

## ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОБКАТЫВАНИЯ ИГОЛЬЧАТЫМИ РОЛИКАМИ УПОРНЫХ РЕЗЬБ

БУТАКОВ Б.И., ЗУБЕХИНА А.Б.

Николаевский государственный аграрный университет,

Николаев, Украина

В статье представлен способ обкатывания роликами спорых поверхностей, за счет оптимизации режимов обкатывания с помощью конструктивных решений при разработке обкатного устройства.

Ключевіє слова: обкатівание роликами, микропрофиль, шероховатость поверхности.

The method of rolling-off of difficult surfaces rollers is presented in the article, which provide\* high quality of foiling surface due to optimization of the mode\* of rolling-off by algorithmic decisions at development of rolling device.

Keywords.: rolling-off, microprofile, roughness of surface, rollers.

Интенсификация деформации поверхностного слоя при использовании сравнительно небольших усилий обкатывания может быть достигнута за счет применения в качестве деформирующих элементов роликов уменьшенного диаметра. Для чистовой обработки стандартных упорных резьб имеющих ширину впадины, равную толщине витка резьбы, но при этом и значительную глубину профиля  $H_t = 1,6 B$ , а также упорных резьб с шагом профиля 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 В устройства,

имеющий пружинящую, часть и индикатор 9 для намерения 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 1 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 направляются 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  $\lambda_0$  (рис. 1, в) в общем случае отличающийся от угла подъема линии витка резьбы  $\lambda$ . Кроме того, плоскость роликов приходится смешать 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  $\beta \geq 6^*$ .

Смещение  $h$ , а также и разворот плоскости роликов на угол  $\lambda_0$  приводят к изменению ширины впадины, искажению углов и к появлению

кривизны профиля в плоскости роликов. Запишем уравнения винтовой поверхности резьбы в системе координат  $xuz$  (рис, 1, в):

$$x = \rho \cos \varphi; y = \rho \sin \varphi; z = (\rho - m') \operatorname{tg} \alpha + p \varphi, \text{ где } \rho \text{ и } \varphi$$

координаты,  $m'$  - отрезок, отсекаемый образующей винтовой поверхности на оси  $x$ ;  $p$  - параметр винтового движения (при шаге резьбы, равном  $P = P_s / 2\pi$ )

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  $x_1y_1z_1$  к  $x_2y_2z_2$

где угол  $\lambda'$  определяется соотношением  $\operatorname{tg} \lambda' = \operatorname{tg} \lambda \cos \left( \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} \right)$ ,

$\alpha_1$  и  $\alpha_2$  - 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

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

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

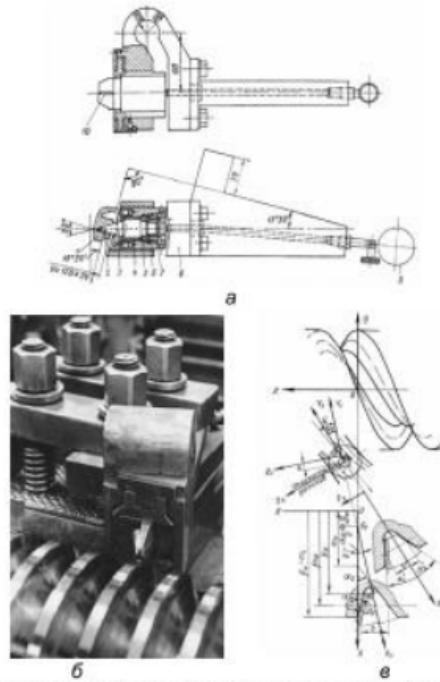


Рис 1 Конструкция (а) и общий вид (б) устройства, схема расчета параметров процесса (в) для обкатывания упорной резьбы с шагом 24 мм

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

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

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

Значение угла  $\varphi$  в уравнении (2) для левой стороны впадины резьбы определяется в зависимости от  $\beta$  между плоскостью роликов и образующей резьбы. Угол  $\beta$  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  $p$ , равном 0 и 1

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

Коэффициенты направляющего вектора плоскости роликов

$A=0; B=1; C=0$ . Угол  $\beta$  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  $\varphi$  имеем

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

Приравнивая  $\beta = -6^\circ, \alpha = \alpha_1$ , найдем значение  $\varphi$ , из уравнения (5) для левой стороны впадины. Подставив значение  $\varphi = \varphi$  уравнение (2)

При  $m' = m_1, \alpha = \alpha_1$ , и  $p = D_m / 2$

определим необходимое смещение  $h$

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

Угол  $\varphi_2$ , для правой стороны впадины на среднем диаметре резьбы

( $p = D_m / 2$ ) находится из (2) при  $m' = m_2, \alpha = -\alpha_2$ .

