

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 621.993
doi: 10.30987/2782-5957-2024-12-18-27

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ РЕЗЬБОНАКАТНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ВНУТРЕННИХ КОНИЧЕСКИХ РЕЗЬБ

Вадим Васильевич Куц^{1✉}, Дмитрий Андреевич Зубков², Оксана Сергеевна Зубкова³

^{1,2,3} Юго-западный государственный университет, Курск, Россия

¹ kuc-vadim@yandex.ru

² dmitrij.zubkov.2000@bk.ru

³ zubkova-oksana@bk.ru

Аннотация

Целью проведенного исследования является профилирование рабочей части вращающегося накатного инструмента, предназначенного для накатывания внутренних конических резьб. Основной задачей данной работы является разработка схемы формообразующей системы процесса накатывания, математическое моделирование производящей поверхностей накатника, применяемого накатного ролика и поверхности резьбы получаемой после обработки накатным инструментом. В ходе работы были применены методы геометрической теории формирования поверхностей режущими инструментами, основанные на использовании векторных уравнений для описания процесса формообразования внутренней конической резьбы.

Новизна работы состоит в построении модели поверхности накатного инструмента и накатного ролика, с учетом особенностей его работы. В ходе работы была разработана схема формообразующей системы, используя которую была составлена математическая модель процесса формообразования внутренней конической резьбы и спрофилирован деформирующий элемент накатного инструмента. Данная математическая модель позволит определить оптимальное сечение для профилирования накатного инструмента с учетом минимальной погрешности обработанной резьбы.

Ключевые слова: накатывание, накатник, накатной инструмент, математическое моделирование, процесс, формообразование, резьба.

Ссылка для цитирования:

Куц В.В. Моделирование поверхности вращающегося резьбонакатного инструмента для обработки внутренних конических резьб / В.В. Куц, Д.А. Зубков, О.С. Зубкова // Транспортное машиностроение. – 2024. - № 12. – С. 18-27. doi: 10.30987/2782-5957-2024-12-18-27.

Original article
Open Access Article

MODELING OF THE SURFACE OF A ROTATING THREAD ROLLING TOOL FOR MACHINING INTERNAL CONICAL THREADS

Vadim Vasilyevich Kuts^{1✉}, Dmitry Andreevich Zubkov², Oksana Sergeevna Zubkova³

^{1,2,3} Southwest State University, Kursk, Russia

¹ kuc-vadim@yandex.ru

² dmitrij.zubkov.2000@bk.ru

³ zubkova-oksana@bk.ru

Abstract

The study objective is to form the working part of a rotating tool designed for rolling internal conical threads. The main task of this paper is to develop a scheme of forming a rolling system, mathematical modeling of a roller for producing surfaces, and the surface of the thread obtained after machining with a rolling tool. In this work, geometric methods of surface

formation by cutting tools are applied, based on the use of vector equations to describe forming an internal conical thread. The novelty of the work is in constructing a surface model of a rolling tool and a roller, taking into account the peculiarities of its operation. A scheme of the forming system is also developed, using which a mathematical model of forming the internal conical

thread is compiled and the deforming element of the rolling tool is profiled. This mathematical model will allow to determine the optimal cross-section for form-

ing a rolling tool, taking into account the minimum error of the machined thread.

Keywords: rolling, roller, rolling tool, mathematical modeling, process, forming, thread.

Reference for citing:

Kutz VV, Zubkov DA, Zubkova OS. Modeling of the surface of a rotating thread rolling tool for machining internal conical threads. Transport Engineering. 2024;12:18-27. doi: 10.30987/2782-5957-2024-12-18-27.

Введение

Конические резьбы находят свое применение в различных областях машиностроения. Данный тип резьбы обеспечивает герметичное свинчивание деталей без дополнительного уплотнения, а также небольшой угол поворота гайки относительно вала позволяет применять конические резьбы в быстроразборных соединениях. В настоящее время формообразование внутренних конических резьб происходит при помощи фрезерования [1, 2]. Замена обработки резанием на пластическую деформацию позволит повысить эксплуатационные характеристики обработанных конических резьб, за счет упрочнения поверхностного слоя материала [3-10]. В работах [7-9] рассматриваются вопросы упрочнения накатыванием замковых резьб после предварительного нарезания профиля резьбы. Однако, данные работы рассматривают обработку наружных конических резьб, процесс накатки внутренних конических резьб изучен мало.

