

УДК 621.787.4.

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА
ТЕХНОЛОГИИ ОБКАТЫВАНИЯ ИГОЛЬЧАТЫМИ
РОЛИКАМИ УПОРНЫХ РЕЗЬБ**

Б.И. Бутаков, доктор технических наук, профессор
Николаевский государственный аграрный университет

У статті представлено спосіб обкатування роликами складних поверхонь, що забезпечує високу якість обкатаної поверхні за рахунок оптимізації режимів обкатування за допомогою конструктивних рішень при розробці обкатного пристрою.

Ключові слова: голчасті ролики, шорсткість, обкатування роликами, пластична деформація.

Вступлення. Интенсификация деформации поверхностного слоя при использовании сравнительно небольших усилий обкатывания может быть достигнута за счет применения в качестве деформирующих элементов роликов уменьшенного диаметра.

Постановка и решение задачи. Для чистовой обработки стандартных упорных резьб, имеющих ширину впадины, равную толщине витка резьбы, но при этом и значительную глубину профиля $H_f = 1,5 B$, а также упорных резьб с шагом профиля $P_g = 20...32$ мм, когда более высокие требования к шероховатости поверхности предъявляются в основном к упорной стороне профиля резьбы, разработано устройство для обкатывания самоустанавливающимся игольчатым роликом [1].

Рабочий ролик 10 установлен в прорези сепаратора 2 и соприкасается с конической поверхностью опорного ролика 3, свободно вращающегося на подшипниках 4-6 в головке 7 (рис. 1, а). Головка имеет цапфы, центр кривизны которых проходит внутри впадины обкатываемой резьбы. Этими цапфами головка опирается на корпус 8 устройства, имеющий пружинящую, часть и индикатор 9 для измерения прогиба пружины. Закрепленное в резцедержателе токарного станка

устройство подводят к детали и вводят своими роликами во впадину резьбы. При этом перемещением верхних салазок суппорта поворачивают головку 7 на цапфах, добиваясь параллельности ролика 10, образующей обкатываемой рабочей поверхности резьбы детали. Поджимая головку к детали, сжимают пружинящую часть корпуса 8 и создают необходимое усилие обкатывания. Рабочий 10 и опорный 3 ролики вращаются навстречу друг другу от контакта с вращающейся деталью. При этом усилие обкатывания замкнуто внутри впадины резьбы и частично воспринимается упорным подшипником 5 опорного ролика.

Вследствие разницы диаметров рабочего и опорного роликов упорная сторона обкатываемой резьбы деформируется более интенсивно, что отвечает требованиям к шероховатости поверхности упорных резьб. Обработка резьбы завершается за 2-3 прохода суппорта. При обкатывании резьб с большими углами подъема таким устройством плоскость, в которой расположены оси рабочего и опорного роликов (в дальнейшем будем называть ее плоскостью роликов), поворачивают вокруг оси опорного ролика на угол λ_p (рис. 1, в), в общем случае отличающийся от угла подъема линии витка резьбы λ . Кроме того, плоскость роликов приходится смещать относительно осевого сечения детали на некоторую величину h , достаточную для образования составляющей силы, поджимающей ролик к корпусу приспособления, иначе ролик будет смещаться в направлении дна впадины обкатываемой резьбы, нарушая процесс обкатывания. При этом между плоскостью роликов и образующей резьбы на среднем диаметре нарезки должен быть создан угол $\beta \geq 6^\circ$.

Смещение h , а также и разворот плоскости роликов на угол λ_p приводят к изменению ширины впадины, искажению углов и к появлению кривизны профиля в плоскости роликов. Запишем уравнения винтовой поверхности резьбы в системе координат xyz (рис. 1, в): $x = \rho \cos \varphi$; $y = \rho \sin \varphi$; $z = (\rho - m') \operatorname{tg} \alpha + p \varphi$, где ρ и φ – криволинейные координаты, m' – отрезок, отсекаемый образующей винтовой поверхности на оси x ; p – параметр винтового движения (при шаге резьбы, равном P_g), $P = P_g / 2\pi$.

В системе координат $x_2y_2z_2$, связанной с плоскостью роликов, уравнения винтовой поверхности запишутся в виде

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = M_{20} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}.$$

Здесь M_{20} – матрица перехода от системы координат xuz к $x_2y_2z_2$, $M_{20} = M_{21}M_{10}$;

$$M_{21} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{0}{h \cos(\lambda' + \lambda_p)} \\ 0 & \cos \lambda_p & \sin \lambda_p & \frac{\cos \lambda'}{h \sin(\lambda' + \lambda_p)} \\ 0 & -\sin \lambda_p & \cos \lambda_p & \frac{\cos \lambda'}{h \sin(\lambda' + \lambda_p)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где угол λ' определяется соотношением $tg \lambda' = tg \lambda \cos\left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right)$; α_1 и α_2 – углы профиля соответственно для левой и правой сторон впадины профиля,

$$M_{10} = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right) & 0 & -\sin\left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right) & -q' \cos\left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right) & 0 & \cos\left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right) & -q' \sin\left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

