

УДК 621.923.42.

**ШЛІФУВАННЯ ВНУТРІШНІХ ТОРОВИХ ПОВЕРХОНЬ НА
ВЕРСТАТАХ З ЧПК ЗІ СХРЕЩИННИМИ ОСЯМИ
ЗОВНІШНЬОГО КІЛЬЦЯ ШАРИКОПІДШИПНИКА І КРУГА**

Кальченко В.В. , канд. техн. наук;
державний технологічний університет, Чернігів

Разработаны новый способ шлифования внутренних торовых поверхностей на станках с ЧПУ и 3D геометрические модели процессов профилирования абразивных кругов, съема припуска и формообразования.

Розроблено новий спосіб шліфування внутрішніх торових поверхонь на верстатах з ЧПК і 3D геометричні моделі процесів профілювання абразивних кругів, зняття припуску і формоутворення.

A new mode the developed of grinding internal of surfaces on machine tools with DPM and 3D geometrical sample pieces of processes of a contouring of abrasive wheels, removing of an allowance and formcreation.

Шліфування внутрішніх торових поверхонь, наприклад, зовнішніх кілець шарикопідшипників, шарошок бурових долот та інших деталей здійснюють методом копіювання абразивним кругом, заправленим по дузі окружності, що відповідає радіусу утворюючої осьового перерізу деталі [1]. Зняття припуску роблять за рахунок поперечного переміщення круга в горизонтальній площині, в якій розташовані осі обертання його і деталі. В результаті проведених досліджень [1] встановлено, що в процесі зняття припуску глибина різання, довжина і площа контакту круга і деталі змінюються по координаті обробки профілю. Величина врізання інструменту в напрямку, перпендикулярному осі обертання деталі більше припуску δ на обробку і залежить від координат ε_y і ε_z (рис. 1, А-А) його зсувів уздовж координатних осей u_q і z_q , що знижує продуктивність і якість шліфування.

Запропоновано спосіб шліфування зовнішніх торових поверхонь зі схрещинними осями абразивного круга і деталі, що забезпечує зняття припуску по еквідістантним кривим [2]. Для підвищення ефективності шліфування внутрішніх торових поверхонь зі схрещинними осями інструмента і деталі необхідно розробити спеціальні тривимірні математичні моделі профілювання абразивного круга, зняття припуску і формоутворення. На базі моделей створити метод керування процесом шліфування на верстатах з ЧПК, що забезпечить постійну глиби-

ну різання по координаті обробки профілю і величину врізання круга, рівну припуску, що підвищить продуктивність і якість шліфування. Зняття припуску по еквідістантним кривим вимагає спеціального профілювання абразивного круга 1 (рис.1, А-А), яке враховує геометричні параметри заготовки і деталі, і керованих, функціонально погоджених повороту круга на кут ψ відносно осі $O_c Y_{ct}$ і поперечної подачі t уздовж її в процесі шліфування деталі 2.

Спеціальну 3D модель профілювання круга при шліфуванні внутрішніх торових поверхонь одержимо з загальної 3D моделі поверхонь кругів [3] при шліфуванні зі схрещеними осями інструмента і деталі.

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

де \bar{r}_u – радіус-вектор точок поверхні шліфувального круга; M_1, M_2, M_3 – матриці лінійних переміщень уздовж осей X, Y, Z ; M_4, M_5, M_6 – матриці кутових поворотів відносно осей X, Y, Z [4]; θ_k – кутовий параметр, що визначає положення точки на поверхні круга 1 у його системі координат $O_n X_n Y_n Z_n$; ψ – кут повороту осі $O_n Z_n$ обертання шліфувального круга 1 у вертикальній площині відносно осі $O_n Y_n$, що збігає з віссю $O_c Y_{ct}$; Y_c – координата початку координат O_q деталі 2 у системі координат $O_c X_{ct} Y_{ct} Z_{ct}$ станини; θ – кутовий параметр, що визначає положення осі $O_q X_q$, при повороті її відносно осі $O_q Z_q$ деталі; R – радіус початку координат O_n , що збігає з центром радіуса ρ внутрішнього тора, у системі координат $O_q X_q Y_q Z_q$ деталі; ψ_q – кутовий параметр точки утворюючої осьового перерізу деталі 2 (рис. 1, А-А) відносно осі $O_n Y_n$ системи координат $O_n X_n Y_n Z_n$; $e_4 = (0,0,0,1)^T$;