Накатные инструменты для накатывания внутренних резьб, представленные в работах [10, 11] используют схему формообразования предусматривающую вращение заготовки и накатного инструмента и линейное перемещение накатного инструмента вдоль профиля резьбы. Предполагается, что за счет вращения инструмента получится уменьшить силу в зоне обработки и соответственно снизить требования к мощности оборудования. Схема может быть использована для конических резьб с мелким шагом или для упрочнения замковых резьб после обработки резанием и нанесения износостойких покрытий.

При накатывании или упрочнении конической резьбы (рис. 1) накатной инструмент, имея соосное с осью расположение, совершает вращение D_i вокруг своей оси и линейное перемещение S по двум осям вдоль конуса заготовки. Заготовка совершает вращение D_z навстречу вращению накатника.

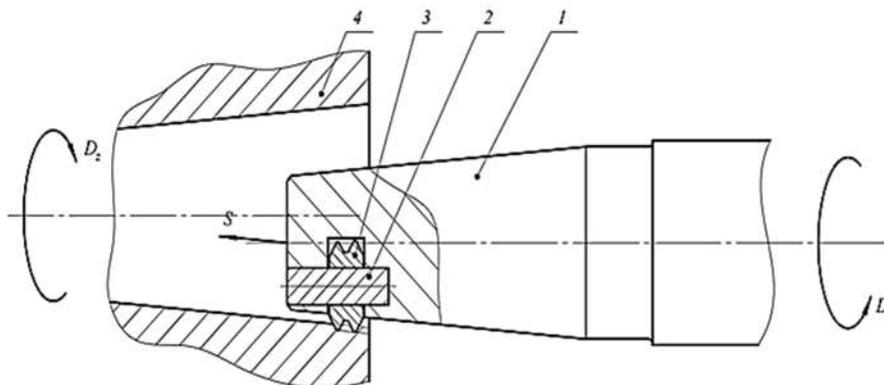


Рис. 1. Конструкция и схема работы накатного инструмента: 1 – державка; 2 – ось; 3 – накатной ролик; 4 – заготовка

Fig. 1. Design and operation scheme of the knurled tool: 1) holder 2) axis; 3) knurled roller; 4) the billet

При проектировании накатного инструмента одной для конической резьбы необходимо учитывать искажение профиля, возникающее в силу изменения угла

наклона винтовой линии. От того, на каком участке резьбы будет спрофилирован накатной инструмент, зависит погрешность на всех обрабатываемых витках

резьбы. Построение математической модели процесса формообразования резьбы позволяет определить основные геометри-

ческие параметры инструмента исходя из заданной величины погрешности резьбы.

Построение профиля и поверхности конической резьбы

В качестве примера детали с внутренней конической резьбой была выбрана муфта, предназначенная для соединения

бурильных труб. Модель детали в разрезе представлена на рис. 2.

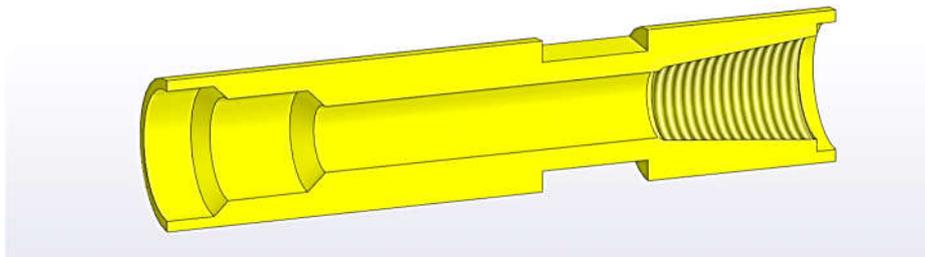


Рис. 2. 3D модель детали муфта в разрезе
Fig. 2. 3D model of the coupling part in the section

В конструкции данной детали используется внутренняя коническая резь-

ба [11], размеры профиля приведены на рис. 3.

