

**\*Витренко В. А., Ефимов А. А., Михайлова А. Д., Стоянов А. А.**  
Луганский государственный университет имени Владимира Даля  
\*E-mail: vitrenko.vl@gmail.com

## РАЗРАБОТКА НАКАТНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ НАКАТКИ ДЕТАЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

*В представленной работе авторами разработана схема формообразования накатного инструмента, применяемого для накатки осей и зубчатых колес подвижного состава. Изготовление инструмента осуществляется по схеме формообразования третьего класса на серийном станочном оборудовании при помощи цилиндрических и зубчатых инструментальных поверхностей. Наружная поверхность такого инструмента имеет гиперболоидную форму. В процессе формообразования инструмента относительное движение в станочном зацеплении обусловлено двумя независимыми параметрами, такими как: движение обкатки и движение подачи вдоль прямолинейной образующей изготавливаемой заготовки.*

**Ключевые слова:** накатник, гиперболоидная заготовка, инструмент, относительное движение, скорость скольжения, профиль, точка контакта.

**Финансирование:** исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России на оказание государственных услуг (выполнение работ) по теме «Повышение производительности и точности упрочняющей обработки деталей подвижного состава за счет разработки принципиально новой геометрии накатного инструмента» (код темы: FREE-2023-0001).

**Введение.** Накатка деталей ходовой части подвижного состава осуществляется с целью увеличения их ресурса и повышения усталостной прочности. В промышленности существует множество видов такой обработки, однако не все они достигают нужного эффекта из-за несовершенства технологии накатки и конструкции накатного инструмента.

Наиболее эффективными методами накатки являются методы, осуществляемые в пространственном станочном зацеплении, т. е. методы, при которых оси инструмента и накатываемой заготовки скрещиваются в пространстве. Контакт между соприкасающимися поверхностями может быть как точечным, так и линейным. При этом аксоидные поверхности инструмента и накатываемого изделия должны представлять собой форму однополостного гиперболоида. К сожалению, в настоящее время инструмент для накатки изделий на однополостных гиперболоидах очень сложно изготовить в технологическом плане. Производители не научились изготавливать производящие поверхности двух сопряженных

гиперболоидных поверхностей. Такое положение привело к тому, что теоретическую гиперболоидную поверхность в промышленности заменяют на винтовую, коническую или цилиндрическую, которые в общем виде составляют гиперболоидную поверхность [1]. В этом случае получается точечный характер касания между поверхностью накатного инструмента и накатываемой заготовкой [2].

**Основное содержание и результаты работы.** Для создания принципиально нового накатного инструмента исследуем станочное зацепление накатника и накатываемой заготовки при их скрещенных осях. Выберем две подвижные системы координат, связанные с накатываемой заготовкой и накатным инструментом. Для формообразования накатного инструмента выберем цилиндрическую или реечную поверхность, которые являются производящими поверхностями при изготовлении накатного инструмента. В производственных условиях в качестве производящей поверхности целесообразно выбрать стандартный круглый резец, прямозубое или косозубое

цилиндрическое зубчатое колесо, изготовленное из инструментальной стали. Если позволяет станочное оборудование, то можно выбрать зуборезную рейку. Осуществим переход от системы координат, связанной с производящей поверхностью, к

системе координат, связанной с поверхностью искомого накатного инструмента. Координата точки касания на производящей и изготавливаемой поверхностях в данном исследовании определена по следующей зависимости:

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= (x_1 \cos \varphi_1 - y_1 \sin \varphi_1 + a_w) \cos \varphi_2 + [(x_1 \sin \varphi_1 + y_1 \cos \varphi_1) \cos \gamma - x_1 \sin \gamma] \sin \varphi_2, \\ y_2 &= (x_1 \cos \varphi_1 - y_1 \sin \varphi_1 + a_w) \sin \varphi_2 + [(x_1 \sin \varphi_1 + y_1 \cos \varphi_1) \cos \gamma - z_1 \sin \gamma] \cos \varphi_2, \\ z_2 &= (x_1 \sin \varphi_1 + y_1 \cos \varphi_1) \sin \gamma + z_1 \cos \gamma. \end{aligned} \right\} (1)$$

Выражения (1) описывают связь между координатами вращающейся системы, жестко связанной с цилиндрической или зубчатой производящей поверхностью, и точками контакта вращающейся системы, жестко связанной с изготавливаемым гиперболоидным накатным инструментом.

Форму режущей кромки производящей инструментальной поверхности, представляющей собой обобщенный исходный контур, можно представить как контур, кромка которого описана произвольной кривой, имеющей вид

$$x_1 = f_1(\lambda) - r_1, \quad y_1 = f_2(\lambda), \quad (2)$$

где  $f_1(\lambda)$ ,  $f_2(\lambda)$  — произвольные, необходимое число раз дифференцируемые функции, описывающие инструментальную поверхность;  $\lambda$  — переменная величина;  $r_1$  — радиус окружности.