У рівнянні (1) кут ψ (рис. 1) повороту осі $O_n Z_n$ обертання шліфувального круга у вертикальній площині при профілюванні вибирають з умов, що забезпечують, у процесі його підведення для зняття припуску δ , коли осі круга 1 і деталі 2 паралельні, контакт у точці k_1 (рис. 1, а), що лежить в області максимального діаметру внутрішньої торової поверхні заготовки. У всіх інших її точках повинний бути технологічний зазор Δ_T (рис. 1, а) з урахуванням зсувів ε_y і ε_z припуску δ уздовж координатних осей y_q і z_q (рис. 1, А-А) де

$$\Delta_\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2}. \quad (2)$$

Це забезпечує, при швидкому підведенні шліфувального круга 1 з гальмуванням наприкінці шляху, безударний початок процесу зняття припуску. Максимальний кут ψ_{max} (рис. 1) повороту круга в положенні 1' обмежується мінімальним зазором, що допускається, b між оправкою радіусом R_o , на якій закріплюється круг, і внутрішнім діаметром кільця шарикопідшипника, торець якого розташований на відстані C від внутрішньої торової поверхні.

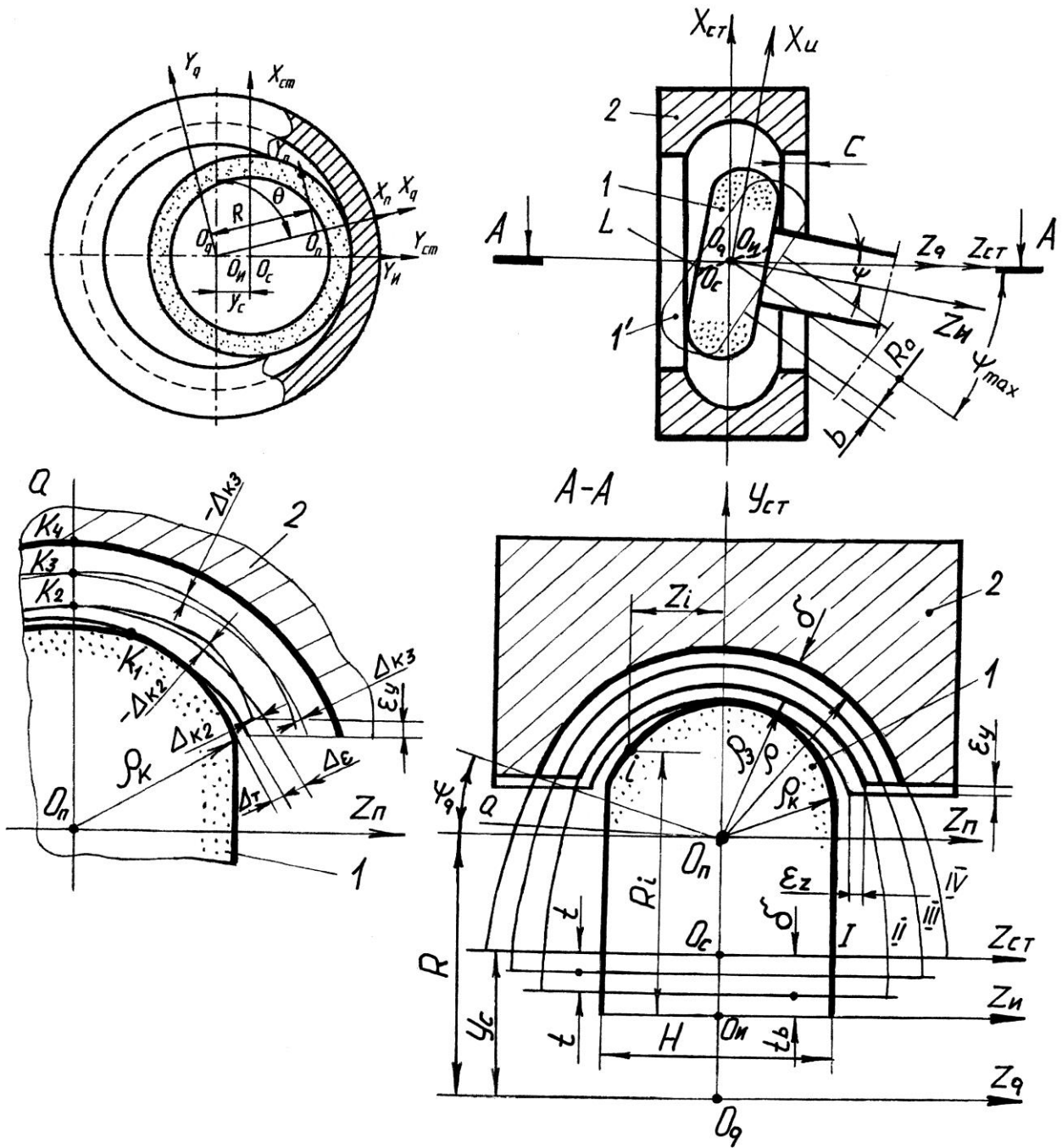


Рисунок 1 – Схема шліфування внутрішніх торових поверхонь зі схрещеними осями круга і зовнішнього кільця шарикопідшипника

$$\psi_{\max} = \arcsin(-R_o - b / \sqrt{y_q^2 + z_q^2}) - \arcsin(y_q / \sqrt{y_q^2 + z_q^2}), \quad (3)$$

де

$$y_q = -R - \rho \cdot \sin \psi_{q\max}, \quad (4)$$

$$z_q = \rho \cdot \cos \psi_{q\max} + c. \quad (5)$$

Позначення параметрів у співвідношеннях (4) (5) аналогічні приведеним у рівнянні (1). y_q і z_q – координати внутрішньої торової поверхні зовнішнього кільця шарикопідшипника в його системі координат.

При однопараметричному огинанні [4] зв'язок між параметрами ψ_q , θ і τ_q має вигляд рівності нулю змішаного добутку трьох векторів приватних похідних вектора r_u .

$$\left(\frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \psi_q} \times \frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \theta} \right) \cdot \frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \tau_q} = 0, \quad (6)$$