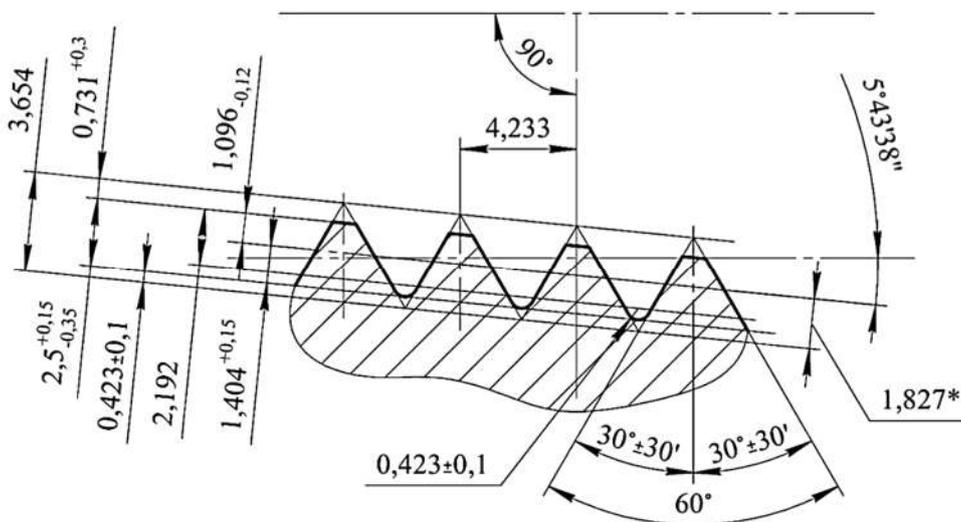


Рис. 3. Профиль резьбы ГОСТ Р 51245-99
Fig. 3. Thread profile GOST R 51245-99

Для построения математической модели была составлена схема расчета профиля резьбы рис. 4.

Весь профиль резьбы был разбит на три участка, два отрезка 1 и 3 (рис. 4) и дугу окружности 2 (рис. 4). Для каждой характерной точки участка профиля, представленной на схеме, были определены координаты расположения:

$$\begin{aligned} z_5 &= 0; \\ y_5 &= \frac{R}{\sin(\varphi)}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$z_3 = R \cos(\varphi); \quad (2)$$

$$z_2 = -z_3;$$

$$y_3 = y_5 - R \cdot \sin(\varphi); \quad (3)$$

$$y_2 = -y_3;$$

$$z_1 = \frac{y_5 - R + h \cos(\eta)}{\tan(\eta) - \cot(\varphi)}; \quad (4)$$

$$z_4 = -z_1;$$

$$y_5 - R + h \cdot \cos(\eta) - z_1 \cdot \tan(\eta),$$

где R – радиус дуги окружности; h – высота профиля резьбы; φ – половина угла профиля резьбы; η – угол уклона резьбы.

Для моделирования профиля резьбы представляем уравнение каждого участка в векторном виде:

$$\bar{r}_1(t) = \begin{bmatrix} 0 & -t \cdot \tan\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) & t & 1 \end{bmatrix}^T; \quad (5)$$

$$\bar{r}_2(t) = \begin{bmatrix} 0 & y_5 - \sqrt{R^2 - t^2} & t & 1 \end{bmatrix}^T; \quad (6)$$

$$\bar{r}_3(t) = \begin{bmatrix} 0 & t \cdot \tan\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) & t & 1 \end{bmatrix}^T, \quad (7)$$

где \bar{r}_1 , \bar{r}_3 – уравнения прямых участков профиля резьбы; \bar{r}_2 – уравнение ради-

усного участка профиля резьбы; t – параметр уравнения, являющийся координатой Z точки профиля резьбы.

Окончательный профиль конической резьбы опишем в виде векторной функции:

$$\bar{r}_0(t) = \begin{cases} \bar{r}_1(t), & \text{при } z_1 \leq t \leq z_2; \\ \bar{r}_2(t), & \text{при } z_2 \leq t \leq z_3; \\ \bar{r}_3(t), & \text{при } z_3 \leq t \leq z_4. \end{cases} \quad (8)$$

На рис. 5 приведены результаты моделирования на примере профиля резьбы, представленного на рис. 1, при $\varphi = 30^\circ$, $R = 0,423$ мм и $h = 2,5$ мм.

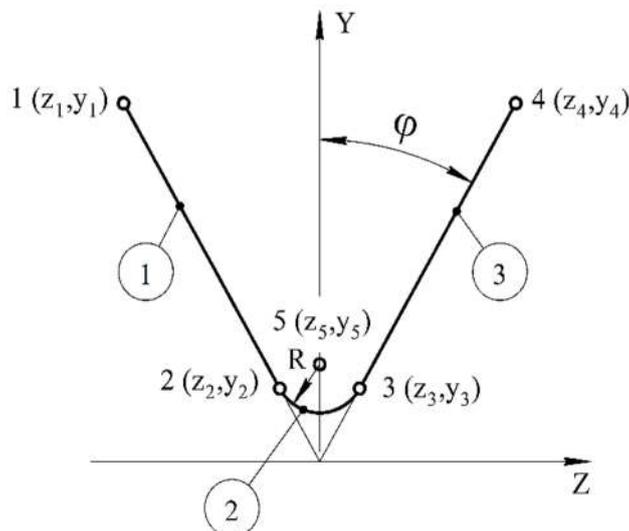


Рис. 4. Схема расчета параметров профиля резьбы
Fig. 4. The scheme for calculating the parameters of the thread profile