В процессе формообразования наружной и боковой поверхности гиперболоидного накатного инструмента формообразующие поверхности инструментального производящего контура совершают относительные движения, определяемые двумя независимыми параметрами  $\mu$  и  $\varphi_1$ . Эти движения осуществляются за счет поступательного и вращательного движения (поступательное движение — движение вдоль прямолинейной образующей изготавливаемой заготовки, вращательное движение — вращение заготовки и инструмента вокруг своих осей).

$\varphi_1$  — угол поворота режущих кромок производящего контура относительно оси его вращения;  $\mu$  — кратчайшее межосевое

расстояние между инструментом и нарезаемой заготовкой накатника.

Подставляя в уравнение (1) значения координат точек режущей кромки, получим уравнения семейства наружных и боковых поверхностей на заготовке гиперболоидного накатного инструмента. Следовательно, найденные уравнения семейства поверхностей описывают наружные и боковые поверхности накатного инструмента в зависимости от трёх параметров:  $\lambda$ ,  $\mu$  и  $\varphi_1$ . Здесь: параметр  $\varphi_2$  выражен при помощи угла поворота  $\varphi_1$  и передаточного отношения  $u_{21}$ , имеет вид:  $\varphi_2 = \varphi_1 \cdot u_{21}$ . Тогда уравнения производящей инструментальной поверхности с учётом выражений (2) в системе координат производящего исходного контура принимают следующий вид:

$$x_1 = f_1(\lambda) - r_1, \quad y_1 = f_2(\lambda), \quad z_1 = \mu. \quad (3)$$

Выражения, описывающие производящую инструментальную поверхность, являющуюся круглым резцом, прямозубым или косозубым зубчатым колесом в данном исследовании, в векторной форме найдены в двухпараметрическом огибании поверхностей в следующем виде:

$$\vec{r}_1(\lambda, \mu) = [f_1(\lambda) - r_1] \vec{i} + \mu \vec{k}. \quad (4)$$

Воспользовавшись выражениями (3), получим радиус-векторы касательных к сетке прямых  $\lambda = const$  и  $\mu = const$  и на формообразующей поверхности производящего исходного контура в следующем виде:

$$\vec{r}_1^{(\lambda)} = f_1' \vec{i} + f_2' \vec{j}, \quad \vec{r}_1^\mu = \vec{k}. \quad (5)$$

Процесс изучения станочного касания поверхности изготавливаемого накатного инструмента с производящей поверхностью полагает определение основных элементов изготавливаемого накатника, таких как: кривизна поверхностей, контактные линии и другие элементы. В этом случае необходимо определить проекции единичного вектора нормали к производящей инструментальной поверхности [3].

Единичный вектор нормали к производящей поверхности определяется по следующей зависимости:

$$\vec{N} = (\vec{r}_1^\lambda \times \vec{r}_1^\mu). \quad (6)$$

Единичный вектор нормали в проекциях на оси координат к производящей поверхности (3) с использованием равенств (5) может быть записан в следующем виде:

$$\begin{aligned} n_{x1} &= f_2' / \sqrt{(f_1')^2 + (f_2')^2}, \\ n_{y1} &= f_1' / \sqrt{(f_1')^2 + (f_2')^2}, \quad n_{z1} = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

С целью определения нормальной кривизны сопрягаемых поверхностей, главных направлений и других характеристик производящих поверхностей в работе были определены выражения, описывающие коэффициенты первой и второй квадратичных форм. Эти коэффициенты в общем виде для искомой инструментальной поверхности принимают следующий вид [4]:

$$E_1 = (\vec{r}_1^\lambda)^2, \quad F_1 = \vec{r}_1^\lambda \vec{r}_1^\mu, \quad G_1 = (\vec{r}_1^\mu)^2. \quad (8)$$

Коэффициенты второй квадратичной формы в общем виде, применимые для широкой номенклатуры накатного инструмента, в данном случае для искомой инструментальной поверхности накатного инструмента, можно записать в следующей форме:

$$L_1 = \vec{n}_1 \frac{\partial^2 \vec{r}_1}{\partial \lambda^2}, \quad M_1 = \vec{n}_1 \frac{\partial^2 \vec{r}_1}{\partial \lambda \partial \mu}, \quad N_1 = \vec{n}_1 \frac{\partial^2 \vec{r}_1}{\partial \mu^2}, \quad (9)$$

где  $\vec{n}_1$  — единичный вектор нормали к производящей поверхности.

