

Технология обкатывания гибкими игольчатыми роликами резьб и архимедовых червяков

Борис Бутаков, Александра Зубехина***

**Николаевский политехнический институт*

***Николаевский национальный аграрный университет*

Boris Butakov, Aleksandra Zubekhina***

**Nicholas Polytechnic Institute*

***Nicholas National Agrarian University*

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.

Ключевые слова: обкатывание, шероховатость, кривизна винтовой поверхности.

ВВЕДЕНИЕ

При изготовлении и эксплуатации деталей машин на их поверхностях образуются неровности и микронеровности, а слой металла, непосредственно прилегающий к поверхности, имеет нередко новую 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].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Для обкатывания упорных резьб с расширенной впадиной и архимедовых червяков разработано устройство с самоустанавливающимися игольчатыми роликами [26 - 27].

Конструкция устройства для обкатывания упорной резьбы показана на рис. 1. Рабочие игольчатые ролики 3 и 7 установлены в пазах сепараторов 2 и 8 под углами, соответствующими номинальным углам профиля червяка или резьбы, и опираются на тороконические шайбы 4 и 6, служащие промежуточными элементами между роликами и диском 5, установленным через игольчатый подшипник 11 на оси 12 в корпусе 1. Корпус 1 выполнен с возможностью поворота относительно державки 10 на угол подъема линии витка λ . Для измерения упругой деформации пружинящей части корпуса 1 устройство снабжено индикатором 9. Державкой 10 устройство установлено в ресцедержателе токарного станка, в патроне и задней бабке которого закреплена обкатываемая деталь. Устройство работает следующим образом. Поперечным и продольным перемещениями суппорта станка устройство заводится во впадину

Технология обкатывания гибкими игольчатыми роликами резьб и архимедовых червяков

обкатываемой резьбы, так чтобы игольчатые ролики 3 и 7 коснулись левой и правой сторон впадины резьбы. Вращением рукоятки поперечного винта суппорта станка за счет деформации упругой части корпуса 1, контролируемой по индикатору 9, ролики поджимаются к винтовым поверхностям с усилием обкатывания $P_{об}$. При номинальной величине углов профиля обкатываемой резьбы между торообразными поверхностями шайб и диском образуются клиновые зазоры, достаточные для установочных перемещений роликов при колебаниях угловых размеров резьбы. Самоустановка облегчается тем, что центр кривизны торообразных поверхностей лежит вблизи линии контакта роликов с деталью. Благодаря самоустановке обеспечивается равномерный контакт роликов с деталью на всей длине образующих профиля резьбы.

Жесткость (10 кН/мм) пружинящей части корпуса устройства достаточна для создания необходимого усилия обкатывания, контролируемого по индикатору. Корпус поворачивается на оправке вокруг оси, проходящей через впадину резьбы. Поворот опорного диска с роликами необходим при обкатывании резьб с большими углами подъема.

Для обкатывания резьбы приходится смещать плоскость роликов относительно осевого сечения детали на некоторую величину h , достаточную для образования силы, поджимающей ролики к корпусу, иначе ролики будут смещаться в направлении дна впадины обкатываемой резьбы, нарушая процесс обкатывания.

Смещение h (рис. 1), так же как и разворот плоскости роликов на угол λ_p , приводит к изменению ширины впадины, искажению углов и к появлению кривизны профиля резьбы в плоскости роликов.

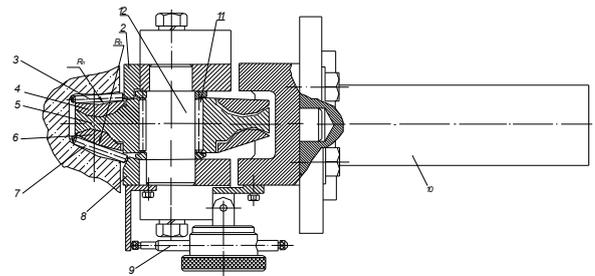


Рис. 1. Схема устройства для обкатывания игольчатыми роликами упорной резьбы с шагом 64 мм

Fig. 1. Diagram of the device for needle roller rolling buttress thread increments of 64 mm

Запишем уравнения винтовой поверхности резьбы в системе координат X, Y, Z (рис. 2):

$$x = \rho \cos \varphi;$$

$$y = \rho \sin \varphi;$$

$$z = (\rho - m) \operatorname{tg} \alpha + P \varphi,$$

где ρ и φ — криволинейные координаты; P — параметр винтового движения (при шаге резьбы, равном P_a , $P = P_a / 2\pi$); α — угол профиля; m — отрезок, отсекаемый образующей винтовой поверхности на оси X .

Переходя к системе координат X_2, Y_2, Z_2 , связанной с плоскостью роликов, получим

$$x_2 = \rho \cos \varphi;$$

$$y_2 = \rho \sin \varphi \cos \lambda_p + [(\rho - m) \operatorname{tg} \alpha + P \varphi] \sin \lambda_p + \frac{h \cos(\lambda - \lambda_p)}{\cos \lambda}; \quad (1)$$

$$z_2 = -\rho \sin \varphi \sin \lambda_p + [(\rho - m) \operatorname{tg} \alpha + P \varphi] \cos \lambda_p + \frac{h \sin(\lambda - \lambda_p)}{\cos \lambda},$$

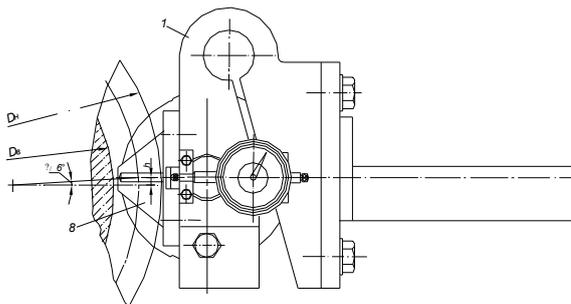
где λ — угол подъема резьбы.