де $\frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \psi_q} \times \frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \theta} = \bar{N}_q$ – вектор нормалі до внутрішньої торової поверхні зовнішнього кільця шарикопідшипника в точці з криволінійними координатами ψ_q , θ ; $\frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \tau_q} = \bar{V}_q$ – вектор швидкості відносного руху кільця підшипника 2 (рис. 1) відносно круга 1; τ_q – час переміщення кільця, при повороті його на кут θ_k в інверсійному русі відносно осі $O_{ii}Z_{ii}$ круга.

$$\frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \tau_q} = \frac{\partial M_6(\theta_k)}{\partial \theta_k} \cdot \frac{\partial \theta_k}{\partial \tau_q} \cdot M_{uq}, \quad (7)$$

де $\frac{\partial \theta_k}{\partial \tau_q} = \omega_{uq}$ – кутова швидкість повороту зовнішнього кільця шарикопідшипника відносно осі круга; M_{uq} – матриця переходу із системи координат кільця шарикопідшипника в систему координат круга.

$$M_{uq} = M_5(\psi) \cdot M_2(-Y_c) \cdot M_6(-\theta) \times \\ \times M_1(R) \cdot M_5(-\psi_q) \cdot M_3(-\rho) \cdot e_4. \quad (8)$$

Скалярний добуток векторів \bar{N}_q і \bar{V}_q знаходимо, обчисливши визначник

$$\begin{vmatrix} X_{V_q} & Y_{V_q} & Z_{V_q} \\ X_{\psi_q} & Y_{\psi_q} & Z_{\psi_q} \\ X_{\theta} & Y_{\theta} & Z_{\theta} \end{vmatrix} = 0, \quad (9)$$

де $X_{V_q}, Y_{V_q}, Z_{V_q}$ – координати вектора \bar{V}_q ; $X_{\psi_q}, Y_{\psi_q}, Z_{\psi_q}$ і $X_{\theta}, Y_{\theta}, Z_{\theta}$ – координати векторів дотичних (6).

Підставивши в (8) дискретне значення кута ψ_{qi} й у (7) $-\theta_k = 0$, з (9) визначаємо величину кута θ і потім з рівняння (1) – радіус – вектор \bar{r}_{ui} точки, що належить лінії контакту L (рис. 1) внутрішньої торової поверхні і круга в його системі координат

$$\bar{r}_{ui} = (X_{\psi_{qi}}, Y_{\psi_{qi}}, Z_{\psi_{qi}}, 1)^T, \quad (10)$$

де $X_{\psi_{qi}}, Y_{\psi_{qi}}, Z_{\psi_{qi}}$ – координати точки лінії контакту L.