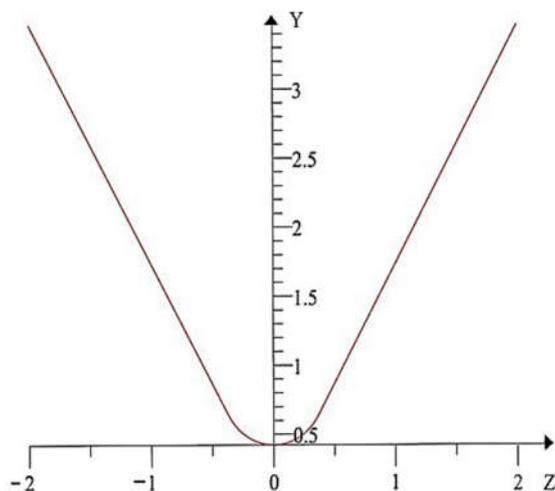


Рис. 5. Смоделированный профиль резьбы
Fig. 5. Simulated thread profile

На основе полученного уравнения профиля резьбы построим уравнение её поверхности:

$$\bar{r}_s(\psi, t) = A^{(6)}(-\Psi) A^{(2)}(-R_c) A^{(3)}\left(-\frac{P \cdot \Psi}{2\pi}\right) A^{(2)}\left(\frac{P \cdot \Psi}{2\pi} \tan(\eta)\right) \bar{r}_0(t), \quad (9)$$

где R_c – половина наружного диаметра резьбы; P – шаг резьбы; Ψ – угол положения профиля резьбы;

$A^{(6)}(-\Psi)$ – матрица поворота координат профиля вокруг оси Z

$$A^{(6)}(-\Psi) = \begin{bmatrix} \cos(-\Psi) & -\sin(-\Psi) & 0 & 0 \\ \sin(-\Psi) & \cos(-\Psi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$A^{(2)}(-R_c)$ – матрица перемещения координат профиля по оси Y

$$A^{(2)}(-R_c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -R_c \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$A^{(3)}\left(-\frac{P \cdot \Psi}{2\pi}\right)$ – матрица перемещения координат профиля по оси Z

$$A^{(3)}\left(-\frac{P \cdot \Psi}{2\pi}\right) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{P \cdot \Psi}{2\pi} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$A^{(2)}\left(\frac{P \cdot \Psi}{2\pi} \tan(\eta)\right)$ – матрица перемещения координат профиля по оси Y

$$A^{(2)}\left(\frac{P \cdot \Psi}{2\pi} \tan(\eta)\right) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \frac{P \cdot \Psi}{2\pi} \tan(\eta) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

На рис. 6 представлена результат моделирования поверхность резьбы по (9). Данная поверхность построена для резьбы с параметрами, представленными на рис. 3.

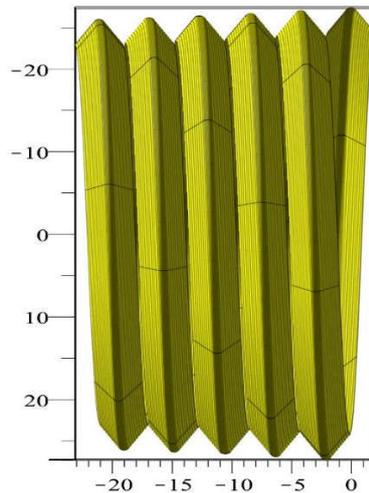


Рис. 6. Смоделированная поверхность резьбы
Fig. 6. Simulated thread surface

Построение профиля и поверхности накатного ролика

На первом этапе получим уравнение профиля вращающегося накатного инструмента (рис. 7).