В плоскости роликов $y_2 = 0$, поэтому уравнение сечения винтовой поверхности в криволинейных координатах на плоскости роликов запишется

$$\psi(\rho, \varphi) = \rho \sin \varphi \cos \lambda_p + [(\rho - m) \operatorname{tg} \alpha + P \varphi] \sin \lambda_p + \frac{h \cos(\lambda - \lambda_p)}{\cos \lambda} = 0 \quad (2)$$

Значение угла φ в уравнении (2) для левой стороны впадины резьбы определяется в зависимости от угла (β) между плоскостью роликов и образующей резьбы. Угол β через направляющие коэффициенты плоскости роликов и образующей резьбы выразится:

$$\sin \beta = \frac{|A \cdot l + B \cdot m + C \cdot n|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2} \cdot \sqrt{l^2 + m^2 + n^2}}, \quad (3)$$



Технология обкатывания гибкими игольчатыми роликами резьб и архимедовых червяков

где A, B, C – коэффициенты направляющего вектора плоскости роликов;
 l, m, n – направляющие коэффициенты образующей резьбы.

В системе координат X_2, Y_2, Z_2 уравнения винтовой поверхности (1) при $\varphi = const$ являются уравнениями ее образующей.

Направляющие коэффициенты образующей резьбы (l, m, n) определим из уравнений (1), как разность координат двух точек образующей при $\rho = 0$ и $\rho = 1$

$$l = \cos \varphi;$$

$$m = \sin \varphi \cos \lambda_p + tg \alpha \cdot \sin \lambda_p;$$

$$n = -\sin \varphi \sin \lambda_p + tg \alpha \cdot \cos \lambda_p.$$

Коэффициенты направляющего вектора плоскости роликов $A = 0; B = 1; C = 0$.

Угол (β) между плоскостью роликов и образующей резьбы определится:

$$\sin \beta = \cos \alpha (\cos \varphi \sin \lambda_p + \sin \varphi \cos \lambda_p) + \sin \alpha \sin \lambda_p. \quad (4)$$

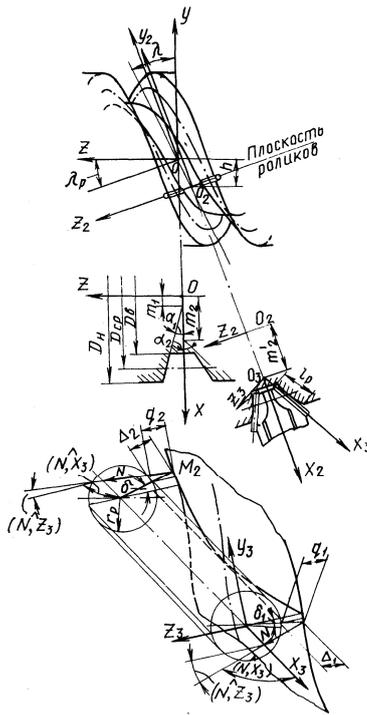


Рис. 2. Схема расчета геометрических параметров сечения резьбы плоскостью роликов

Fig. 2. Scheme for the calculation of geometrical parameters sectional plane thread rollers

После преобразования уравнения (4) относительно угла φ имеем:

$$\sin \varphi_1 = \frac{\cos \lambda_p (\sin \beta - \sin \alpha \cdot \sin \lambda_p) - \sqrt{\cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \lambda_p - (\sin \beta - \sin \lambda_p \sin \alpha)^2}}{\cos \alpha \cdot \cos^2 \lambda_p} \quad (5)$$

Приравнявая $\beta = -6^\circ, \alpha = \alpha_1$, найдем значение угла φ_1 из уравнения (5) для левой стороны впадины.

Подставив значение $\varphi = \varphi_1$ в уравнение (2), при $m = m_1, \alpha = \alpha_1$ и $\rho = \frac{D_{cp}}{2}$ определим необходимую величину смещения h

$$h = \frac{-\cos \lambda \left\{ \frac{D_{\dot{n}d}}{2} \sin \varphi_1 \cos \lambda_p + \left[\left(\frac{D_{\dot{n}d}}{2} - m_1 \right) tg \alpha_1 + p \varphi_1 \right] \sin \lambda_p \right\}}{\cos(\lambda - \lambda_p)}. \quad (6)$$

Приравнявая m и α последовательно m_1, α_1 и $m_2, (-\alpha_2)$ для левой и правой стороны впадины, определим из уравнения (2) значения углов φ_1 и φ_2 на среднем диаметре резьбы ($\rho = \frac{D_{cp}}{2}$). Подставив эти значения в выражение Z_2 системы уравнений (1) и просуммировав полученные значения, найдем ширину впадины резьбы в плоскости роликов:

$$B' = b'_1 + b'_2 = (b_1 + b_2) \cos \lambda_p - \frac{D_{cp}}{2} \sin \lambda_p (\sin \varphi_1 - \sin \varphi_2) + \frac{S}{2\pi} \cos \lambda_p (\varphi_1 - \varphi_2). \quad (7)$$

Углы профиля резьбы в плоскости роликов α , составленные касательными к профилю на среднем диаметре и осью X_2 , определяются из уравнений (1) при $y_2 = 0$. Исключив при этом параметр ρ , получим

$$ctg \alpha' = \frac{dx_2(\varphi)}{dz_2(\varphi)} = \frac{(\cos \lambda_p + \sin \lambda_p tg \alpha \sin \varphi) [P \varphi \sin \lambda_p - mtg \alpha \sin \lambda_p + h \frac{\cos(\lambda - \lambda_p)}{\cos \lambda}]}{P \sin \varphi (\cos \lambda_p \sin \varphi + tg \alpha \sin \lambda_p) + \dots} \rightarrow \dots \rightarrow \frac{-P \sin \lambda_p (\cos \lambda_p \sin \varphi + tg \alpha \sin \lambda_p) \cos \varphi + tg \alpha [P \varphi \sin \lambda_p - mtg \alpha \sin \lambda_p + h \frac{\cos(\lambda - \lambda_p)}{\cos \lambda}] \cos \varphi}{\cos \lambda} \quad (8)$$