Радіус R_i осьового перерізу круга 1 (рис. 1, А-А) при $X_u = 0$ в межах i -тої точки дорівнює

$$R_i = \sqrt{X_{\psi_{qi}}^2 + Y_{\psi_{qi}}^2}, \quad (11)$$

Осьова координата – $Z_i = Z_{\psi_{qi}}$.

З рівнянь (1) і (9) визначають радіус-вектор \bar{r}_u , що описує безліч інструментальних поверхонь. Вибір раціональної здійснюють на підставі аналізу залежностей (2) (3) (4) (5), що враховують геометричні параметри внутрішньої торової поверхні зовнішнього кільця шарикопідшипника, заготовки, припуску δ , що знімається і його зсувів ε_y і ε_z уздовж координатних осей Z_q і u_q деталі (рис. 1, А-А). Радіус-вектор осьового перерізу круга \bar{r}_{u0} , при $X_u = 0$, у системі координат $O_{\Pi}X_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}$, де вісь $O_{\Pi}Y_{\Pi}$ збігається з центром радіуса ρ_3 заготовки (рис. 1, А-А), дорівнює

$$\bar{r}_{3u} = M_2(R - y_c - \delta - \Delta_T) \cdot \bar{r}_{u0}, \quad (12)$$

де $\bar{r}_{u0} = (0, R_i, Z_i, 1)^T$; Δ_T – технологічний зазор при швидкому підведенні круга 1 (рис. 1, а) до деталі 2.

Радіус кривизни ρ_{ki} (рис. 1, А-А) осьового перерізу круга в системі координат $O_{\Pi}X_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}$ знаходять зі співвідношення

$$\rho_{ki} = \sqrt{R_{zi}^2 + Z_{zi}^2}, \quad (13)$$

де R_{zi} і Z_{zi} – радіус круга і його осьова координата визначаються з радіуса-вектора \bar{r}_{3u} (12)

$$\bar{r}_{3u} = (0, R_{zi}, Z_{zi}, 1)^T. \quad (14)$$

Радіус кривизни ρ_k (рис. 1, А-А, а) осьового перерізу круга залежить від кута ψ його повороту при правці. При $\psi = 0$, $\rho_k = \rho$ осьового перерізу внутрішньої торової поверхні, лінія контакту L (рис. 1) її і круга лежить у горизонтальній площині. Зі збільшенням ψ лінія контакту L подовжується, виходячи з осьової площини деталі, ρ_k – зменшується. Це дає можливість керувати поточним радіусом кривизни ρ_3 осьового перерізу заготовки в процесі зняття припуску δ .

Спеціальну 3D модель оброблюваної внутрішньої торової поверхні одержимо з загальної 3D моделі [5] оброблюваних поверхонь при шліфуванні зі схрещеними осями кругів і деталей.

$$\begin{aligned} \bar{r}_{qu} = & M_6(\theta) \cdot M_2(y_c + a \cdot \theta + \Delta_T) \times \\ & \times M_5(-\psi) \cdot M_6(\theta_k) \cdot M_3(Z_i) \cdot M_2(R_i) \cdot e_4, \end{aligned} \quad (15)$$

де \bar{r}_{qu} – радіус-вектор точок внутрішньої оброблюваної торової поверхні; $a = \frac{t}{2\pi}$ – постійна архімедової спіралі, по якій, у відносному русі, переміщується круг при зніманні припуску δ ; t – величина поперечної подачі круга 1 у напрямку, перпендикулярному осі O_qZ_q обертання зовнішнього кільця шарикопідшипника на один його оберт; R_i – радіус осьового перерізу круга 1 у межах i -тої точки профілю; Z_i – його осьова координата. Значення інших параметрів у рівнянні (15), аналогічні приведеним у рівнянні (1).

Зв'язок між параметрами i , θ_k і τ_k у рівнянні (15) при однопараметричному огинанні має вигляд

$$\left(\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial i} \times \frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial \theta_k} \right) \cdot \frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial \tau_k} = 0, \quad (16)$$

де $\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial i} \times \frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial \theta_k} = \bar{N}_k$ – вектор нормалі до поверхні круга в точці з координатами i , θ_k ;

$\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial \tau_k} = \bar{V}_k$ – вектор швидкості руху круга 1 (рис. 1) відносно зовнішнього кільця шарикопідшипника 2; τ_k – час повороту круга на кут θ в інверсійному русі відносно осі O_qZ_q деталі.