Для определения коэффициентов (8) и (9) для производящей инструментальной поверхности (4) первые производные функции радиуса-вектора  $\vec{r}_1$  имеют вид (5).

Вторые производные для производящей поверхности будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \partial^2 \vec{r}_1 / \partial \lambda^2 &= f_1'' \vec{i}_1 + f_2'' \vec{j}_1, \\ \partial^2 \vec{r}_1 / \partial \lambda \cdot \partial \mu &= 0, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\partial^2 \vec{r}_1 / \partial \mu^2 = r_1''(\mu) = 0.$$

Проекции единичного вектора нормали к производящей поверхности, используемой для формообразования накатного инструмента, определяются выражениями (7). Подставляя в выражения (8) значения производных, записанных при помощи выражений (5), получим:

$$E_1 = (f_1')^2 + (f_2')^2, \quad F_1 = 0, \quad G_1 = 1. \quad (11)$$

С учетом значений вторых производных и выражений, описывающих проекции нормалей к обработанной поверхности, выражения (9) после несложных преобразований принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} L_1 &= (f_1'' f_2' - f_1' f_2'') / \sqrt{((f_1')^2 + (f_2')^2)}, \\ M_1 &= 0, \quad N_1 = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Используя выражения, описывающие коэффициенты первой и второй квадратичной форм, определим нормальные кривизны линий контакта, лежащих на производящей инструментальной поверхности. С этой целью используем известный метод из дифференциальной геометрии [5]:

$$K = L_1 d\lambda^2 / (E_1 d\lambda^2 + G_1 d\mu^2). \quad (13)$$

Исследуемые направления, в которых определяется кривизна производящей поверхности, зависят от отношения  $\partial \lambda / \partial \mu$ . Так, например, нормальные кривизны вдоль линий  $\mu = const$  и  $\lambda = const$  являются в рассматриваемом случае главными и будут равны

$$K_{\mu} = L_1/E_1 = (f_1'f_2'' - f_1''f_2') / \left[ (f_1')^2 + (f_2')^2 \right]^{3/2}, \quad (14)$$

$$K_{\lambda} = N_1/G_1 = 0.$$

$$-f_1' \partial_{\mu} / \partial t \left[ (f_1 - r_1)(1 - u_{21} \cos \gamma) + \mu u_{21} \sin \gamma \sin \varphi_1 - a_w u_{21} \cos \gamma \cos \varphi_1 \right] + f_2' \mu / \partial t \left[ -f_2 (1 - u_{21} \cos \gamma) + \mu u_{21} \sin \gamma \cos \varphi_1 - a_w u_{21} \cos \gamma \sin \varphi_1 \right] = 0. \quad (15)$$

Уравнения (3) и (15) при определенном значении угла поворота инструмента представляют собой контактные линии на поверхности производящего инструмента в станочном зацеплении инструмента и заготовки.

Благодаря выведенным выражениям удалось разработать схему формообразования гиперболоидных накатных инструментов, применяемых для накатки осей локомотивов и тяговых зубчатых колес подвижного состава на серийном станочном оборудовании.

С целью стабилизации процесса накатки деталей колесных пар подвижного состава и устранения недостатков существующей технологии накатки разработаны новый накатной инструмент и технология накатки оси и тягового зубчатого колеса. Накатка деталей при помощи предложенного инструмента должна осуществляться таким образом, чтобы контактные линии на обрабатываемой детали располагались под углом к относительной скорости скольжения инструмента и детали. В этом случае

Относительная скорость скольжения располагается в касательной плоскости к производящей поверхности, поэтому основное уравнение станочного зацепления соприкасающихся поверхностей принимает следующий вид:

накатной инструмент представляет собой огибающую накатываемой детали в пространственном станочном зацеплении. Разработка новой схемы формообразования накатного инструмента, а также технологий обработки деталей при помощи этого инструмента приводит к стабилизации качества накатанной поверхности.

**Выводы.** В процессе выполнения работы получены следующие научные результаты:

1. Разработана математическая модель, описывающая профиль режущих кромок инструментальной производящей поверхности.
2. Найдены в векторной форме уравнения производящей поверхности, являющейся инструментальным производящим колесом.
3. Определено станочное зацепление и найдены основные элементы изготавливаемой инструментальной поверхности, такие как кривизны зубьев и контактные линии.
4. Разработана принципиально новая схема формообразования накатного инструмента в пространственном станочном зацеплении.