Значения α'_1 и $(-\alpha'_2)$ находятся при подстановке в формулу (8) величин α_1, m_1 и $(-\alpha_2), m_2$. Кривизна винтовой поверхности в плоскости роликов в соответствии с [28]

$$K_i = \frac{L \left(\frac{d\rho}{d\varphi} \right)^2 + 2M \frac{d\rho}{d\varphi} + N}{E \left(\frac{d\rho}{d\varphi} \right)^2 + 2F \frac{d\rho}{d\varphi} + G} \quad (9)$$

Коэффициенты первой квадратичной формы E, F, G и второй квадратичной формы L, M, N для архимедовой винтовой поверхности определены в работе [29, 30] и равны

$$E = \sec^2 \alpha; F = tg \alpha P; G = \rho^2 + P^2; L = 0;$$

Технология обкатывания гибкими игольчатыми роликами резьб и архимедовых червяков

$$i = -\frac{P}{\sqrt{P^2 + \rho^2 \sec^2 \alpha}}; N = \frac{\rho^2 \operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{P^2 + \rho^2 \sec^2 \alpha}}.$$

Подставляя их значения в (9), получим

$$K = \frac{-2p \frac{d\rho}{d\varphi} + \rho^2 \operatorname{tg} \alpha}{\left[\sec^2 \alpha \left(\frac{d\rho}{d\varphi} \right)^2 + 2P \operatorname{tg} \alpha \frac{d\rho}{d\varphi} + P^2 + \rho^2 \right] \sqrt{P^2 + \rho^2 \sec^2 \alpha}}. \quad (10)$$

Отношение дифференциалов $\frac{d\rho}{d\varphi}$

характеризует направление касательной к кривой пересечения винтовой поверхности плоскостью роликов и определяется уравнением

$$\frac{\partial \psi}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial \psi}{\partial \varphi} d\varphi = 0. \quad (11)$$

Определив $\partial \psi / \partial \rho$ и $\partial \psi / \partial \varphi$ из уравнения (2), получим

$$\frac{d\rho}{d\varphi} = -\frac{\rho \cos \lambda_p \cos \varphi + P \sin \lambda_p}{\sin \varphi \cos \lambda_p + \operatorname{tg} \alpha \sin \lambda_p}, \quad (12)$$

где значение угла φ определяется из уравнения (2) при заданном ρ .

В принятой системе координат знак кривизны, рассчитанной по формуле (11) при $\alpha = \alpha_1$, соответствует левой стороне впадины. Для правой стороны впадины при подстановке $\alpha = -\alpha_2$ знак, полученный из формулы (11), меняется на обратный.

Номенклатура резьб 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 гиперболоидов.

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.

При обкатывании определяли максимальную ширину деформированной полоски. Если эта ширина, умноженная на коэффициент уточнения (отношение длин контакта ролика с винтовой поверхностью и

поверхностью модели при равной величине вдавливания ролика) (\hat{E}_δ), определенный расчетами, равняется ширине витка моделируемой резьбы, или превосходит ее, то обкатывание резьбы возможно. При обкатывании моделей сохранялись кривизна обкатываемой поверхности в плоскости роликов и величины относительного скольжения в контакте роликов с деталью μ_δ в направлениях, параллельном и перпендикулярном оси ролика. Кривизну винтовой поверхности в плоскости роликов можно рассчитать по формулам (9) и (10).

Угол $\varphi = \varphi_1$ в уравнении (10) для левой стороны впадины рассчитывали по (5) при $\beta = -6^\circ$, $\alpha = \alpha_1$, $\lambda_\delta = \lambda$, а угол $\varphi = \varphi_2$ для правой стороны впадины определяли решением системы уравнений (2) и (6) при $\alpha = \alpha_2$, $\lambda_p = \lambda$. Угол $\beta = \beta_2$ для правой стороны впадины рассчитывали по (5) при $\varphi = \varphi_2$, $\alpha = -\alpha_2$, $\lambda_p = \lambda$.

Результаты расчета радиусов кривизны профиля для левой $R_1 = 1/K_1$ и правой $R_2 = 1/K_2$ сторон впадины архимедовых червяков с модулем 10 мм приведены в табл. 1, в первом и втором столбцах которой указаны соответственно числа заходов Z архимедовых червяков и отношения среднего диаметра профиля к модулю q_δ . Заметим, что на левой стороне впадины кривизна имеет отрицательный знак, а на правой - положительный. При равном среднем диаметре профиля с ростом угла λ абсолютное значение кривизны увеличивается.

Радиус кривизны R_e поверхности конуса, принятого в качестве модели правой стороны впадины профиля в плоскости роликов (рис. 2, а), полученной поворотом на угол β осевого сечения конуса вокруг перпендикуляра к его образующей, определяется с учетом формулы Эйлера [17]

$$R_e = r_{\text{нб}} / \sin \alpha_e \sin^2 \beta, \quad (13)$$

где r_{cp} - средний радиус конуса; α_e - угол при основании конуса.