$$\frac{\partial \bar{r}_{qu}}{\partial \tau_k} = \frac{\partial M_6(\theta)}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau_k} \cdot M_{qu}, \quad (17)$$

де $\frac{\partial \theta}{\partial \tau_k} = \omega_{qu}$ – кутова швидкість повороту круга відносно осі кільця шарикопідшипника;

M_{qu} – матриця переходу із системи координат круга в систему координат деталі.

$$M_{qu} = M_2(Y_c + a \cdot \theta + \Delta_T) \cdot M_5(-\psi) \times \\ \times M_6(\theta_k) \cdot M_3(Z_i) \cdot M_2(R_i) \cdot e^4. \quad (18)$$

Скалярний добуток векторів \bar{N}_k і \bar{V}_k знаходимо, обчисливши визначник

$$\begin{vmatrix} X_{vk} & Y_{vk} & Z_{vk} \\ X_i & Y_i & Z_i \\ X_{\theta k} & Y_{\theta k} & Z_{\theta k} \end{vmatrix} = 0, \quad (19)$$

де X_{vk}, Y_{vk}, Z_{vk} – координати вектора \bar{V}_k ; X_i, Y_i, Z_i і $X_{\theta k}, Y_{\theta k}, Z_{\theta k}$ – координати векторів дотичних (16).

Підставивши в (18) для i -тої точки значення радіуса круга R_i і його осьову координату Z_i і в (17) – кут θ повороту круга відносно осі кільця шарикопідшипника, після обчислення визначника (19), знаходимо величину кута θ_k . За тим з рівняння (15) визначаємо радіус-вектор \bar{r}_{qui} точки, що належить лінії контакту L круга і деталі в її системі координат для заданого кута θ

$$\bar{r}_{qui} = (x_{qui}, y_{qui}, z_{qui}, 1)^T, (20)$$

де $x_{qui}, y_{qui}, z_{qui}$ – координати точки лінії контакту L (рис. 1).

Для опису внутрішньої торової поверхні, одержуваної за один оберт інверсійного руху круга відносно кільця шарикопідшипника, необхідно в рівняння (15), (17), (18), (19) підставити значення кута θ у діапазоні:

$\theta=0 \div 2\pi$, тоді радіус-вектор

$$\bar{r}_{qu} = (x_{i\theta}, y_{i\theta}, z_{i\theta}, 1)^T, (21)$$

де $x_{i\theta}, y_{i\theta}, z_{i\theta}$ – координати точки оброблюваної внутрішньої торової поверхні з незалежними параметрами i, θ .

Радіус-вектор її осьового перерізу одержимо з (21) при $X_{i,\theta}=0$

$$\bar{r}_{qoi} = (0, R_{qi}, Z_{qi}, 1)^T, (22)$$

де $R_{qi} = Y_{i,\theta}$ – радіус осьового перерізу для i -тої точки профілю; $Z_{qi} = Z_{i,\theta}$ – його осьова координата.

Радіус-вектор осьового перерізу зовнішнього кільця шарикопідшипника (22) у системі координат $O_{\Pi}X_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}$ дорівнює

$$\bar{r}_{zoi} = M_2(-R) \cdot \bar{r}_{qoi}. (23)$$

Радіус кривизни ρ_{zi} (рис. 1, A-A) осьового перерізу внутрішньої торової поверхні в системі координат $O_{\Pi}X_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}$ визначають з формули

$$\rho_{zi} = \sqrt{R_{zoi}^2 + Z_{zoi}^2}, (24)$$

де R_{zoi} і Z_{zoi} – радіус осьового перерізу заготовки зовнішнього кільця шарикопідшипника і її осьову координату знаходять з виразу радіуса – вектора (23).

$$\bar{r}_{zoi} = (0, R_{zoi}, Z_{zoi}, 1)^T. (25)$$

Радіус кривизни ρ_z (рис. 1, A-A) осьового перерізу заготовки залежить від поточних значень кута ψ повороту круга і відстані l між осями його $O_{\Pi}Z_{\Pi}$ і зовнішнього кільця шарикопідшипника O_qZ_q

$$l = Y_c + a \cdot \theta + \Delta_T, (26)$$

де $a \cdot \theta = \delta$ – припуск, що знімається.

