

3DМОДЕЛИРОВАНИЕ ШЛИФОВАНИЯ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ С УПРАВЛЯЕМЫМ УГЛОМ СКРЕЩИВАНИЯ ОСЕЙ КРУГА И ХОДОВОГО ВИНТА КАЧЕНИЯ

The three-dimensional models of process of grinding of an outside helical surface and method of control by him on the machine tool from a PNC are designed, which one increases productivity and quality of processing of a flanks of thread of a feed screw of rolling.

Шлифование резьбы ходовых винтов качения осуществляют методом копирования абразивным кругом с профилем в виде дуги окружности [1]. Обработку ведут со скрещивающимися осями детали и круга, ось вращения которого расположена под углом к горизонтальной плоскости, равным углу наклона винтовой канавки. Процесс шлифования является многопроходным, где при съеме припуска угол наклона круга остается постоянным, поэтому длина и площадь контакта его и детали изменяется по координате обработки профиля, величина врезания инструмента в направлении, перпендикулярном оси вращения ходового винта больше эквидистантно заданного припуска, что снижает производительность и качество шлифования. Предложен способ шлифования наружных винтовых поверхностей [2], который обеспечивает съем припуска по эквидистантным кривым за счет дискретного поворота круга при поперечной подаче на один проход. Для повышения эффективности шлифования ходовых винтов качения по новому способу [2], необходимо разработать 3D модели профилирования абразивного круга, съема припуска, формообразования и на их базе создать метод управления процессом, который повысит производительность и качество обработки на станках с ЧПУ. Съем припуска по эквидистантным кривым требует специального профилирования круга, которое учитывает геометрические параметры заготовки и детали. Частную 3D модель профилирования круга при шлифовании наружных винтовых поверхностей получим их общей 3D модели поверхностей кругов при шлифовании со скрещивающимися осями инструмента и детали [3].

$$\begin{aligned} \bar{r}_u = & M_6(\theta_k) \cdot M_5(\psi) \cdot M_2(Y_c) \cdot M_3(Z_c \mp P \cdot \theta) \times \\ & \times M_6(-\theta) \cdot M_1(R) \cdot M_4(\varphi) \cdot M_5(\psi_q) \cdot M_3(-\rho) \cdot e_4; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\bar{N}_q \cdot \bar{V}_q = \left(\frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \psi_q} \times \frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \theta} \right) \cdot \frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \tau_q} = 0, \quad (2)$$

где \bar{r}_u – радиус-вектор точек поверхности шлифовального круга 1 (рис. 1); θ_k – угловой параметр, который определяет положение точки на поверхности круга в его системе координат $O_n X_n Y_n Z_n$; ψ – угол поворота оси $O_n Z_n$ вращения шлифовального круга 1 в вертикальной плоскости относительно оси $O_n Y_n$, совпадающей с осью $O_c Y_{ct}$; Y_c, Z_c – координаты начала координат O_q винта качения 2 в системе координат $O_c X_{ct} Y_{ct} Z_{ct}$ станины; $P = S/2\pi$ – параметр винтового движения; S – шаг резьбы; θ – угловой параметр, определяющий положение оси $O_q X_q$, при повороте её относительно оси $O_q Z_q$; R – радиус начала координат O_n (рис. 1, А–А), совпадающего с центром радиуса ρ профиля резьбы, расположенного нормально к винтовой канавке; $\varphi = \arctg S/2\pi R$ – угол ее наклона; ψ_q – угловой параметр точки нормального профиля резьбы радиусом ρ относительно оси $O_n Y_n$ системы координат $O_n X_n Y_n Z_n$; M_1, M_2, M_3 – матрицы линейных перемещений вдоль осей X, Y, Z ; M_4, M_5, M_6 – матрицы угловых поворотов относительно