Относительное скольжение при обкатывании в направлении, перпендикулярном оси ролика: при обкатывании резьбы

$$\mu_\delta = \frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{cp}}} = \frac{\omega_p \left(\frac{D_{\text{cp}}}{2} + \frac{l_p}{2} \cos \beta \cos \alpha \right)}{\omega_p \frac{D_{\text{cp}}}{2}} = 1 + \frac{l_p \cos \alpha \cos \beta}{D_{\text{cp}}};$$

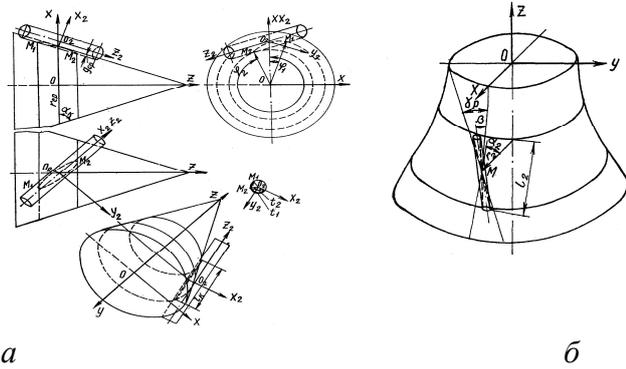


Рис. 3. Схемы расчетов параметров моделирования обкатывания конусов (а) и гиперboloидов (б) игольчатыми роликами при обкатывании конуса

Fig. 3. Payment schemes modeling parameters rolling cones (a) and hyperboloids (b) needle roller cone at rolling

$$\mu_{\hat{e}} = \frac{V_{\max}}{V_{cp}} = \frac{\omega_{\hat{e}} \left(r_{cp} + \frac{l_{\hat{e}}}{2} \cos \beta \cos \alpha_{\hat{e}} \right)}{\omega_{\hat{e}} r_{cp}} = 1 + \frac{l_{\hat{e}} \tilde{n} \cos \beta \cos \alpha_{\hat{e}}}{2r_{cp}}$$

Если $\mu_p = \mu_{\hat{e}}$; $l_p = l_{\hat{e}}$, то получим

$$r_{cp} = D_{cp} \cos \alpha_{\hat{e}} / 2 \cos \alpha. \quad (14)$$

Угол конуса $\alpha_{\hat{e}}$ с учетом (13) и (14) при

$$R_{\hat{e}} = 1 / \hat{E}_{\hat{a}} \text{ определяется из уравнения } \alpha_{\hat{e}} = \arctg \left[\frac{D_{cp} K_{\hat{a}}}{2 \cos \alpha \sin^2 \beta} \right]. \quad (15)$$

Из решения геометрической задачи пересечения цилиндра с винтовой и конической поверхностями определим длину контакта ролика с поверхностью резьбы и макета, отношение этих значений равно коэффициенту уточнения $\hat{E}_{\hat{a}} = l_p / l_{\hat{e}}$.

Запишем уравнения винтовой поверхности в системе координат $X_3 Y_3 Z_3$ (см. рис. 2), где y_3 - ось ролика. Для правой стороны впадины при $\alpha = \alpha_1$, $m' = m_2$ с учетом (1) имеем

$$\begin{aligned} x_3 &= \rho \cos \varphi \cos \alpha'_2 - \rho \sin \varphi \sin \lambda_p \sin \alpha'_2 - [(\rho - m_2) \operatorname{tg} \alpha_2 - \\ &- p \varphi] \cos \lambda_p \sin \alpha'_2 - m'_2 \cos \alpha'_2 + \frac{h \sin(\lambda - \lambda_p) \sin \alpha'_2}{\cos \lambda}, \\ y_3 &= \rho \sin \varphi \cos \lambda_p - [(\rho - m_2) \operatorname{tg} \alpha_2 - p \varphi] \sin \lambda_p + \frac{h \cos(\lambda - \lambda_p)}{\cos \lambda}; \\ z_3 &= -\rho \cos \varphi \sin \alpha'_2 - \rho \sin \varphi \sin \lambda_p \cos \alpha'_2 - [(\rho - m_2) \operatorname{tg} \alpha_2 - \\ &- p \varphi] \cos \lambda_p \cos \alpha'_2 + m'_2 \sin \alpha_2 + \frac{h \sin(\lambda - \lambda_p) \cos \alpha'_2}{\cos \lambda}, \end{aligned}$$

(16)

где α'_2 - определяется из (5) при $\alpha = -\alpha_2$, $\varphi = \varphi_2$, $\lambda_p = \lambda$, $m'_2 = x_{2cp} \operatorname{ctg} \alpha'_2 - r_p \sec \alpha'_2$; x_{2cp} , z_{2cp} - из (1) при $\rho = D_{cp} / 2$, $\alpha = \alpha_2$, $r_p = D_p / 2$.

Расстояния Δ_1 и Δ_2 между точками \dot{I}_1 , \dot{I}_2 винтовой поверхности и поверхностью ролика при точечном контакте ролика с поверхностью резьбы на среднем диаметре профиля (рис. 2) определяются из выражения

$$\Delta = \left| \frac{z_3 \sin(\hat{N}, x_3)}{\cos(\hat{N}, z_3)} \right| - r_p,$$

где (\hat{N}, x_3) и (\hat{N}, z_3) - углы соответственно между осями x_3, z_3 и нормалью N к винтовой поверхности, проходящей через точки M_1 и M_2 и ось x_3 .

Вдавливание ролика в направлении оси z_3 до момента касания поверхностью ролика точек M_1, M_2 винтовой поверхности находится по формуле

$$q_{cp} = \frac{q_1 + q_2}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta_1}{\cos \delta_1} + \frac{\Delta_2}{\cos \delta_2} \right), \quad (17)$$

углы δ_1 и δ_2 определяются равенством $\operatorname{tg} \delta_i = y_3 / z_3$.

Координаты x_3, y_3, z_3 точек M_1, M_2 рассчитываются по формулам (16) соответственно при $\beta = D_i / 2$ и $\rho = D_{\hat{a}} / 2$. Значения угла φ в (16) определяются уравнением нормали N к винтовой поверхности, проходящей через ось x_3 :

$$\frac{X - x_3}{\cos(\hat{N}, x_3)} = \frac{Y - y_3}{\cos(\hat{N}, y_3)} = \frac{Z - z_3}{\cos(\hat{N}, z_3)},$$

где X, Y, Z - координаты нормали, x_3, y_3, z_3 — координаты точек M_1, M_2 винтовой поверхности.