У процесі формоутворення внутрішньої торової поверхні зовнішнього кільця шарикопідшипника 2, коли припуск знятий, $\delta=0$ і $l=Y_c$ (26), а кут повороту круга при правці ψ_{Π} дорівнює куту повороту при формоутворенні ψ_{Φ} , радіус кривизни оброблюваної поверхні ρ_{zi} (24)

дорівнює радіусу ρ внутрішнього тору (рис. 1, А-А, IV) і геометрична похибка формоутворення $\Delta_{\phi} = \rho_{zi} - \rho = 0$.

Перед зняттям припуску δ інструментальну поверхню розраховують (1) для такого кутового положення ψ_{Π} круга 1, щоб його радіус кривизни ρ_k (13) осевого перерізу був менше радіуса ρ_z заготовки (рис. 1, А-А, I, а) при паралельних осях $O_{\Pi}Z_{\Pi}$ круга 1 і O_qZ_q зовнішнього кільця шарикопідшипника 2. При цьому технологічний зазор Δ_T перекидає похибку Δ_{ϵ} (2) зсуву припуску δ уздовж координатних осей z_q і y_q . Для зовнішнього кільця шарикопідшипника з параметрами внутрішньої торової поверхні $\rho=5$ мм, $R=20$ мм, центральним кутом $\psi_q=90^\circ$, $\delta=0,3$ мм, $\Delta_{\epsilon}=0,1$ мм – розрахунковий кут при правці $\psi_{\max}=14^\circ$, який забезпечує необхідний технологічний зазор Δ_T по всьому профілю при підведенні круга з паралельними осями його і деталі до точки K_1 (рис. 1, А-А, I, а). Де на краю внутрішньої торової поверхні для $\psi=0$ і $\psi_q=45^\circ$, $\Delta_T=0,12$ мм (рис. 2, а); для $\psi_q=36^\circ$, $\Delta_T=0,062$ мм. У процесі повороту круга на кут $\psi=6,4^\circ$, без поперечного його врізання, здійснюється зняття припуску (рис. 2, б), де для $\psi_q=21^\circ$, $\Delta = -0,021$ мм; $\psi_q=36^\circ$, $\Delta = 0$ і $\psi_q = 45^\circ$, $\Delta = 0,021$ мм. При наступній поперечній подачі $t = 0,1$ мм, оптимальний розрахунковий кут повороту круга $\psi=7,9^\circ$ (рис. 1, А-А, III), який забезпечує еквідистантне зняття припуску по всьому профілю з відхиленням меншим 0,01 мм (рис. 2, в).

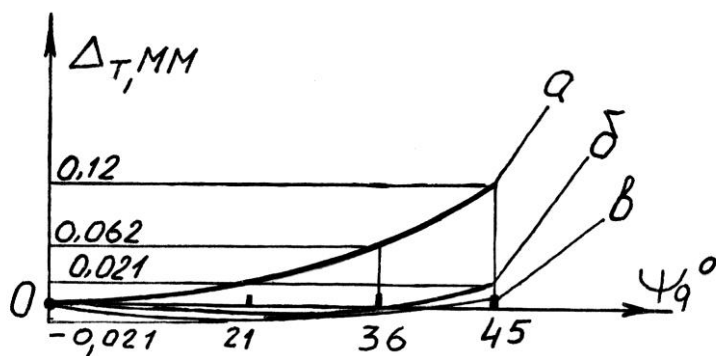


Рисунок 2 – Графіки залежності уточнення форми оброблюваної поверхні в процесі зняття припуску

Висновки

Розроблено новий спосіб шліфування внутрішніх торових поверхонь на верстатах з ЧПК зі схрещеними осями кільця шарикопідшипника і круга та 3D геометричні моделі процесів профілювання абразивних кругів, зняття припуску і формоутворення. Запропоновано метод керування процесом шліфування, що забезпечує зняття припуску по еквідистантним кривим. Постійна глибина різання по координаті обробки профілю досягається за рахунок синхронного повороту і врізання круга, що підвищує продуктивність і якість шліфування.

Література:

1. Кальченко В.И. Шлифование криволинейных поверхностей крупногабаритных деталей. – М.: Машиностроение, 1979. – 160 с.
2. Способ шлифования желоба на круглой детали: А. С. 1301660 СССР, МКИ В24В 19/06./ В.И. Кальченко, А.Г. Шеша. № 3973158/31–08; Заявлена 10.11.85; Опубл. 07.04.87, Бюл. №13.– 4с.
3. Кальченко В.В. Общая трехмерная (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.

Рукопис надійшов 31.10.2002 р.