовой поверхности и уравнения нормали  $N$ .

Длина контакта ролика с конической поверхностью макета ( $l_p$ ), измеренная в направлении оси ролика, рассчитывается совместным решением уравнений цилиндра и конуса в системе координат  $X_3 Y_3 Z_3$ , связанной с осью ролика, при условии вдавливания ролика в конус на величину  $q_{cp}$  (рис. 2) и равна разности координат  $Z_3$  точек  $M_1$  и  $M_2$  конической поверхности.

Гиперболоид, служащий моделью винтовой поверхности с отрицательной кривизной в плоскости роликов, образуется при механической обработке прямолинейной режущей кромкой резца. Режущая кромка, первоначально совпадающая с образующей конуса с углом у основания  $\alpha_2$ , поворачивается

тся вокруг перпендикуляра к образующей конуса на угол  $\gamma_p$  (рис. 3). При вращении детали коническая поверхность за счет срезания припуска превращается в гиперboloид со средним радиусом  $R_2$ .

Плоскость ролика при обкатывании гиперboloида образует с его осевым сечением угол  $\beta = 6^\circ$ . Кривизна сечения гиперboloида плоскостью ролика в точке  $M$  в соответствии с [17] определится:

$$\frac{1}{R} = \frac{\cos^2 \beta}{R_1} + \frac{\sin^2 \beta}{R_2}, \quad (4)$$

где  $R_1$  - радиус кривизны образующей гиперboloида;

$R_2$  - радиус кривизны сечения, нормального к образующей.

Применив формулу (4) к линии режущей кромки, получим:

$$\frac{\cos^2 \gamma_2}{R_1} + \frac{\sin^2 \gamma_2}{R_2} = 0, \quad (5)$$

Решив совместно уравнения (4) и (5) при  $R_2 = \frac{r_2}{\sin \alpha_2}$  с учетом  $\frac{1}{R} = K_B$ , получим формулу для

расчета угла поворота режущей кромки резца

$$\gamma_p = \arctg \left[ \sqrt{\frac{\lg^2 \beta - \frac{r_2 \cdot R_B}{\cos^2 \beta \cdot \sin \alpha_2}}{\cos^2 \beta \cdot \sin \alpha_2}} \right] \quad (6).$$

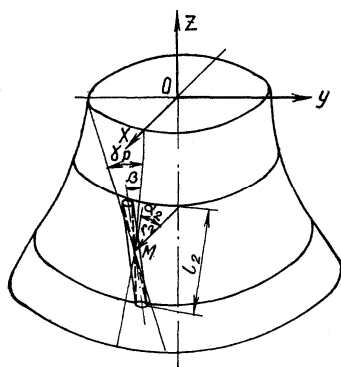


Рис. 3. Схема превращения конической поверхности в гиперboloид.

Fig. 3. Scheme conversion conical surface in hyperboloid.

Значения  $r_2$  в формуле (6) принимаются равными значениям радиусов  $r_{cp}$ , вычисленным по формуле (2) при  $\alpha_k = \alpha_2 = 60^\circ$ . Геометрические разме-

ры моделей  $r_k$ ,  $r_2$ ,  $\alpha_k$  и коэффициент уточнения  $K_y$  рассчитывались на ЭВМ.

Обкатывание моделей, изготовленных в соответствии с этим расчетом из улучшенных сталей 40X и 34XНМ, производилось устройством с самоустанавливающимся цилиндрическим роликом на токарном станке. Каждая модель обкатывалась несколькими значениями усилия, верхняя граница которого определялась по появлению шелушения металла на обкатываемой поверхности при 5-м проходе.

В результате этой работы экспериментально определены оптимальные усилия обкатывания резьб и червяков и показано, что цилиндрическими роликами можно обкатать практически все резьбы с углом подъема  $\lambda$  не более  $10^\circ$ . Обкатывание резьб

и червяков с углами подъема линии витка  $\lambda > 10^\circ$  по всей глубине профиля нами предложено производить гибкими игольчатыми роликами. На предложенное решение получены патент Украины на изобретение и патент Украины на полезную модель [18].