Для этого составим основное уравнение формообразующей системы:

$$\bar{r}_s(\psi, t) = A_{\Sigma}(\psi_3, \psi_1) \bar{r}_a, \quad (10)$$

где $A_{\Sigma}(\psi_3, \psi_1)$ – матрица описывающая движение формообразующей системы

$$A_{\Sigma}(\psi_3, \psi_1) = A^{(6)}(\psi_3) A^{(2)}(- (R_c - R_a)) A^{(3)}\left(-\frac{P\psi_3}{2\pi}\right) \cdot A^{(2)}\left(\frac{\alpha P\psi_3}{2\pi}\right) A^{(6)}(\psi_1), \quad (11)$$

где R_a – радиус накатного инструмента; ψ_3 – угол поворота заготовки в процессе вращения; ψ_1 – угол поворота накатного инструмента; \bar{r}_a – уравнение профиля накатного инструмента.

Из уравнения 10 получаем уравнение пространственной образующей поверхности накатного инструмента:

$$\bar{r}_a = A_{\Sigma}^{-1}(\psi_3, \psi_1) \cdot \bar{r}_s(\psi, t). \quad (12)$$

На данный момент уравнение \bar{r}_a содержит четыре параметра ψ, t, ψ_3 и ψ_1 , что является избыточным, поэтому для приведения этого уравнения к виду $\bar{r}_a(\psi, t)$, на параметры ψ_3 и ψ_1 необходимо наложить связи. Для параметра ψ_1 зададим функциональную связь $\psi_1 = \psi$.

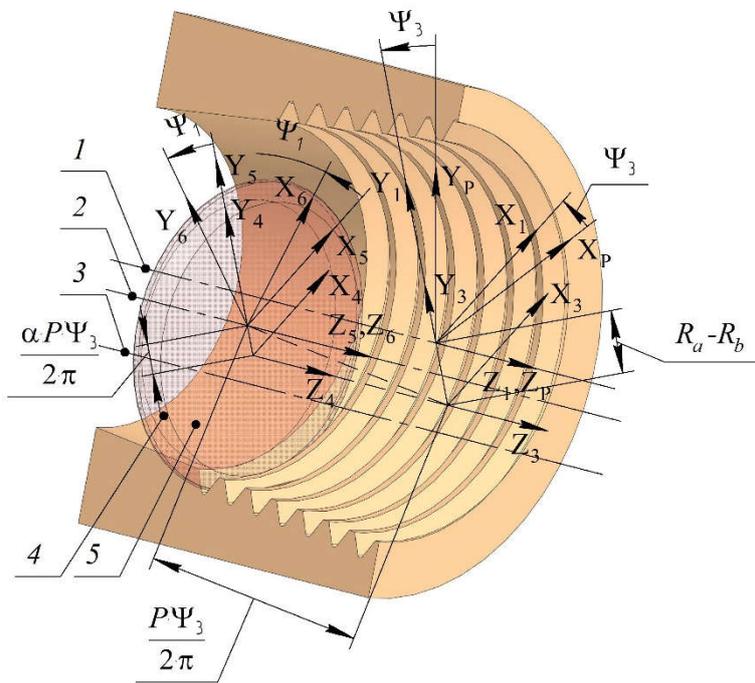


Рис. 7. Схема формообразующей системы: 1 – ось вращения заготовки 2 – ось вращения накатника; 3 – ось вращения накатного ролика; 4 – поверхность накатника; 5 – поверхность накатного ролика

Fig. 7. The scheme of the forming system: 1 – the axis of rotation of the workpiece 2 – the axis of rotation of the knurler; 3 – the axis of rotation of the knurler roller; 4 – the surface of the knurler; 5 – the surface of the knurler roller

Параметр ψ_3 определим исходя из связи огибания, которая описывается выражением

$$\begin{vmatrix} \bar{i}_5 \cdot \frac{\partial \bar{r}_a}{\partial t} & \bar{j}_5 \cdot \frac{\partial \bar{r}_a}{\partial t} & \bar{k}_5 \cdot \frac{\partial \bar{r}_a}{\partial t} \\ \bar{i}_5 \cdot \frac{\partial \bar{r}_a}{\partial \psi_3} & \bar{j}_5 \cdot \frac{\partial \bar{r}_a}{\partial \psi_3} & \bar{k}_5 \cdot \frac{\partial \bar{r}_a}{\partial \psi_3} \\ \bar{i}_5 \cdot \frac{\partial \bar{r}_a}{\partial \psi} & \bar{j}_5 \cdot \frac{\partial \bar{r}_a}{\partial \psi} & \bar{k}_5 \cdot \frac{\partial \bar{r}_a}{\partial \psi} \end{vmatrix} = 0. \quad (13)$$

Для этого, вычислим определитель матрицы в общем виде и решим полученное уравнение относительно параметра ψ_3 .