(q' – отрезок, отсекаемый осью x_2 на оси x). Тогда

$$M_{20} = \begin{pmatrix} \cos\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} & 0 & -\sin\left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right) & -q' \cos\left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right) \sin \lambda_p & \cos \lambda_p & \cos\left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right) \sin \lambda_p & -q' \sin\left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right) \sin \lambda_p + \frac{h \cos(\lambda' - \lambda)}{\cos \lambda'} \\ \sin\left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right) \cos \lambda_p & -\sin \lambda_p & \cos\left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right) \cos \lambda_p & -q' \sin\left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right) \cos \lambda_p + \frac{h \sin(\lambda' - \lambda_p)}{\cos \lambda'} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Обозначив $(\alpha_2 - \alpha_1) / 2 = \gamma$, после раскрытия матриц получим

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= \rho \cos \varphi \cos \gamma - [(\rho - m') \operatorname{tg} \alpha + p \varphi] \sin \gamma - q' \cos \gamma; \\ y_2 &= \rho \cos \varphi \sin \gamma \sin \lambda_p + \rho \sin \varphi \cos \lambda_p + [(\rho - m') \operatorname{tg} \alpha + p \varphi] \times \\ &\times \cos \gamma \sin \lambda_p - q' \sin \gamma \sin \lambda_p + \frac{h \cos(\lambda' - \lambda_p)}{\cos \lambda'}; \\ z_2 &= \rho \cos \varphi \sin \gamma \cos \lambda_p - \rho \sin \varphi \sin \lambda_p + [(\rho - m') \operatorname{tg} \alpha + p \varphi] \times \\ &\times \cos \gamma \cos \lambda_p - q' \sin \gamma \cos \lambda_p + h \frac{\sin(\lambda' - \lambda_p)}{\cos \lambda'}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

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

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

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

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

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 $\varphi = \text{const}$ являются уравнениями ее образующей. Направляющие коэффициенты образующей резьбы (l, m, n) найдем из уравнений (1) как разность координат двух точек образующей при ρ , равном 0 и 1 :

$$\begin{aligned} l &= \cos \varphi \cos \gamma - \operatorname{tg} \alpha \sin \gamma; \\ m &= \cos \varphi \sin \gamma \sin \lambda_p + \sin \varphi \cos \lambda_p + \operatorname{tg} \alpha \cos \gamma \sin \lambda_p; \\ n &= \cos \varphi \sin \gamma \cos \lambda_p - \sin \varphi \sin \lambda_p + \operatorname{tg} \alpha \cos \gamma \cos \lambda_p. \end{aligned}$$

Кoeffициенты направляющего вектора плоскости роликов $A = 0$; $B = 1$; $C = 0$. Угол β между плоскостью роликов и образующей резьбы определится из выражения

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

После преобразования уравнения (4) относительно угла имеем

$$\sin = \frac{\cos \lambda_p (\sin \beta - \sin \alpha \sin \lambda_p \cos \gamma) - \sin \lambda_p \sin \gamma \times \sqrt{\cos^2 \alpha (\sin^2 \lambda_p \sin^2 \gamma - \cos^2 \lambda_p) - (\sin \beta - \lambda_p \sin \alpha \cos \gamma)^2}}{\cos \alpha (\cos^2 \lambda_p + \sin^2 \gamma \sin^2 \lambda_p)}. \quad (5)$$

Приравнявая $\beta = -6^\circ$, $a = a_1$, найдем значение φ_1 из уравнения (5) для левой стороны впадины. Подставив значение $\varphi = \varphi_1$ в уравнение (2) при $m' = m_1$, $a = a_1$ и $\rho = D_{cp} / 2$, определим необходимое смещение h

$$h = \frac{-\cos \lambda' \left\{ \frac{D_{cp}}{2} \cos \varphi_1 \sin \gamma \sin \lambda_p + \frac{D_{cp}}{2} \sin \varphi_1 \cos \lambda_p + \left[\left(\frac{D_{cp}}{2} - m_1 \right) \operatorname{tg} \alpha_1 + p \varphi_1 \right] \cos \gamma \sin \lambda_p - q' \sin \gamma \sin \lambda_p \right\}}{\cos (\lambda' - \lambda_p)}. \quad (6)$$

Угол φ_2 для правой стороны впадины на среднем диаметре резьбы ($\rho = D_{cp} / 2$) находится из (2) при $m' = m_2$, $a = -a_2$. Коэффициенты m_1 , m_2 , q' уравнений (1), определяющие положение системы координат относительно впадины резьбы, можно выразить через геометрические параметры обкатываемой резьбы (рис. 1, в).