## ВЫВОДЫ

1. Проведено физическое моделирование обкатывания винтовых поверхностей, игольчатыми роликами. Выпуклые поверхности моделировались конусами, вогнутые – однополостными гиперboloидами. При этом соблюдалось равенство кривизны контактирующих тел и скорость проскальзывания в зоне деформации. Установлено, что игольчатыми роликами можно обкатывать с деформацией по всей глубине профиля архимедовы червяки с углом подъема линии витка  $\lambda < 10^\circ$ .
2. Предложено обкатывать архимедовы червяки с  $\lambda > 10^\circ$  гибкими игольчатыми роликами, на устройство для этой цели получены патент Украины на изобретение и патент Украины на полезную модель.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Одинцов Л.Г. 1987.** Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 328.
2. **Власов В.М. 1987.** Работоспособность упрочненных трущихся поверхностей. М.: Машиностроение, 304.
3. **Гаркунов Д.Н. 1985.** Триботехника. М.: Машиностроение, 424.
4. **Фролов К.В. 1984.** Методы совершенствования машин и современные проблемы машиноведения. М.: Машиностроение, 224.
5. **Папшев Д.Д. 1978.** Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 152.

6. **Огнивец В.А., Кочергин Е.З. 1984.** Изготовление деталей с применением малоотходной технологии. Киев: Техника, 150.
7. **Одинцов Л.Г. 1981.** Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием. М.: Машиностроение, 160.
8. **Марков А.И. 1980.** Ультразвуковая обработка материалов. М.: Машиностроение, 238.
9. **Абрамов О.В., Горбенко И.Г., Швекла Ш. 1984.** Ультразвуковая обработка материалов. М.: Машиностроение; Братислава: Арта, 276.
10. **Олежик Н.В., Кучин В.П., Луговской А.Л. 1984.** Поверхностное динамическое упрочнение деталей машин. Киев: Техника, 152.
11. **Коновалов Е.Г., Сидоренко В.А. 1968.** Чистовая и упрочняющая ротационная обработка поверхностей. Минск: Высшая шк., 364.
12. **Жасимов М.М. 1986.** Управление качеством деталей при поверхностном пластическом деформировании. Алма-Ата: Наука, 208.
13. **Шнейдер Ж.Г. 1982.** Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. Л.: Машиностроение, 248.
14. **Рыжов Е.В., Суслов А.Ж., Федоров В.П. 1979.** Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. М.: Машиностроение, 170.
15. **Браславский В.М. 1975.** Технология обкатки крупных деталей роликами. М.: Машиностроение, 160.
16. **Бабей Ю.И., Бутаков Б.И., Сысоев В.Г. 1995.** Поверхностное упрочнение материалов. Киев: Наук. думка, 104 с.
17. **Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. 1956.** Справочник по математике. М., Техиздат.
18. **Бутаков Б.И., Зубехина А.В. 2013.** Патент Украины на изобретение UA 101718 МПК V24V 39/04 (2006.01), B21H 3/00. Устройство для обкатывания крупных резьб и архимедовых червяков роликами. Заявл. 18.07.2011, номер заявки: а201108944; опубл. 25.04.2013, Бюл. № 8.

### **PROCESS MODELING ROLLING SCREW ROLLER SURFACES**

**Summary.** The article describes the process technology rolling flexible needle rollers of threads with a broad trough and Archimedean worms. A method of rolling threads and worms with greater angles of rise spiral line.

The developed technology and devices are introduced in production at JSC «Nikolaev Alumina Plant». In the device for rolling non-rigid flexible bushings needle rollers patent pending Ukraine. With the help of theoretical and experimental studies have shown that taking into account the stiffness of the system machine-tool-part, stabilization rolling efforts, localization of plastic deformation in a thin surface layer achieved the optimal mode rolling and thus expand the range of run-in and rolled parts.

Improving the quality and reliability of the machines and their components is an important and urgent tasks of the present stage of development of domestic engineering. This problem can be solved by developing and strengthening the development of effective methods of machine parts and increase their durability.

To increase the wear resistance of friction pairs, and contact fatigue strength of parts widely used surface plastic deformation of break-rollers. Implementation of the best break-in main mode (work force) linked to the rigidity of the technological system machine-tool-workpiece. In the sense of preserving the best mode break-a danger not only reduce stiffness, as its volatility.

**Key words:** roughness, rolling, the curvature of the screw surface hardness, surface plastic deformation, flexible rollers.