Тогда уравнение образующей поверхности накатного инструмента (12) представим, как:

$$\bar{r}_a(\psi, t) = \bar{r}_a \Big|_{\psi_3 = \psi_3(\psi, t); \psi_1 = \psi}, \quad (14)$$

где $\psi_3(\psi, t)$ – полученная из уравнения 13 связь огибания.

В уравнении (14) параметр ψ определяет участок резьбы на котором выполнен расчет образующей поверхности резбонакатного инструмента. На рис. 8. Показан

результат построения образующей производящей поверхности накатного инструмента по уравнению (14).

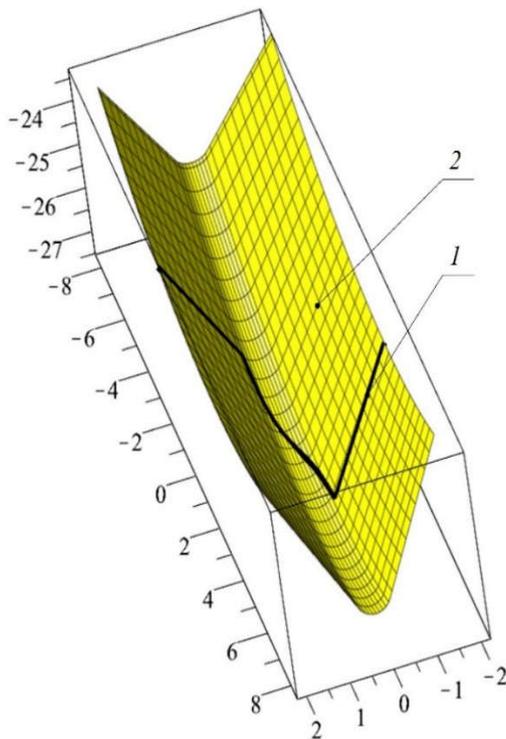


Рис. 8. Пространственная образующая поверхности накатного инструмента:
1 – образующая поверхности накатника;
2 – поверхность резьбы

Fig. 8. Spatial forming surface of the rolling tool:
1 – the forming surface of the knurler;
2 – the surface of the thread

Определив образующую производящей поверхности накатника, саму поверхность опишем следующим уравнением:

$$\bar{r}_d(\psi, \psi_2, t) = A^{(6)}(\psi_2) \cdot \bar{r}_a(\psi, t), \quad (15)$$

где ψ_2 – угол поворота профиля накатника в процессе вращения, относительно оси вращения накатника; $A^{(6)}(\psi_2)$ – матрица вращения координат профиля накатника вокруг оси Z

$$A^{(6)}(\psi_2) = \begin{bmatrix} \cos(\psi_2) & -\sin(\psi_2) & 0 & 0 \\ \sin(\psi_2) & \cos(\psi_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

На рис. 9 показан результат построения производящей поверхности накатника, при $\psi = 0$.

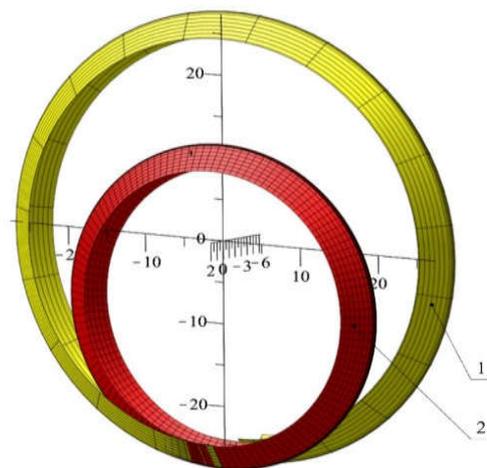


Рис. 9. Поверхность накатника в начальном положении: 1 – поверхность накатника;
2 – поверхность резьбы

Fig. 9. The surface of the knurler in the initial position:
1 – the surface of the knurler;
2 – the surface of the thread

Также, выполним построения профиля накатника в осевой, секущей плоскости:

$$\bar{r}_a^*(\psi, t) = \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{\bar{i}_5 \cdot \bar{r}_a(\psi, t)^2 + \bar{j}_5 \cdot \bar{r}_a(\psi, t)^2} & \bar{k}_5 \cdot \bar{r}_a(\psi, t) & 1 \end{bmatrix}^T. \quad (16)$$

Из уравнения 16 получим уравнение профиля накатного ролика:

$$\bar{r}_b(\psi, t) = A^{(2)}(-R_a - R_b) \cdot \bar{r}_a^*(\psi, t), \quad (17)$$

где $A^{(2)}(-R_a - R_b)$ – матрица перемещения координат профиля по оси Y на величину $(R_a - R_b)$

$$A^{(2)}(-R_a - R_b) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -(R_a - R_b) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

R_b – радиус ролика накатного инструмента; R_a – радиус накатного инструмента.