Полагая $m_1 = D_n / 2$, записываем выражения для m_2 и q' :

$$m_2 = \frac{D_6}{2} r (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2 - \operatorname{ctg} \alpha_2) \times \left[\left(\frac{D_n}{2} - \frac{D_6}{2} \right) \operatorname{tg} \alpha_1 + r (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) \right],$$

где D_6 и D_n - внутренний и наружный диаметры обкатываемой резьбы; r - радиус впадины резьбы,

$$q' = \frac{D_e}{2} + \frac{D_p}{2} \sin \alpha_1 + \frac{r}{2} \left[\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2 - \operatorname{ctg} \left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} \right) \right] \times \\ \times \left[\left(\frac{D_n}{2} - \frac{D_e}{2} \right) \operatorname{tg} \alpha_1 + \frac{D_p}{2} \cos \alpha_1 + \frac{r}{2} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) \right].$$

Подставив значения углов φ_1 и φ_2 в выражение z_2 системы уравнений (1) и просуммировав полученные значения, найдем ширину впадины резьбы в плоскости роликов:

$$B' = B \cos \gamma \cos \lambda_p - \frac{D_{cp}}{2} \sin \lambda_p (\sin \varphi_1 - \sin \varphi_2) + \\ + \frac{D_{cp}}{2} \sin \gamma \cos \lambda_p (\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2) + \frac{P_6}{2\pi} \cos \gamma \cos \lambda_p (\varphi_1 - \varphi_2). \quad (7)$$

Углы профиля резьбы в плоскости роликов α' , составленные касательными к профилю на среднем диаметре и осью x_2 , определяются из уравнений (1) при $y_2 = 0$:

$$\operatorname{ctg} \alpha' = \left[-\rho \sin \varphi \cos \gamma + \rho' (\cos \varphi \cos \gamma - \operatorname{tg} \alpha \sin \gamma) - p \sin \gamma \right] / \\ / \left[-\rho (\sin \varphi \sin \gamma \cos \lambda_p + \cos \varphi \sin \lambda_p) + \rho' (\cos \varphi \sin \gamma \cos \lambda_p - \right. \\ \left. - \sin \varphi \sin \lambda_p + \operatorname{tg} \alpha \cos \gamma \cos \lambda_p) + p \cos \gamma \cos \lambda_p \right], \quad (8)$$

где

$$\rho = \frac{q' \sin \gamma \sin \lambda_p - h \frac{\cos(\lambda' - \lambda_p)}{\cos \lambda} + (m' \operatorname{tg} \alpha - p \varphi) \cos \gamma \sin \lambda_p}{\cos \varphi \sin \gamma \sin \lambda_p + \sin \varphi \cos \lambda_p + \operatorname{tg} \alpha \cos \gamma \sin \lambda_p}; \\ \rho' = \left\{ -p \cos \gamma \sin \lambda_p (\cos \varphi \sin \gamma \sin \lambda_p + \sin \varphi \cos \lambda_p + \operatorname{tg} \alpha \cos \gamma \sin \lambda_p) - \right. \\ \left. - (\cos \varphi \cos \lambda_p - \sin \varphi \sin \gamma \sin \lambda_p) \times \left[q' \sin \gamma \sin \lambda_p - h \frac{\cos(\lambda' - \lambda_p)}{\cos \lambda'} + \right. \right. \\ \left. \left. + \cos \gamma \sin \lambda_p (m' \operatorname{tg} \alpha - p \varphi) \right] \right\} / (\cos \varphi \sin \gamma \sin \lambda_p + \operatorname{tg} \alpha \cos \gamma \sin \lambda_p)^2.$$

Значения a'_1 и a'_2 находятся при подстановке в формулу (8) величин α_1 , m_1 , $-a_2$, m_2 . Кривизна винтовой поверхности в плоскости роликов в соответствии с [2] имеет вид

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

Коэффициенты первой E , F , G и второй L , M , N квадратичных форм для архимедовой винтовой поверхности определены в [3]:

$$E = \sec^2 \alpha; \quad F = \operatorname{tg} \alpha p; \quad G = p^2 + \rho^2; \quad L = 0;$$

$$M = \frac{p}{\sqrt{p^2 + \rho^2 \sec^2 \alpha}}; \quad N = \frac{\rho^2 \operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{p^2 + \rho^2 \sec^2 \alpha}}.$$

Подставив их значения в (9), получим

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

Отношение дифференциалов 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

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

Значения φ определяются из (2) и (5).

В принятой системе координат знак кривизны, рассчитанной по (10) при $a = a_1$ соответствует левой стороне впадины. Для правой стороны впадины при подстановке $a = -a_2$ знак, полученный из (10), меняется на обратный.

