

БЕЗЦЕНТРОВЕ ПОЗДОВЖНЄ ШЛІФУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ЗІ СТАБІЛІЗАЦІЄЮ ПОЛОЖЕННЯ ОСІ ОБЕРТАННЯ ДЕТАЛЕЙ У ПРОЦЕСІ ЗНЯТТЯ ПРИПУСКУ І ФОРМОУТВОРЕННЯ

Запропоновано новий спосіб безцентрового поздовжнього шліфування циліндричних поверхонь, який забезпечує скасування геометричної похибки схеми формоутворення, за рахунок переміщення осі деталі вздовж прямої, перпендикулярної її торцю, в процесі зняття припуску і формоутворення. Розроблені 3D моделі процесів профілювання ведучого і шліфувального кругів, опорного ножа, зняття припуску і формоутворення.

Завдяки високій продуктивності, безцентрові круглошліфувальні верстати використовують в різноманітних галузях промисловості: підшипниковій, автотракторній, металургійній, електротехнічній, сільськогосподарському машинобудуванні, верстатобудуванні та інших. При безцентровому шліфуванні базування виконується по поверхні деталі, що оброблюється. В існуючих верстатах, в процесі зняття припуску, при поздовжньому шліфуванні циліндричних поверхонь, деталь, яка переміщується в осьовому напрямку, повертається в просторі і обробка ведеться з перехрещеними осями її, ведучого та шліфувального кругів [1, с. 21]. Точність безцентрового поздовжнього шліфування залежить від форм опорного ножа, ведучого і шліфувального кругів та їх взаємного розташування [1, 2].

При моделюванні ведучого круга в роботі [3], його форма виражається тілом обертання, що торкається циліндра, ось якого схрещується з віссю поверхні обертання. Таке представлення коректно при описуванні формоутворення на ділянці, що здійснює калібрування деталі. Воно не враховує вплив безперервного зняття припуску, на конічній ділянці шліфувального круга, в процесі осьового переміщення деталі. В роботах [1, 2] потік деталей, що обробляються, представлено у вигляді безперервного конуса, вісь якого перехрещується з віссю ведучого круга. При описанні його форми не враховується процес формоутворення деталей при огинанні перехідної зони між конічною та циліндричною ділянками шліфувального круга. Як показали дослідження [1, с. 159], саме в цій зоні, в процесі осьового переміщення деталі, виникає похибка її поздовжнього перерізу. Для аналізу процесу формоутворення поперечного перерізу деталі, при безцентровому шліфуванні, розроблені 2D геометричні моделі [1, с. 28, 4, с. 98], які описують передаточні відношення одиничних похибок від ведучого круга і опорного ножа на шліфувальний круг. Ці 2D моделі не враховують просторових поворотів осі деталі в процесі обробки та їх вплив на точність формоутворення.

В роботі [5] приведена тривимірна геометрична модель формоутворення циліндричних поверхонь при безцентровому поздовжньому шліфуванні з перехрещеними осями круга та деталі. В ній доведено, що в процесі поздовжнього переміщення деталі координати X_c та Y_c (рис. 1) початку координат O_q деталі змінюються в залежності від осьової координати Z_c . Це обумовлює похибки твірної деталі в залежності від припуску, що знімається, та її довжини [1]. Сумарний вектор похибки положення точки поверхні, що обробляється, дорівнює сумі векторів геометричної похибки схеми формоутворення та похибки положення точки поверхні, яка виникла внаслідок похибки положення і переміщення вузлів верстата і форми інструмента.