Уравнения поверхности накатного ролика будет иметь вид:

$$\bar{r}_q(\psi, t, \psi_4) = A^{(6)}(\psi_4) \cdot \bar{r}_b(\psi, t), \quad (18)$$

где $A^{(6)}(\psi_4)$ – матрица вращения координат профиля накатника вокруг оси Z на угол ψ_4

$$A^{(6)}(\psi, t) = \begin{bmatrix} \cos(\psi_4, t) & -\sin(\psi_4, t) & 0 & 0 \\ \sin(\psi_4, t) & \cos(\psi_4, t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

На рис. 10 представлен результат моделирования профилей накатного ролика спрофилированных в начальной точке резьбы и на десятом витке.

Результаты

В ходе выполнения работы было проведено теоретическое исследование схемы формирования профиля внутренней конической резьбы, проведено математическое моделирование образования поверхностей накатника, накатного ролика и поверхности профиля резьбы обработанной накатником. Данная математическая модель позволяет смоделировать поверхность накатного инструмента на любом участке резьбы. В зависимости

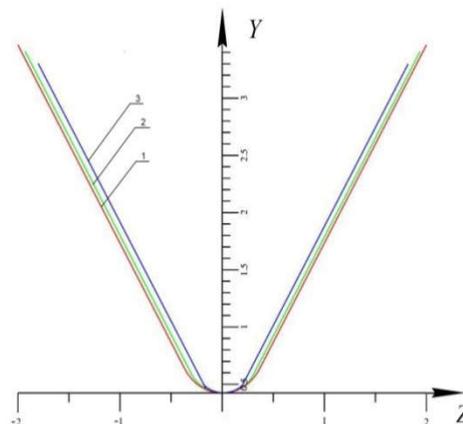


Рис. 10. Результат моделирования профиля накатного ролика: 1 – профиль резьбы; 2 – профиль накатного ролика, спрофилированный в начальной точке резьбы ($\Psi=0$); 3 – профиль накатного ролика, спрофилированный на 10-м витке ($\Psi=20\pi$)

Fig. 10. The result of modeling the profile of the rolling roller: 1) the thread profile; 2) the profile of the knurled roller profiled at the starting point of the thread ($\Psi=0$); 3) the profile of the knurled roller profiled at the 10th turn ($\Psi=20\pi$)

Можно отметить, что перемещение точки резьбы, используемой для профилирования ролика, по длине резьбы приводит к сужению профиля ролика, в виду увеличения кривизны конической винтовой поверхности.

от выбранного участка меняется пространственная образующая накатного инструмента, представленной на рисунке 8, что отражается на погрешности обработанной резьбы. Полученная математическая модель может быть использована при проектировании накатных инструментов с целью снижения погрешности профиля резьбы, что особенно актуально для резьб большой длины.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Киричек, А.В. Режущий инструмент. Инструмент и технологии резьбоформообразование: учебное пособие / А.В. Киричек, С.Г. Емельянов, М.Е. Ставровский и [др.]; под общ. ред. Проф., д-ра техн. наук А.В. Киричека. Старый Оскол: ТНТ, 2014. 200 с.
2. Никитин В.К. и др. Вихревое нарезание резьбы в гайках. М., Mashgiz, 1956.
3. Лапин В.В., Писаревский М.И., Самсонов В.В. Накатывание резьб, червяков, шлицев и зубьев. М: Машиностроение 1986. 228 с.
4. Цыплакова Д.В., Дема Р.Р. Способы повышения эксплуатационной стойкости резьбовых соединений // Наука и производство Урала. 2023. Т. 19. С. 5-8.
5. Афонин А.Н. Повышение эффективности накатывания резьб // Диссертация д.т.н. Орел 2010. 408 с.
6. Должиков Д.А. Повышение эффективности накатывания конических резьб // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук – Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс. Орел, 2011.
7. Корнев В.Н. Повышение прочности сцепления газопламенных покрытий с основой накатыванием на резьбе замкового профиля // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Орловский государственный технический университет. Орел, 2006.