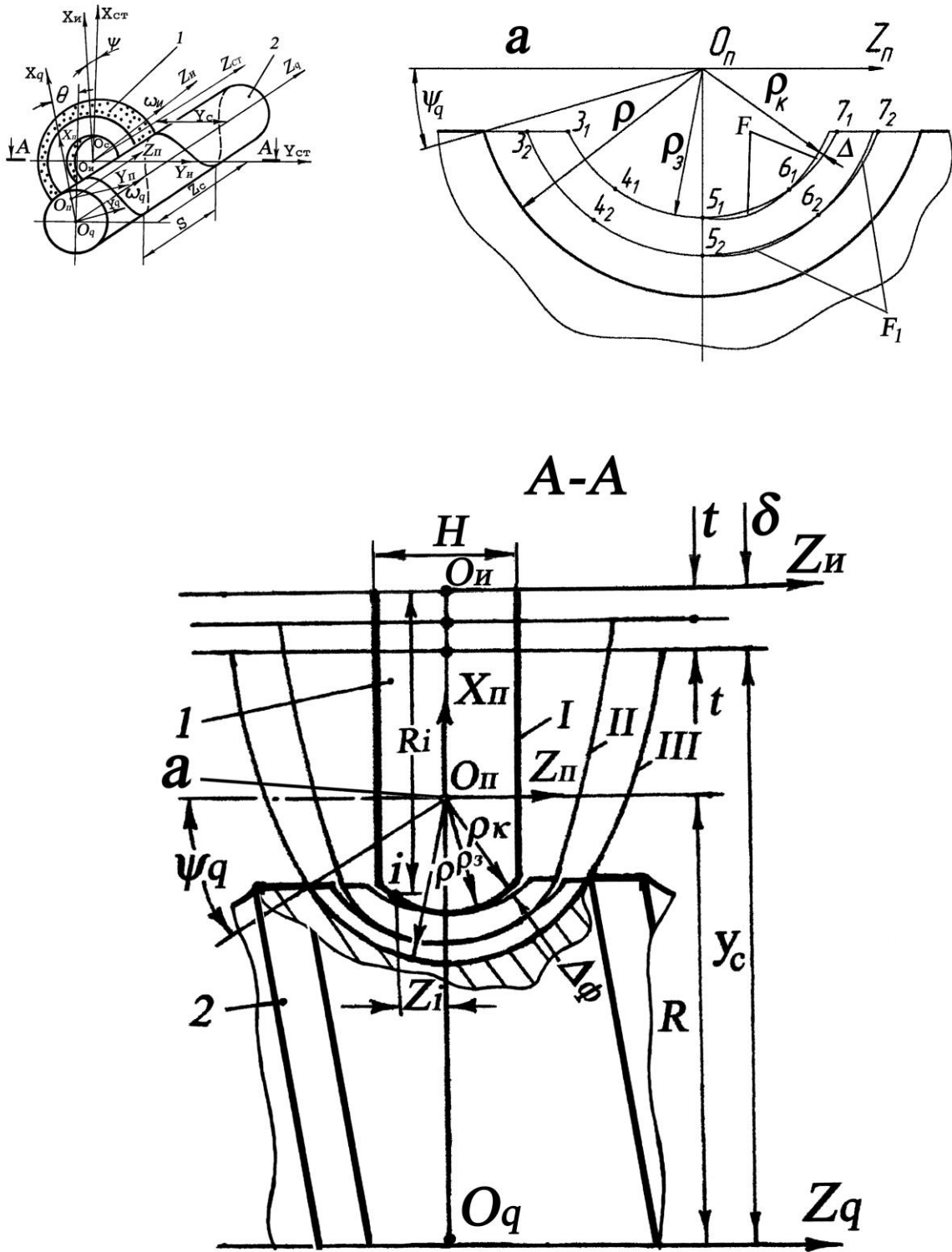


Рис. 1 Схема шлифования ходового винта качения

осей X, Y, Z [4]; $e_4 = (0,0,0,1)^T$; \bar{N}_q – вектор нормали к винтовой поверхности в точке с криволинейными координатами ψ_q, θ ; \bar{V}_q – вектор скорости относительного движения винта 2 (рис. 1) и круга 1; τ_q – время перемещения винта качения при повороте его на угол θ_k в инверсионном движении относительно оси $O_{ii}Z_{ii}$ круга.