Метою роботи є підвищення точності безцентрового поздовжнього шліфування циліндричних поверхонь за рахунок скасування геометричної похибки схеми формоутворення. Для досягнення цієї мети потрібно розробити такий спосіб

безцентрового поздовжнього шліфування, який би забезпечив, щоб початок координат $O_{qф}$ фактичної системи координат деталі та її осі $X_{qф}, Y_{qф}, Z_{qф}$ співпадали з положенням початку координат O_q (рис. 1) номінальної системи координат деталі 2 та її осями X_q, Y_q, Z_q в процесі шліфування. Тоді малі зміщення початку координат O_q деталі вздовж осей $X_{qф}, Y_{qф}, Z_{qф}$: $\delta_x = \delta_y = \delta_z = 0$, малі кути повороту системи координат $O_q X_q Y_q Z_q$ відносно осей $X_{qф}, Y_{qф}, Z_{qф}$: $\alpha = \beta = \gamma = 0$, і вектор Δ [4] узагальненої геометричної похибки деталі 2 під час обробки дорівнює

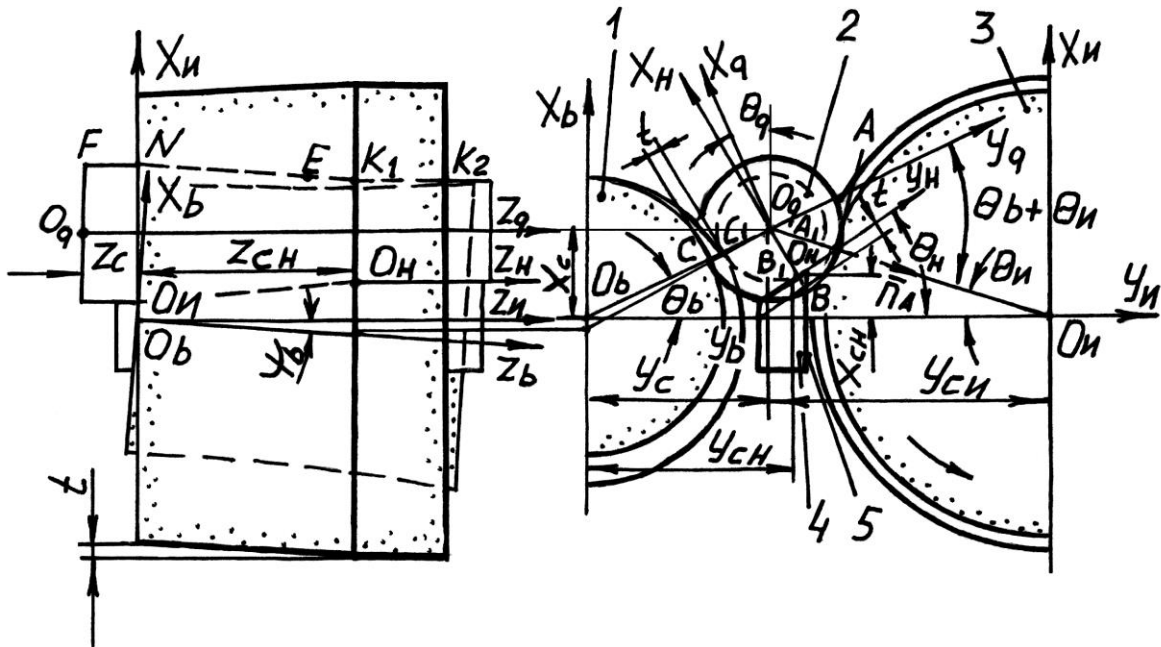


Рисунок 1 – Схема безцентрового поздовжнього шліфування циліндричних поверхонь зі стабілізацією положення осі обертання деталей

$$\Delta = (\delta_x, \delta_y, \delta_z, \alpha, \beta, \gamma)^T = 0. \quad (1)$$

Це положення (1) виконується за умови переміщення початку O_q (рис. 1) координат деталі 2 і її осі $O_q Z_q$ вздовж прямої, що перпендикулярна торцю деталі, в процесі зняття припуску і формоутворення. При повороті деталі 2 відносно осі $O_q Z_q$ під час обробки, також похибка $\Delta=0$ (1), при $m_{ZA} \cdot \gamma=0$, так як

$$m_{ZA} = -R_q(Z_q) \cdot \sin(\theta_{bc} + \theta_{IA}) \cdot \cos(\theta_{bc} + \theta_{IA}) - R_q(Z_q) \cdot \cos(\theta_{bc} + \theta_{IA}) \cdot (-\sin(\theta_{bc} + \theta_{IA})) = 0 \quad (2)$$