Решая на ЭВМ уравнение (2), с требуемой точностью рассчитываем размеры впадины и углы профиля резьбы в плоскости роликов, а также радиусы кривизны винтовой

поверхности в зоне деформации. При обкатывании резьб с малым углом подъема устройство можно не разворачивать.

Полагая $\lambda_p = 0$; $q' = 0$; $\gamma = 0$; $\lambda' = \lambda$, из (1) получим уравнения $x_2 = \rho \cos \varphi$; $y_2 = \rho \sin \varphi + h$; $z_2 = (\rho = m') \operatorname{tg} \alpha + p \varphi + h \operatorname{tg} \lambda$.

Приравнявая $y_2 = 0$ и $\rho = D_{cp} / 2$, получим на среднем диаметре согласно (5) следующее соотношение:

$$\sin \varphi = \sin \beta / \cos \alpha = -2h / D_{cp}.$$

Ширина впадины при параллельном переносе системы координат не изменится, т. е. угол профиля из выражения (8) с учетом (13) рассчитывается по формуле

$$\operatorname{tg} \alpha' = \frac{1}{D_{cp}} \left(\operatorname{tg} \alpha \sqrt{D_{cp}^2 - 4h^2} + \frac{0,637hP_6}{D_{cp}} \right) \quad (14)$$

Отношение $d\rho / d\varphi$ в соответствии с (12) при $\lambda_p = 0$, $\gamma = 0$ будет

$$\frac{d\rho}{d\varphi} = \frac{D_{cp}}{4h} \sqrt{D_{cp}^2 - 4h^2}.$$

Подставляя это значение в (11), получаем

$$K_n = \frac{2\operatorname{tg} \alpha - \frac{2P_6}{h\pi D_{cp}} \sqrt{D_{cp}^2 - 4h^2}}{\left(\frac{D_{cp}^2 - 4h^2}{4h^2 \cos^2 \alpha} + \frac{P_6 \operatorname{tg} \alpha \sqrt{D_{cp}^2 - 4h^2}}{h\pi D_{cp}} + \frac{P_6^2}{\pi^2 D_{cp}^2} + 1 \right)} \times \sqrt{\frac{P_6^2}{\pi^2} + \frac{D_{cp}^2}{\cos^2 \alpha}}. \quad (15)$$

Рассчитанные значения углов профиля и размеры впадины резьбы в плоскости роликов учитывают при проектировании устройств, а по величине кривизны винтовой поверхности в зоне деформации определяют возможность обкатывания резьбы. Обкатывание упорной стороны профиля резьбы проведено для винтов с шагами 24, 32 и 40 мм игольчатыми роликами диаметром соответственно 3; 3,5 и 4 мм. Осевая плоскость роликов расположена для винтов с шагами 24, 32 и 40 мм выше осевой плоскости винта соответственно на 6, 12 и 30 мм. Это позволяет предотвратить движение игольчатого ролика во время обкатывания в направлении дна впадины

резьбы. Головка с роликами на угол подъема резьбы не поворачивается. Угол опорного ролика можно рассчитывать по (14).

Винт электропушки с шагом резьбы 40 мм, изготовленный из стали 40X, подвергался термообработке до твердости 217-255 НВ. Нажимные винты с шагами 24 и 32 мм изготавливались из улучшенной стали 34ХН1М твердостью 286-321 НВ. Резьба перед обкатыванием нарезалась твердосплавными резцами. Шероховатость поверхности резьбы перед обкатыванием соответствовала $R_z = 20...40$ мкм. Обкатывание вместо полирования шкурками проводилось с погонным усилием на игольчатом ролике 1,40; 1,68; 1,59 кН/мм соответственно для резьб с шагами 24, 32, 40 мм при скорости 3 м/мин за три прохода. В результате обкатывания получена интенсивная деформация поверхности упорной стороны витка по всей глубине профиля резьбы. Шероховатость обкатанной поверхности $R_a = 0,32$ мкм.

Твердость металла в поверхностном слое резьбы, имеющего сорбитную структуру, повысилась на 18-20%. Это позволило снять закалку с резьбового участка винтов токами высокой частоты, в результате которой винты изгибало, что дополнительно усиливало износ гаек во время эксплуатации. Общий вид устройства для обкатывания винта электропушки показан на рис. 1, б.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 353779 СССР, кл. В21h3/04. Устройство для обкатки крупных резьб / [В. М. Браславский, Б. И. Бутаков, Ф. К. Мамедбаков]. — Оpubл. 09.10.72. Бюл. № 30.
2. Рашевский П. К. Курс дифференциальной геометрии / П. К. Рашевский — М.; Л. : Гостехиздат, 1960.— 428 с.
3. Люкшин В. С. Теория винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов / В. С. Люкшин — М. : Машиностроение, 1968. — 372 с.