Подставив в (2) дискретное значение угла ψ_{qi} и в $\bar{V}_q = \partial \bar{r}_u / \partial \tau_q (2) - \theta_k = 0$, из (2) определяют величину угла θ и за тем из уравнения (1) – радиус-вектор \bar{r}_{ui} точки, принадлежащей линии контакта винта и круга в его системе координат

$$\bar{r}_{ui} = \left(X_{\psi_{qi}}, Y_{\psi_{qi}}, Z_{\psi_{qi}}, 1 \right)^T, \quad (3)$$

где $X_{\psi_{qi}}, Y_{\psi_{qi}}, Z_{\psi_{qi}}$ – координаты точки линии контакта L винта и круга.

Радиус R_i осевого сечения круга 1 (рис. 1, А-А) и его осевая координата Z_i при $X_u = 0$ в пределах i -той точки равны

$$R_i = \sqrt{X_{\psi_{qi}}^2 + Y_{\psi_{qi}}^2}, \quad (4)$$

$$Z_i = Z_{\psi_{qi}}. \quad (5)$$

Радиус-вектор \bar{r}_u , определяемый из уравнений (1) (2), описывает множество инструментальных поверхностей, из которых оптимальную находят на основании анализа геометрических параметров ходового винта качения, его заготовки и снимаемого припуска δ . При многопроходной обработке

$$\delta = t \cdot k, \quad (6)$$

где t – величина поперечной подачи круга 1 (рис. 1, А-А) в направлении, перпендикулярном оси $O_q Z_q$ вращения винта 2 на один проход; k – число продольных проходов круга при съеме припуска δ .

Радиус-вектор осевого сечения круга \bar{r}_{uo} при $X_u = 0$, в системе координат $O_n X_n Y_n Z_n$, в которой ось $O_n Y_n$ совпадает с центром радиуса $\rho_3 = \rho - \delta$ (рис. 1, А-А) нормального профиля резьбы заготовки ходового винта, равен

$$\bar{r}_{3u} = M_2 (Y_c + t \cdot k - R) \cdot \bar{r}_{uo}, \quad (7)$$

где $\bar{r}_{uo} = (0, R_i, Z_i, 1)^T$.

В системе координат $O_n X_n Y_n Z_n$ радиус кривизны ρ_{ki} (рис. 1, А-А) осевого сечения круга определяют по формуле

$$\rho_{ki} = \sqrt{R_{zi}^2 + Z_{zi}^2}, \quad (8)$$

где R_{zi} и Z_{zi} – радиус круга и его осевую координату определяют из выражения радиуса - вектора \bar{r}_{3u} (7)

$$\bar{r}_{3u} = (0, R_{zi}, Z_{zi}, 1)^T. \quad (9)$$

От угла ψ поворота круга при правке и его знака (рис. 1, А-А) зависит радиус кривизны ρ_k его осевого сечения и требуемая высота H круга. Когда направление оси $O_q X_q$ совпадает с осью $O_c Y_{ct}$ (рис. 1) и угол поворота ψ круга равен углу φ наклона винтовой канавки, $\rho_k = \rho$ нормального профиля резьбы. При этом линия контакта винтовой поверхности и круга лежит в плоскости, проходящей через ось $O_c Y_{ct}$ его поворота нормально к винтовой канавке. Требуемая высота круга H равняется

$$H = Z_{i \max} - (-Z_{i \min}) = 2z_{i \max}, \quad (10)$$

где $Z_{i \max}$ и $-Z_{i \min}$ – осевые координаты, определяемые из выражения (5), крайних осевых сечений круга, расположенных вдоль оси OZ_n , начало O_n координат которого находится в плоскости симметрии круга (рис. 1, А-А).