#### Список источников

1. Гавриленко В. А. Зубчатые передачи в машиностроении. М. : Машигиз, 1962. 531 с.
2. Калашиников С. Н. Зубчатые колеса и их изготовление. М. : Машиностроение, 1983. 264 с.
3. Кривошея А. В. Методика построения исходных производящих контуров при автоматизированном проектировании незвольвентных зубообрабатывающих инструментов // Резание и инструмент в технологических системах. Харьков : ХГПУ, 1997. С. 139–143.
4. Литвин Ф. Л. Теория зубчатых зацеплений. М. : Наука, 1968. 584 с.
5. Бермант А. Ф., Аранович И. Г. Краткий курс математического анализа. М. : Наука, 1973. 736 с.

© Витренко В. А., Ефимов А. А., Михайлова А. Д., Стоянов А. А.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. железнодорожного транспорта ЛГУ им. В. Даля Киреевым А. Н., к.т.н., доц. каф. ТОМП ДонГТУ Кучмой С. Н.

Статья поступила в редакцию 12.12.2024.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Витренко Владимир Алексеевич**, д-р техн. наук, профессор каф. технологии машиностроения и инженерного консалтинга

Луганский государственный университет имени Владимира Даля,  
г. Луганск, Россия,  
e-mail: vitrenko.vl@gmail.com

**Ефимов Александр Александрович**, канд. техн. наук, доцент каф. технологии машиностроения и инженерного консалтинга

Луганский государственный университет имени Владимира Даля,  
г. Луганск, Россия

**Михайлова Александра Дмитриевна**, канд. техн. наук, доцент каф. технологии машиностроения и инженерного консалтинга

Луганский государственный университет имени Владимира Даля  
г. Луганск, Россия

**Стоянов Александр Александрович**, канд. техн. наук, доцент, зав. каф. обработки металлов давлением и сварки

Луганский государственный университет имени Владимира Даля,  
г. Луганск, Россия

**\*Vitrenko V. A., Efimov A. A., Mikhailova A. D., Stoyanov A. A.** (Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk, Russia, \*e-mail: vitrenko.vl@gmail.com)

#### KNURLING TOOL DEVELOPMENT FOR KNURLING THE ROLLING STOCK PARTS

*In the work presented here, the authors have developed a formation scheme of knurling tool that is used for knurling axles and gears of rolling stock. The tools are manufactured according to the third-class formation scheme on serial machining facilities with the use of cylindrical and serrated tool surfaces. The outer surface of such a tool has a hyperboloidal shape. In the tooling process, the relative motion in the machine tool's mesh is caused by two independent parameters, such as: generating motion and feed motion along the rectilinear generator of the workpiece being made.*

**Key words:** roll burnisher, hyperboloid billet, tool, relative motion, slip velocity, profile, touched point.

**Funding:** the research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the provision of government services (performance of works) on the theme "Increase of productivity and accuracy of hardening machining of rolling stock parts due to development of fundamentally new geometry of knurling tool" (theme code: FREE-2023-0001).

#### References

1. Gavrilenko V. A. Gears in mechanical engineering [Zubchatye peredachi v mashinostroyeni]. M. : Mashgiz, 1962. 531 p. (rus)
2. Kalashnikov S. N. Gear wheels and their manufacture [Zubchatye kolea i ih izgotovlenie]. M. : Mashinostroyeniye, 1983. 264 p. (rus)
3. Krivosheya A. V. Methodology of construction of initial production contours for automated design of non-volute tooth-processing tools [Metodika postroyeniya iskhodnykh proizvodnyashchih konturov pri avtomatizirovannom proektirovani n eevol'ventnykh zuboobrabatyvayushchih instrumentov]. Cutting & Tool in Technological System. Har'kov : KhGPU, 1997. Pp. 139–143. (rus)
4. Litvin F. L. Gear theory [Teoriya zubchatykh zaceplenij]. M. : Nauka, 1968. 594 p. (rus)
5. Bermant A. F., Aranovich I. G. Short course of mathematical analysis [Kratkij kurs matematicheskogo analiza]. M. : Nauka, 1973. 736 p. (rus)

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Vitrenko Vladimir Alekseevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department  
Lugansk State University named after Vladimir Dahl  
Lugansk, Russia,  
e-mail: vitrenko.vl@gmail.com

**Efimov Aleksandr Aleksandrovich**, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of  
Mechanical Engineering Technology and Engineering Consulting  
Lugansk State University named after Vladimir Dahl,  
Lugansk, Russia

**Mikhailova Aleksandra Dmitrievna**, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of  
Mechanical Engineering Technology and Engineering Consulting  
Lugansk State University named after Vladimir Dahl,  
Lugansk, Russia

**Stoyanov Aleksandr Aleksandrovich**, PhD in Engineering, Assistant Professor, Head of the  
Department of Metal Forming and Welding  
Lugansk State University named after Vladimir Dahl,  
Lugansk, Russia