Технология обкатывания гибкими игольчатыми роликами резьб и архимедовых червяков

Направляющие косинусы с учетом (16) в соответствии с [17] определяются соотношением

$$\begin{aligned}\cos(\hat{N}, \hat{x}_3) &= K[\sin \varphi(-\rho \sin \lambda_p \sin \alpha'_2 \operatorname{tg} \alpha_2 + p \cos \alpha'_2) + \\ &+ \cos \varphi(p \sin \lambda_p \sin \alpha'_2 + \rho \cos \alpha'_2 \operatorname{tg} \alpha_2) + \rho \cos \lambda_p \sin \alpha'_2]; \\ \cos(\hat{N}, \hat{y}_3) &= K[\rho(\sin \lambda_p + \sin \varphi \cos \lambda_p \operatorname{tg} \alpha_2) - \cos \varphi \rho \cos \lambda_p]; \\ \cos(\hat{N}, \hat{z}_3) &= K[\sin \varphi(-\rho \cos \alpha'_2 \sin \lambda_p \operatorname{tg} \alpha_2 - p \sin \alpha'_2) + \\ &+ \cos \varphi(-\rho \sin \alpha'_2 \operatorname{tg} \alpha_2 + p \cos \alpha'_2 \sin \lambda_p) + \rho \cos \lambda_p \cos \alpha'_2]\end{aligned}$$

где K - нормирующий множитель,

$$K = 1 / \sqrt{\rho^2 \sin^2 \alpha_2 + p^2}.$$

В точках пересечения нормали с осью x_3 значения $y_3 = 0, z_3 = 0$. С учетом этого окончательно получим

$$\begin{aligned}\{ \rho \sin \varphi \cos \lambda_p - [(\rho - m') \operatorname{tg} \alpha_2 - p \varphi] \sin \lambda_p + h \frac{\cos(\lambda - \lambda_p)}{\cos \lambda} + \rho \cos \varphi \sin \alpha'_2 + \rho \sin \varphi \sin \lambda_p \cos \alpha'_2 + [(\rho - m') \\ - p \varphi] \cos \lambda_p \cos \alpha'_2 - m'_2 \sin \alpha'_2 - \frac{h \sin(\lambda - \lambda_p) \cos \alpha'_2}{\cos \lambda} \} / \{ \rho(\sin \lambda_p + \sin \varphi \cos \lambda_p \operatorname{tg} \alpha_2) - \cos \varphi \rho \cos \lambda_p \\ - \sin \varphi(\rho \cos \alpha'_2 \operatorname{tg} \alpha_2 + p \sin \alpha'_2) - \tilde{n} \sin \varphi(\rho \sin \alpha'_2 \operatorname{tg} \alpha_2 - p \cos \alpha'_2 \sin \lambda_p) + \rho \cos \lambda_p \cos \alpha'_2\end{aligned}$$

После преобразования имеем

$$\sin \varphi \{ \varphi [a_2 \rho + b_2] + c_2 \rho^2 + d \rho + e \} + \cos \varphi \{ \varphi [f d + q_2] + i \rho^2 + l_2 \rho + j \} + \omega \rho = 0, \quad (18)$$

где

$$\begin{aligned}a_2 &= -p \operatorname{tg} \alpha_2 \cos \alpha'_2; b_2 = -p^2 \sin \lambda_p \sin \alpha'_2; c_2 = \sec^2 \alpha_2 \cos \alpha'_2; \\ d &= -m'_2 \operatorname{tg}^2 \alpha_2 \cos \alpha'_2 - h \operatorname{tg} \alpha_2 \operatorname{tg} \lambda \cos \alpha'_2 + p \operatorname{tg} \alpha_2 \sin \lambda_p \sin \alpha'_2 - \\ &- m'_2 \operatorname{tg} \alpha_2 \cos \lambda_p \sin \alpha'_2; \\ e &= -p \left(m_2 \operatorname{tg} \alpha_2 \sin \lambda_p \sin \alpha'_2 + \frac{h \cos(\lambda - \lambda_p) \sin \alpha'_2}{\cos \lambda} \right); \\ f &= -p \operatorname{tg} \alpha_2 \sin \lambda_p \sin \alpha'_2; \\ q_2 &= p^2 \cos \alpha'_2; \\ i &= \sec^2 \alpha_2 \sin \lambda_p \sin \alpha'_2; \\ l_2 &= -m' \operatorname{tg}^2 \alpha_2 \sin \lambda_p \sin \alpha'_2 - h \operatorname{tg} \alpha_2 \sin \alpha'_2 \frac{\cos(\lambda - \lambda_p)}{\cos \lambda} - p \operatorname{tg} \alpha_2 \cos \alpha'_2; \\ j &= \delta(m' \operatorname{tg} \alpha_2 \cos \alpha'_2 + h \operatorname{tg} \lambda \cos \alpha'_2 + m'_2 \cos \lambda_p \sin \alpha'_2); \\ \omega &= -p \cos \lambda_p \sin \alpha'_2 + h \cos \alpha'_2 - m'_2 \sin \lambda_p \sin \alpha'_2.\end{aligned}$$

Длина контакта ролика, вдавленного в винтовую поверхность на q_{cp} , находится из уравнения

$$l_p = x_{\dot{I}_1} - \tilde{\delta}_{\dot{c}\hat{a}},$$

где $\tilde{\delta}_{\dot{c}\hat{a}}, \tilde{\delta}_{\dot{c}\hat{a}}$ абсциссы точек \dot{I}_1 и \dot{I}_2 .