де $R_q(Z_q)$ – поточний радіус деталі, що обробляється, в залежності від осьової координати Z_q (3); m_{ZA} – координата моменту m [4, с. 91] одиничного вектора \bar{p}_A (рис. 1) відносно осі $O_q Z_q$, в точці A контакту шліфувального круга 3 і деталі 2; θ_{bc} – кутовий параметр, що визначає положення точки C (рис. 1) контакту ведучого круга 1 і деталі 2 відносно осі $O_b Y_b$; θ_{IA} – параметр, що визначає кутове положення точки A контакту шліфувального круга 3 і деталі 2 відносно осі $O_и Y_и$.

Для забезпечення переміщення початку O_q координат деталі і осі $O_q Z_q$ вздовж прямої, яка перпендикулярна її торцю, потрібно розробити 3D геометричні моделі профілювання ведучого 1 (рис. 1) та шліфувального 3 кругів і опорного ножа 4. Необхідно також розробити методику розрахунку осьового відносного розташування профільованих ділянок ведучого та шліфувальних кругів і опорного ножа, яке забезпечує стабілізацію положення осі O_q обертання деталі під час гвинтового переміщення її в процесі зняття припуску та формоутворення.

Для розробки 3D моделі профілювання ведучого круга 1 (рис. 1), при безцентровому поздовжньому шліфуванні циліндричних поверхонь зі стабілізацією положення осі обертання деталей, необхідно мати тривимірні геометричні моделі заготовки і деталі в її системі координат. Конічна зовнішня поверхня, з твірною NEK_1 (рис. 1), яка представляє собою потік заготовок, та циліндрична поверхня, с твірною K_1K_2 , яка представляє деталі, що обробляються, можуть бути описані радіусом-вектором \bar{r}_q комбінованої поверхні обертання 2 (рис.1), яка охоплює параметри заготовок і деталей

$$\bar{r}_q(Z_q, \theta_q) = M_3(Z_q) \cdot M_6(\theta_q) \cdot M_1(-R_q(Z_q)) \cdot e_4, \quad (3)$$

де $R_q(Z_q)$ – радіус заготовки або деталі, що обробляються, в залежності від осьової координати Z_q (рис. 1) деталі; θ_q – кутовий параметр; $e_4 = (0,0,0,1)^T$ – координати поточної точки поверхні деталі; M_1, \dots, M_6 – матриці розміром 4×4 відображають перетворення систем координат уздовж і навколо координатних осей [4].