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  $m_1 = D_c / 2$ , записываем выражения для  $m_2$  и  $q'$

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

где  $D_a$  и  $D_j$  - внутренний и наружный диаметры обкатываемой резьбы;  $r$  - радиус впадины резьбы,

$$q' = \frac{D_d}{2} + \frac{D_r}{2} \sin \alpha_1 + \frac{r}{2} \left[ \sin \alpha_1 - \sin \alpha_2 - \operatorname{ctg} \left( \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} \right) \right] \times \\ \times \left[ \left( \frac{D_i}{2} - \frac{D_d}{2} \right) \operatorname{tg} \alpha_1 + \frac{D_c}{2} \cos \alpha_1 + \frac{r}{2} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) \right].$$

Подставив значения углов  $\varphi_1, \varphi_2$  в выражение  $z_2$  системы уравнений [1] и просуммировав полученные значения, найдем ширину впадины резьбы в плоскости роликов:

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

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

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

где

$$\rho = \frac{q' \sin \gamma \sin \lambda_p - h \frac{\cos(\lambda' - \lambda_p)}{\cos \lambda} + (m' tg\alpha - p\varphi) \cos \gamma \sin \lambda_p}{\cos \varphi \sin \gamma \sin \lambda_p + \sin \varphi \cos \lambda_p + tg\alpha \cos \gamma \sin \lambda_p};$$

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

Значения  $\alpha_1'$  и  $\alpha_2'$  находятся при подстановке в формулу (6) величин  $\alpha_1, m_1, -\alpha_2, m_2$

Кривизна винтовой поверхности в плоскости роликов в соответствии с (2) имеет вид

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

Коэффициенты первой E, F, G и второй L, M, N квадратичных форм для архимедовой винтовой поверхности определены в (3)|

$$E = \sec^2 \alpha; F = tg\alpha p; G = \rho^2 + p^2; L = 0; \\ \dot{I} = \frac{p}{\sqrt{p^2 + \rho^2 \sec^2 \alpha}}; N = \frac{\rho^2 tg\alpha}{\sqrt{p^2 + \rho^2 \sec^2 \alpha}}.$$

Подставив их значения в (9), получим

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

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  $\varphi$  определяются из (2) и (5).

В принятой системе координат знак кривизны, рассчитанной по (10) при  $\alpha = \alpha_1$  соответствует левой стороне впадины. Для правой стороны впадины при подстановке  $\alpha = -\alpha_2$  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 устройства можно не разворачивать

Полагая  $\lambda_p = 0; q' = 0; \gamma = 0; \lambda' = \lambda$ , из (1) получим уравнения

$$\begin{aligned} x_2 &= \rho \cos \varphi; y_2 = \rho \sin \varphi + h; \\ z_2 &= (\rho = m') \operatorname{tg} \alpha + p \varphi + h \operatorname{tg} \lambda. \end{aligned} \quad (13)$$

Приравняв  $y_2 = 0$  и  $\rho = D_\varphi / 2$ , получим на среднем диаметре согласно (5) следующее соотношение

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

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

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

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



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

Подставляя это значение в (11), получаем

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

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 36 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 электропружи с шагом резьбы 46 мм, изготовленный из стали 40Х, подвергался термообработке до твердости 217 - 255 НВ. Нажимные винты с шагами 24 и 32 мм изготавливались из улучшенной стали 34ХН1М твердостью 256 - 321 НВ. Резьба перед обкатыванием нарезалась твердосплавными резцами. Шероховатость поверхности резьбы перед обкатыванием соответствовала  $R_2 = 20 \text{ - } 46 \text{ мкм}$ . Обкатывание вместо полирования шкурками проводилось с погонным усилием на игольчатом ролике 1,40; 1,63; 1,56 кН/мм соответственно для резьб с шагами 24 32, 46 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

$R' = 0,32$  мкм.

Твердость металла в поверхностном слое резьбы, имеющего сорбитиуну структуру, повысилась на 18 - 20 %. Это позволило снять закатку 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.