Определим длину контакта ролика с конусной моделью для случая вдавливания ролика в поверхность конуса на величину q_{cp} (рис. 3, а). Запишем уравнения конуса в системе координат XYZ где ось конуса, $z = (r_{cp} - r) \operatorname{tg} \alpha_e; x = r \cos \psi; y = r \sin \psi$ (r, ψ - криволинейные координаты). Уравнения

поверхности конуса в системе координат $X_2 Y_2 Z_2$, связанной с осью ролика,

$$\begin{aligned}x_2 &= \sin \alpha_e (r \cos \psi - r_{cp}) - r_p + q_{cp}; \\ y_2 &= -\sin \beta [-r(\cos \psi \cos \alpha_e + \sin \psi \operatorname{tg} \beta + \sin \alpha_e \operatorname{tg} \alpha_e) + r_{cp} \cos \alpha_e]; \\ z_2 &= \cos \beta [-r(\cos \psi \cos \alpha_e - \sin \psi \operatorname{tg} \beta + \sin \alpha_e \operatorname{tg} \alpha_e) + r_{cp} \cos \alpha_e].\end{aligned}$$

Уравнения цилиндра в системе координат $X_2 Y_2 Z_2$

$$x_2 = r_p \cos t; y_2 = r_p \sin t; z_2 = A. \quad (19)$$

Исключив параметр t при совместном решении уравнений поверхности конуса и цилиндра, получим

$$z = \cos \beta \left[\frac{b_1 \pm \sqrt{b_1^2 - 4ac_1}}{2a_1} (\cos \psi \cos \alpha_e - \sin \psi \operatorname{tg} \beta + \sin \alpha_e \operatorname{tg} \alpha_e + r_{cp} \cos \alpha_e) \right], \quad (20)$$

где

$$\begin{aligned}a_1 &= \sin^2 \beta (\cos \psi \cos \alpha_e + \sin \psi \operatorname{tg} \beta + \sin \alpha_e \operatorname{tg} \alpha_e)^2 + \sin \alpha_e \cos^2 \psi; \\ b_1 &= -2[r_{cp} \sin^2 \beta \cos \alpha_e (\cos \psi \cos \alpha_e + \sin \psi \operatorname{tg} \beta + \sin \alpha_e \operatorname{tg} \alpha_e) + \\ &+ \cos \psi \sin \alpha_e (\sin \alpha_e r_{cp} - q_{cp} + r_p)]; \\ c_1 &= \sin^2 \beta r_{cp}^2 \cos^2 \alpha_e - r_p^2 + (r_{cp} \sin \alpha_e - d_{cp} + r_p)^2.\end{aligned}$$

Длина контакта ролика с конусом определяется из уравнения

$$l_e = z_{2 \max} - z_{2 \min}. \quad (21)$$

Максимум и минимум функции находят из уравнения (19) численным методом.

Однополостной гиперboloид, служащий моделью винтовой поверхности с отрицательной кривизной в плоскости роликов, образуется прямолинейной режущей кромкой резца. Режущая кромка, первоначально совпадающая с образующей конуса с углом у основания $\alpha_{\hat{a}}$, поворачивается вокруг перпендикуляра к образующей конуса на угол γ_{δ} (рис. 3, б).

При вращении детали конусная поверхность за счет срезания припуска превращается в гиперboloид со средним радиусом $r_{\hat{a}}$. Плоскость ролика при обкатывании гиперboloида образует с его осевым сечением угол $\beta = 6^\circ$. Определим угол разворота режущей кромки резца γ_{δ} , при котором кривизна гиперboloида в плоскости ролика будет равняться кривизне винтовой поверхности. Кривизна сечения гиперboloида плоскостью ролика в точке \dot{I} в соответствии с [19] определяется выражением

Технология обкатывания гибкими игольчатыми роликами резьб и архимедовых червяков

$$1/R = \cos^2 \beta / R_1 + \sin^2 \beta / R_2,$$

где R_1 - радиус кривизны осевого сечения, гиперboloида; R_2 - радиус кривизны сечения, нормального к образующей гиперboloида.

Применив предыдущую формулу к линии режущей кромки, получим

$$\cos^2 \gamma_p / R_1 + \sin^2 \gamma_p / R_2 = 0.$$

Решив совместно два последних уравнения при $R_2 = r_a / \sin \alpha_a$, с учетом, $1/R_1 = K_a$ получи

$$\gamma_p = \arctg \left[\sqrt{\operatorname{tg}^2 \beta - \frac{r_a K_a}{\cos^2 \beta \sin \alpha_a}} \right] \quad (22)$$

Значения r_a принимают равными r_{cp} , вычисленными по формуле (21) при $\alpha_e = \alpha_a = 60^\circ$.

Результаты расчета параметров моделирования для червяков с модулем 10 мм с различными Z и q_o , выполненного численно, приведены в табл. 1. Для червяков других модулей при любых z и q_o угловые параметры моделирования остаются неизменными, а линейные - увеличиваются пропорционально возрастанию модуля.

Конические и гиперboloидные модели обкатывались игольчатыми роликами на токарном станке ТВ-50 устройством с гидравлической схемой нагружения. Головка с игольчатым роликом выполнена с возможностью поворота вокруг оси устройства на угол β . Угол поворота замерялся маятниковым угломером. При нагружении ролик, благодаря повороту головки на цапфах, самоустанавливается по обкатываемой поверхности.

Обкатыванию подвергались усеченные конусы и гиперboloиды, причем кромка их верхнего основания моделировала кромку витка червяков. Материал моделей - улучшенные стали 40X и 34XH1M твердостью 286-320HB, широко применяемые в тяжелом машиностроении для изготовления червяков. Под обкатывание модели обтачивали полировочными резцами с прямолинейной режущей кромкой. Шероховатость поверхности перед обкатыванием достигала $R_z = 10...40$ мкм. Каждую модель обкатывали с несколькими значениями усилия, верхнюю границу которого определяли по появлению шелушения металла на обкатываемой поверхности при пятом проходе. Для

обкатывания моделей червяков с модулем 10 мм применен ролик диаметром 2,5 мм, с модулем 12 мм - диаметр ролика увеличен пропорционально модулю и равен 3 мм. На обкатанных конусах замеряли ширину b_e полосы обкатанной поверхности. Для червяков $m = 10$ мм результаты замеров помещены в таблицу.