С изменением угла ψ линия контакта L выходит из указанной плоскости, ρ_k и высота круга H (рис. 1, А–А) уменьшаются. При этом величины ρ_k и H зависят не только от угла ψ поворота круга 1, но и от его знака. Как показали вычислительные эксперименты на ЭВМ, при шлифовании ходового винта качения с $\rho = 10$ мм, $R = 40$ мм, $S = 30$ мм, кругом с радиусом $R_k = 50$ мм, максимальная расчетная (10) высота круга $H_{\max} = 14,14$ мм, при $\psi = \varphi = -8^\circ$, и минимальная $H_{\min} = 3,49$ мм, при $\psi = -36^\circ$ (рис. 2, а). С увеличением радиуса круга ($R_k=75$ мм (рис. 2, б) $H_{\min}=3,62$ мм, при $\psi = -33,5^\circ$; $R_k = 100$ мм (рис. 2, в), $H_{\min}=3,87$ мм, при $\psi = -32^\circ$) H_{\min} круга растет незначительно. С ростом шага резьбы (при радиусе круга $R_k=100$ мм) от $S=30$ мм (рис. 2, г) до $S=50$ мм (рис. 2, е) H_{\min} изменяется в пределах $2,34 \div 3,51$ мм. Это дает возможность, изменяя радиус кривизны ρ_k профиля осевого сечения круга и его высоту H_{\min} , снимать различные припуски δ по эквидистантным кривым, а также компенсировать износ профиля круга за счет управления поперечной подачей его и поворотом в адаптивном режиме. Возможность применения кругов малой высоты H_{\min} (10) для шлифования профиля резьбы ходовых винтов качения позволяет использовать высокостойкие алмазные и эльборовые круги на финишной операции, а постоянство глубины резания t по координате обработки профиля в течение всего прохода обеспечит высокое качество шлифования винтовой поверхности.

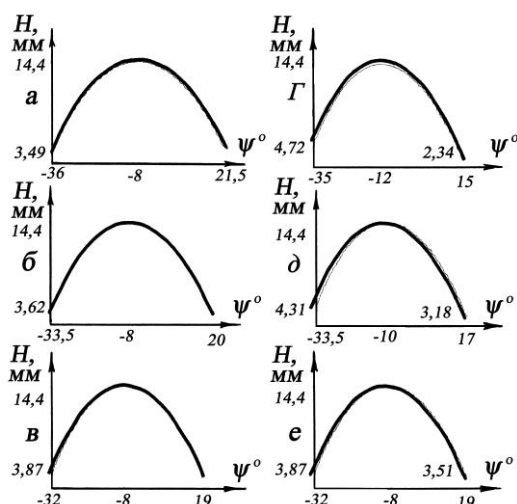


Рис. 2 Графики зависимости расчетной высоты круга от его диаметра, угла скре- щивания и шага резьбы

Частную 3D модель обрабатываемой поверхности ходового винта качения получим из общей 3D модели[5].

$$\begin{aligned} \bar{r}_{qu} = M_6(\theta) \cdot M_3(-Z_c \mp P \cdot \theta) \cdot M_2(-Y_c - t \cdot k) \times \\ \times M_5(-\psi) \cdot M_3(Z_i) \cdot M_6(\theta_k) \cdot M_2(R_i) \cdot e_4 \end{aligned} \quad ; \quad (11)$$

$$\bar{N}_k \cdot \bar{V}_k = \left(\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial i} \times \frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial \theta_k} \right) \cdot \frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial \tau_k} = 0, \quad (12)$$

где \bar{r}_{qu} – радиус-вектор точек обрабатываемого ходового винта качения; R_i – радиус осевого сечения круга 1 в пределах i -той точки профиля; Z_i – его осевая координата; \bar{N}_k – вектор нормали к поверхности круга в точке с координатами i , θ_k ; \bar{V}_k – вектор скорости относительного движения круга 1 и винта 2; τ_k – время поворота круга на угол θ в инверсионном движении относительно оси $O_q Z_q$. Значения других параметров в уравнении (11), аналогичны приведенным в уравнении (1).