8. Киричек А.В., Афонин А.Н., Должиков Д.А., Хромов В.Н., Корнев В.Н. Накатывание резьб с замковым профилем // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 7 (31). С. 20-24.
9. Песин М.В., Ермаков В.В., Павлович А.А., Юсупов А.Р. Современные технологии машиностроения для импортозамещения нефтепромышленного и бурового оборудования // Экспозиция Нефть Газ. 2016. № 3 (49). С. 62-63.
10. Гречишников В. А., Косарев В. А., Смирнова А. А., Косарев Д. В. Инструмент для накатки внутренней резьбы // Патент RU 2 373 017 C1, 05.03.2009.
11. Куц В.В., Зубков Д.А. Инструмент для накатывания внутренней конической резьбы // Патент РФ 2814868, 28.02.24.
12. ГОСТ Р 51245-99 Трубы бурильные стальные универсальные. Общие технические условия. - МТК 309 "Оборудование геологоразведочное", 1999. 15с.

REFERENCES

1. Kirichek AV, Yemelyanov SG, Stavrovsky ME. Cutting tools. Tools and technologies of threading: textbook. Stary Oskol: TNT; 2014.
2. Nikitin VK. Vortex threading in nuts. Moscow: Mashgiz; 1956.
3. Lapin VV, Pisarevsky MI, Samsonov VV. Rolling of threads, worms, slots and teeth. Moscow: Mashinostroenie; 1986.
4. Tsyplakova DV, Dema RR. Ways to increase the operational resistance of threaded connections. Nauka I Proizvodstvo Urala. 2023;19:5-8.
5. Afonin AN. Improving the efficiency of thread rolling [dSSERTATION]. [Orel (RF)]; 2010.
6. Dolzhikov DA. Improving the efficiency of rolling conical threads [abstract of dissertation]. [Orel (RF)]: Orel State University; 2011.
7. Korenev VN. Increasing the adhesion strength of gas-flame coatings with the base by rolling on

- the lock thread [abstract of dissertation]. [Orel (RF)]: Orel State Technical University; 2006.
8. Kirichek AV, Afonin AN, Dolzhikov DA, Khromov VN, Korenev VN. Rolling threads with a lock profile. Strengthening Technologies and Coatings. 2007;7(31):20-24.
9. Pesin MV, Ermakov VV, Pavlovich AA, Yusupov AR. Modern machine building technologies for import substitution of oilfield and drilling equipment. Oil and Gas Exposition. 2016;3(49):62-63.
10. Grechishnikov VA, Kosarev VA, Smirnova AA, Kosarev DV. RF Patent 2 373 017 C1. Tools for rolling internal threads. 2009 March 03.
11. Kutz VV, Zubkov DA. RF Patent 2814868. Tools for rolling internal conical thread. 2024 Feb 02.
12. GOST R 51245-99 Steel universal drill rods. General specifications. Moscow: Goststandart Rossii: 1999.

Информация об авторах:

Куц Вадим Васильевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование» Юго-Западного государственного университета, тел. +79036399401, AuthorID-РИНЦ 362984.
Зубков Дмитрий Андреевич – аспирант кафедры «Машиностроительные технологии и оборудо-

дование» Юго-Западного государственного университета, тел. +79510768516.
Зубкова Оксана Сергеевна – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование» Юго-Западного государственного университета, тел. +79081250926, AuthorID-РИНЦ 441234.

Kuts Vadim Vasilyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Engineering Technologies and Equipment at the Southwest State University the Southwest State University; phone: +79036399401, AuthorID-RSCI 362984.

Zubkov Dmitry Andreevich – Postgraduate student of the Department of Engineering Technologies and

Equipment at the Southwest State University the Southwest State University; phone: +79510768516.

Zubkova Oksana Sergeevna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Engineering Technologies and Equipment at the Southwest State University the Southwest State University; phone: +79081250926, AuthorID-RSCI 441234.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 30.10.2024; одобрена после рецензирования 08.11.2024; принята к публикации 27.11.2024. Рецензент – Хандожко А.В., доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Брянского государственного технического университета, главный редактор журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 30.10.2024; approved after review on 08.11.2024; accepted for publication on 27.11.2024. The reviewer is Khandozhko A.V., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metal Cutting Machines and Tools at Bryansk State Technical University, Editor-in-Chief of the journal *Transport Engineering*.