При обкатывании гиперboloидов расстояние между крайними точками контакта ролика, одна из которых является кромкой верхнего основания гиперboloида, равнялось ширине витка моделируемого червяка. При этом в случае большой кривизны гиперboloида середина его поверхности оказывалась непрокатанной (см. табл. 1) или имелись отдельные риски. Для червяка с углом $\lambda = 11^\circ 18'$ поверхность гиперboloида оказалась равномерно деформированной. Величина смятия на краю модели за счет деформации металла для этого случая не превышала 0,02 мм и укладывалась в поле допуска на прямолинейность профиля. Поскольку ограничения возможности обкатывания вогнутых поверхностей червяков оказались менее жесткими, чем выпуклых, отпала необходимость расчета коэффициента уточнения для случая моделирования на гиперboloидах. Оптимальное усилие, обеспечивающее деформацию поверхности витка по всей глубине профиля при указанной выше твердости материала, достигает 17 кН.

Для червяков $m = 12$ мм оно увеличивается в соответствии с законом подобия в $(1,2)^2$ раз и равно 24,5 кН. Оптимальность этого усилия проверена при обкатывании моделей червяков $m = 12$ мм. При определении усилий для обкатывания червяков больших модулей также следует пользоваться законом подобия. В результате моделирования установлено, что игольчатыми роликами по всей глубине профиля можно обкатывать архимедовы червяки с углом подъема линии витка $\lambda < 10^\circ$. Определены усилия, необходимые для эффективного их обкатывания.

Методом наименьших квадратов аппроксимируем зависимости радиусов R_n и R_l кривизны винтовых поверхностей с левой и правой сторон профиля червяков с разными значениями модуля m , отношения среднего

Технология обкатывания гибкими игольчатыми роликами резьб и архимедовых червяков диаметра профиля червяка к модулю m (q_0) и числа заходов z резьбы или червяка [32-36]:

$$R_n = 3,7q_0^2 m/z; R_l = 1,5q_0^2 m/z.$$

Обкатывание резьб и червяков с углами подъема линии витка $\lambda > 10^\circ$ по всей глубине профиля нами предложено производить гибкими игольчатыми роликами. Для этого коническую сторону шайбы необходимо выполнить выпуклой с радиусом $R_l = 3,7q_0^2 m/z$, а правой – вогнутой с радиусом $R_n = 1,5q_0^2 m/z$. При этом в процессе обкатывания правой и левой сторон профиля резьбы игольчатые ролики изгибаются, что обеспечивает равномерную деформацию витков червяка. На предложенное решение получены патент Украины на изобретение и патент Украины на полезную модель [37].

Выводы:

1. Проведено физическое моделирование обкатывания винтовых поверхностей, игольчатыми роликами. Выпуклые поверхности моделировались конусами, вогнутые – однополостными гиперболами. 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.

Литература:

1. Odincov L.G. Uprochnenie i otdelka detalej poverhnostnym plasticheskim deformirovanijem. – M.: Mashinostroenie, 1987. – 328 s.
2. Vlasov V.M. Rabotosposobnost' uprochnennyh trushhihsja poverhnostej. – M.: Mashinostroenie, 1987. – 304 s.
3. Garkunov D.N. Tribotehnika. – M.: Mashinostroenie, 1985. – 424 s.

4. Frolov K.V. Metody sovershenstvovanija mashin i sovremennye problemy mashinovedenija. – M.: Mashinostroenie, 1984. – 224 s.
5. Papshev D.D. Otdelochno-uprochnjajushhaja obrabotka poverhnostnym plasticheskim deformirovanijem. – M.: Mashinostroenie, 1978. – 152 s.
6. Ognivec V.A., Kochergin Ju.Z. Izgotovlenie detalej s primeneniem maloethodnoj tehnologii. – Kiev: Tehnika, 1984. – 150 s.
7. Odincov L.G. Finishnaja obrabotka detalej almaznym vyglazhivaniem i vibrovyglazhivaniem. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 160 s.
8. Markov A.I. Ul'trazvukovaja obrabotka materialov. – M.: Mashinostroenie, 1980. – 238 s.
9. Abramov O.V., Horbenko I.G., Shveglja Sh. Ul'trazvukovaja obrabotka materialov. – M.: Mashinostroenie; Bratislava: Alfa, 1984. – 276 s.
10. Olejnik N.V., Kychin V.P., Lugovskoj A.L. Poverhnostnoe dinamicheskoe uprochnenie detalej mashin. – Kiev: Tehnika, 1984. – 152 s.
11. Konovalov E.G., Sidorenko V.A. Chistovaja i uprochnjajushhaja rotacionnaja obrabotka poverhnostej. – Minsk: Vyshejsjsh.shk., 1968. – 364 s.
12. Zhasimov M.M. Upravlenie kachestvom detalej pri poverhnostnom plasticheskom deformirovanii. – Alma-Ata: Nauka, 1986. – 208 s.
13. Shnejder Ju.G. Jekspluatacionnye svojstva detalej s reguljarnym mikrorel'efom. – L.: Mashinostroenie, 1982. – 248 s.
14. Ryzhov Je. V. Tehnologicheskoe obespechenie jekspluatacionnyh svojstv detalej mashin / Je.V. Ryzhov, A.G. Suslov, V.P. Fedorov. – M.: Mashinostroenie, 1979. – 170 s.
15. Braslavskij V.M. Tehnologija obkatki krupnyh detalej rolikami. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 160 s.
16. Babej Ju.I. Poverhnostnoe uprochnenie metallov / Ju.I. Babej, B.I. Butakov, V.G. Sysoev. – Kiev: Nauk. dumka, 1995. – 256 s.
17. Butakov B.I. Usovershenstvovanie processa chistovogo obkatyvanija detalej rolikami / B.I. Butakov // Vestnik mashinostroenija – 1984. – №7 – S. 50 – 53.