Подставив в (12) для i -той точки значение радиуса круга R_i и его осевую координату Z_i и в $\bar{V}_k = \partial \bar{r}_{qu} / \partial \tau_k$ (12) – $\theta = 0$, из (12) находят величину угла θ_k и за тем из уравнения (11) определяют радиус-вектор \bar{r}_{qu} точки, принадлежащей линии контакта круга и ходового винта качения в его системе координат для данного угла θ

$$\bar{r}_{qui} = (x_{qui}, y_{qui}, z_{qui}, 1)^T, \quad (13)$$

где $x_{qui}, y_{qui}, z_{qui}$ – координаты точки линии контакта.

Для описания наружной винтовой поверхности, получаемой за один оборот инверсионного движения круга относительно ходового винта качения, в уравнения (11), (12) подставляют значения угла θ в диапазоне: $\theta = 0 \div 2\pi$, тогда радиус-вектор

$$\bar{r}_{qu} = (x_{i\theta}, y_{i\theta}, z_{i\theta}, 1)^T, \quad (14)$$

где $x_{i\theta}, y_{i\theta}, z_{i\theta}$ – координаты точки обрабатываемой наружной винтовой поверхности с независимыми параметрами i, θ .

Радиус-вектор осевого сечения ходового винта качения получим из (14) при $X_{i,0}=0$

$$\bar{r}_{qoi} = (0, R_{qi}, Z_{qi}, 1)^T, \quad (15)$$

где $R_{qi} = Y_{i,\theta}$ – радиус осевого сечения для i -той точки профиля; $Z_{qi} = Z_{i,\theta}$ – его осевая координата.

Радиус-вектор осевого сечения винта (15) в системе координат $O_n X_n Y_n Z_n$, равен

$$\bar{r}_{3oi} = M_4(\varphi) \cdot M_2(R) \cdot \bar{r}_{qoi}. \quad (16)$$

Радиус кривизны ρ_{zi} (рис. 1, А-А) нормального профиля резьбы винтовой поверхности качения в системе координат $O_n X_n Y_n Z_n$ определяют по формуле

$$\rho_{zi} = \sqrt{R_{3oi}^2 + Z_{3oi}^2}, \quad (17)$$

где R_{3oi} – радиус нормального профиля заготовки ходового винта качения и Z_{3oi} – его осевую координату, находят из выражения радиуса – вектора (16).

$$\bar{r}_{3oi} = (0, R_{3oi}, Z_{3oi}, 1)^T. \quad (18)$$

Текущий радиус кривизны ρ_z (рис. 1, А-А) нормального профиля резьбы заготовки ходового винта качения, в процессе съема припуска δ , зависит от текущих значений угла ψ поворота круга и расстояния l между осями его $O_n Z_n$ и винта $O_q Z_q$

$$l = -Y_c - t \cdot k. \quad (19)$$

В процессе формообразования наружной винтовой поверхности качения 2, когда припуск снят, $\delta=0$ и $l=Y_c$ (19), а угол поворота круга при правке ψ_n равен углу поворота при формообразовании ψ_ϕ , радиус кривизны нормального профиля обрабатываемой винтовой поверхности ρ_{zi} (17) равен номинальному радиусу ρ нормального сечения винтовой канавки (рис. 1, А-А, III) и геометрическая погрешность [6] формообразования $\Delta_\phi = \rho_{zi} - \rho = 0$.