- Технология обкатывания гибкими игольчатыми роликами резьб и архимедовых червяков
18. A.S. 1031719 SSSR, V24V 39/00. Ustrojstvo dlja obkатыvanija vintovyh poverhnostej / Butakov B.I. – Opubl. 30.07.83 – Bjul. № 28.
19. A.S. 1588474 SSSR, V21 N 5/02; V24V39/04. Ustrojstvo dlja obkатыvanija poverhnostej detalej / [Butakov B.I., Marshalik Ju.Z.]. – Opubl. 30.08.90 – Bjul. № 32.
20. Butakov B.I. Poverhnostnoe plasticheskoe deformirovanie kak metod povyshenija kachestva detalej / B.I. Butakov, V.S. Shebanin, A.V. Zubešina // Trudy GOSNITI, Tom 107, chast' 2. Vosstanovlenie i uprochnenie detalej. – Moskva – 2011. – S. 85 – 87.
21. Butakov B.I. Povyszenie dolgovechnosti izdelij s pomoshh'ju poverhnostnogo plasticheskogo deformirovanija / B.I. Butakov, V.A. Artjuh, O.A. Anisimov // Tjazheloe Mashinostroenie, №9, 2006, S. 26 – 32.
22. B.I. Butakov. Methods of dynamic strngthening of metals and alloys. Rkuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo, No. 7, pp. 7-10, 1988 (by Allerton Press, Inc. pp. 11–19).
23. Butakov B.I. Povyszenie jeffektivnosti renovacii metallicheskih detalej putem sovmeshhenija chistovogo i uprochnjajushhego obkатыvanija rolnikami / B.I. Butakov, M.Ju. Tretjak, Ju.G. Ovchinnikov // Vestnik mashinostroenija – № 7 – 2004. – S. 59-67.
24. Butakov B.I. Issledovanie i razrabotka tehnologii obkатыvanija igol'chatymi rolnikami upornyh rez'b / B.I. Butakov, A.V. Zubešina // Materialy 13-j mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii: «Tehnologii remonta, vosstanovlenija i uprochnenija detalej mashin, mehanizmov, oborudovanija, instrumenta i tehnologicheskoy osnastki ot nano- do makrouvnja». Chast' 2. Sankt-Peterburg, «Plazmacentr». – 2011. – S. 60 – 66.
25. Butakov B.I. Povyszenie kachestva detalej mashin s pomoshh'ju obkатыvanija rolnikami / B.I. Butakov, A.V. Zubešina // Materialy 12-j mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii 13-16 aprelja 2010 g. „Tehnologii remanta, vosstanovlenija i uprochnenija detalej mashin, mehanizmov, oborudovanija, instrumenta i tehnologicheskoy osnastki. Chast' 2. – Sankt-Peterburg. – 2010. – S. 59 – 68.
26. A. s. 204311 SSSR, kl. 7f, 9, MPK V21h. Ustrojstvo dlja obkatki krupnyh rez'b i chervjakov / [V.M. Braslavskij, B.I. Butakov] – Opubl. 20.10.67. Bjul. № 22.
27. Butakov B.I. Sposoby obkатыvanija rolnikami vintov i chervjakov s krupnym shagom v tjazhelom mashinostroenii / B.I. Butakov // Vestnik mashinostroenija – 1985 – №3 – S. 44 - 50.
28. Rashevskij P.K. Kurs differencial'noj geometri / P.K. Rashevskij – M.; L.: Gostehizdat, 1960. – 428 s.
29. Ljukshin V.S. Teorija vintovyh poverhnostej v proektirovanii rezhushhijh instrumentov / V.S. Ljukshin – M.: Mashinostroenie, 1968. – 372 s.
30. Litvin F.L. Teorija zubchatyh zaceplenij / F.L. Litvin – M.: Nauka, 1968. – 584 s.
31. Bronshtejn I.N. Spravochnik po matematike / I.N. Bronshtejn, K.E. Semendjaev – M., 1967. – 608 s.
32. Hal'd A. Matematicheskaja statistika s tehničeskimi prilozhenijami / A. Hal'd – M.: Izd-vo inostr. literatury, 1956. – 664 s.
33. Stepnov M.N. Statisticheskaja obrabotka rezul'tatov mehanicheskijh ispytanij / M.N. Stepnov – M.: Mashinostroenie, 1972. – 232 s.
34. Smirnov N.V. Kurs teorii verojatnostej i matematicheskoj statistiki / N.V. Smirnov, I.V. Dunin-Barkovskij – M.: Nauka, 1969. – 512 s.
35. Nikolaj Gripachevskij. Issledovanija putej i povyshenija jeffektivnosti jekspluatacii tehniki v fermerskih hozjajstvah. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. An International Journal on Operation of Farm and Agri-food Industry Machinery, Vol. 15, № 2. – Lublin, 2013. – S. 65 – 69.
36. Dmitrij Marchenko. Chislennoe reshenie kontaktnoj zadachi naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija tel pri rabote stal'nyh kanatnogo bloka i kanata. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. An International Journal on Operation of Farm and Agri-food Industry Machinery, Vol. 15, № 2. – Lublin, 2013. – S. 113 – 120.
37. Patent Ukrainy na izobretenie UA 101718 MPK V24V 39/04 (2006.01), B21H 3/00. Ustrojstvo dlja obkatki krupnyh rez'b i

Технология обкатывания гибкими игольчатыми роликами резьб и архимедовых червяков
arhimedovyh chervej rolikami / B.I. Butakov,
A.V. Zubezhina; заявитель Butakov B.I. -
Заявл. 18.07.2011, номер заявки:
a201108944; опубли. 25.04.2013, Вжл. № 8.

**Technology by rolling flexible needle rollers
and Archimedean thread worms**

Abstract. The article describes the technology of the process obkатыvaniya flexible needle rollers threads with wide depression and Archimedean worms. A method is proposed obkатыvaniya threads and worms with large angles of rise of the coil.

Keywords: rolling, roughness, the curvature of the helical surface.