Перед съемом припуска δ инструментальную поверхность рассчитывают (1) (2) для такого углового положения ψ_n круга 1, чтобы его радиус кривизны ρ_k (8) осевого сечения был меньше радиуса ρ_z заготовки нормального сечения наружной винтовой поверхности качения (рис. 1, А-А, I). Определение дискретного угла ψ положения круга (при поперечной подаче на глубину t в конце каждого прохода в процессе съема припуска δ), который обеспечивает минимальное отклонение Δ текущего радиуса кривизны ρ_{zi} нормального сечения обрабатываемой винтовой поверхности от заданно-

го $\rho_{3и} = \rho - t \cdot k$ в виде дуги окружности, осуществлялось по методике, приведенной в работе [6]. При этом в текущей опорной точке 5 (рис. 1, а) и в двух 4 и 6 смежных с ней $\Delta = \rho_{3i} - \rho_{3и} = 0$. Угол ψ поворота круга, который обеспечивает $\Delta=0$ в точках 4 и 6, определяют из выражения

$$\bar{\Delta} = \psi \cdot \bar{l}_{\psi}, \quad (20)$$

где \bar{l}_{ψ} – передаточный коэффициент

$$\bar{l}_{\psi} = M_3(-Z_c \pm P \cdot \theta) \cdot M_2(-Y_c - t \cdot k) \cdot \frac{\partial \delta_{нов}}{\partial \psi} \times \\ \times M_5(-\psi) \cdot M_3(Z_i) \cdot M_6(\theta_k) \cdot M_2(R_i) \quad (21)$$

где $\frac{\partial \delta_{нов}}{\partial \psi} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$ – частная производная матрицы $\delta_{нов}$ поворота [4]. Значения

других параметров в уравнении (21) аналогичны приведенным в уравнениях (1) (11).

Скалярное выражение погрешности Δ_n получают проектированием $\bar{\Delta}$ на направление нормали к обрабатываемой поверхности

$$\Delta_n = \bar{\Delta} \cdot \bar{n}, \quad (22)$$

где \bar{n} – орт нормали к поверхности в обрабатываемой точке, определяемый по методике [4].

В остальных точках 3, 7 и между точками 3, 4, 5, 6, 7, в пределах линии контакта круга и винта качения, стабилизация снимаемого объема осуществляется по методу наименьших квадратов, где разность площадей F (рис. 1, а), расположенных над номинальной линией припуска ρ_3 и под ней, является минимальной. При этом по мере съема припуска δ величина площадей F_1 уменьшается (точки 5₂, 6₂, 7₂) и в процессе формообразования (ρ) $F=0$.

Разработаны трехмерные геометрические модели процессов съема припуска, формообразования и профилирования абразивного круга при шлифовании наружной винтовой поверхности на станках с ЧПУ с управляемым углом скрещивания осей инструмента и винта качения. Предложен метод управления процессом шлифования, который обеспечивает съем припуска в течение каждого прохода по эквидистантным кривым, что повышает производительность и качество шлифования профиля резьбы ходовых винтов качения.

Список литературы: 1. Григорян Г.Д., Мухортов В.Н. Обеспечение стабильности профиля резьбы ходовых винтов качения. – Станки и инструмент, 1986, №12, с. 23 – 24. 2. Способ шлифования винтовой поверхности: А.с. 173161 СССР, МКИ В24В 19/6 / В.И. Кальченко, А.Г. Шеша, № 4653028 / 08. Заявлено 21.02.89. Оpubл. 07.05.92. Бюл. № 17. – 4с. 3. Кальченко В.В. Общая трехмерна (3D) модель поверхностей кругов при шлифовании со скрещивающимися осями инструмента и деталей / Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”: Збірка наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2001. № 6.–с. 114 –118. 4. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с. 5. Кальченко В.В. 3D моделирование обрабатываемых поверхностей при шлифовании со скрещивающимися осями кругов и деталей / Високі технології в машинобудуванні. Зб. Наук. Праць НТУ “ХПІ”. – Харків. – 2001. Вип. 1 (4). – с. 149 –153. 6. Кальченко В.В. Трехмерное геометрическое моделирование погрешности шлифования поверхностей со скрещивающимися осями кругов и деталей / Резание и инструмент в технологических системах. Межд. Научн. – техн. Сб. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2001. вып. 60. с. 90 – 95.

Представлена докт. техн. наук Перепелицей Б.А.