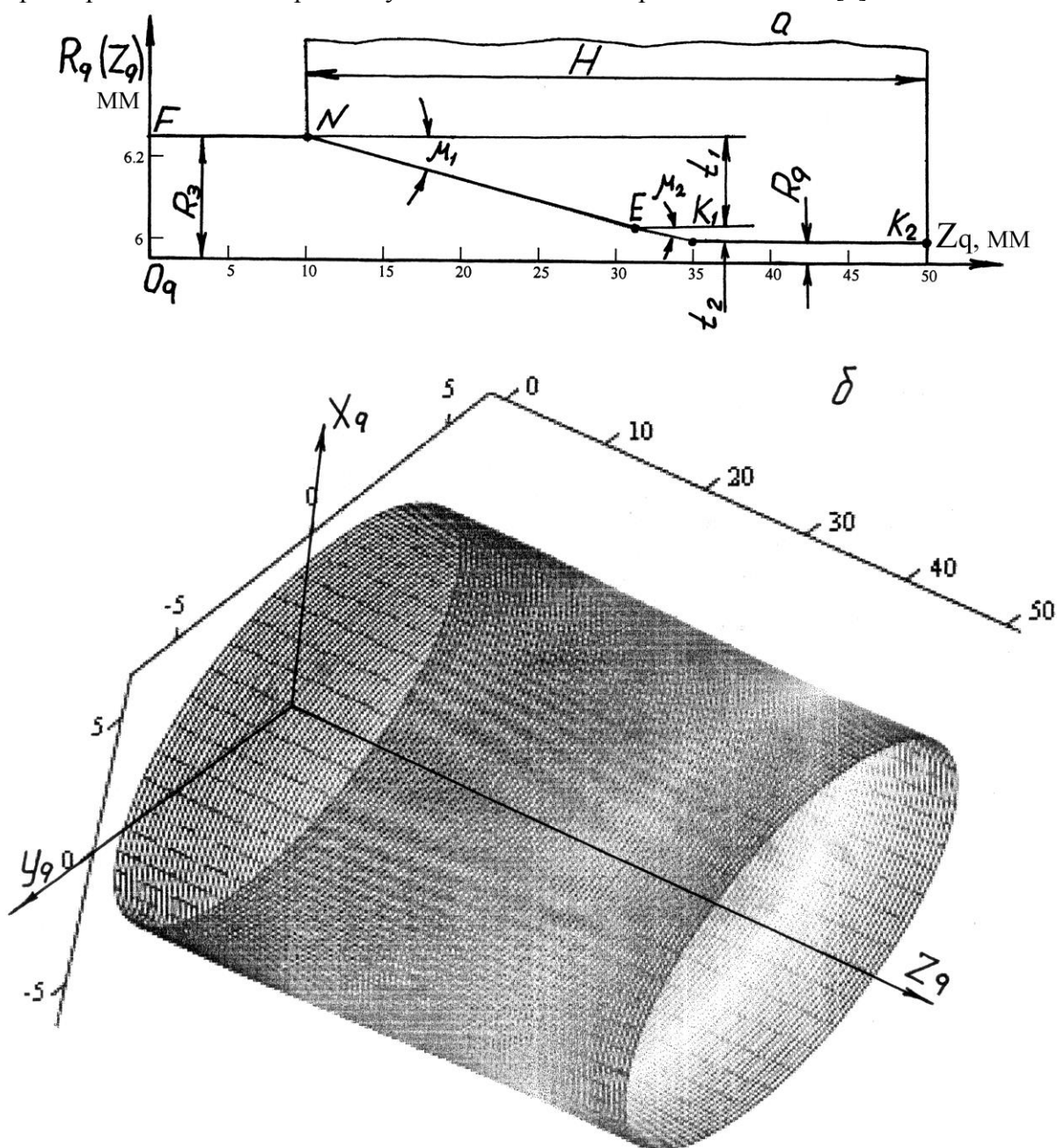


Рисунок 2 – Комбінована поверхня обертання, яка охоплює параметри заготовок і деталей

У рівнянні (3) радіус $R_q(Z_q)$ заготовки або деталі, що обробляються, дорівнює

$$R_q(Z_q) = R_3 - [tg\mu_2 \cdot (Z_q - Z_E) \cdot (\Phi(Z_q - Z_E) - \Phi(Z_q - Z_{K1}))] - t_2 \cdot \Phi(Z_q - Z_{K1}) - t_1 \cdot \Phi(Z_q - Z_E) - [tg\mu_1 \cdot (Z_q - Z_N) \cdot (\Phi(Z_q - Z_N) - \Phi(Z_q - Z_E))] \quad (4)$$

де R_3 – радіус (рис. 2, а) заготовки на ділянці твірної між точками F і N, яка надходить на одробку; μ_1 і μ_2 – кути нахилу твірної заготовки при знятті чорнового припуску t_1 та чистового – t_2 ; Z_q – поточна осьова координата точок твірної заготовки.

$$tg\mu_1 = \frac{t_1}{Z_E - Z_N}; tg\mu_2 = \frac{t_2}{Z_{K1} - Z_E} \quad (5)$$

де Z_N, Z_E, Z_{K1} – осьові координати вузлових точок N, E і K_1 твірної заготовки, а точки K_1 і K_2 твірної деталі, радіусом R_q (рис. 2, а) співпадають з ділянкою шліфувального круга 3, що калібрує.

Розроблена програма в пакеті MathCAD [7] дозволила, на базі запропонованої універсальної 3D моделі (3) (4), розраховувати параметри комбінованої поверхні обертання, яка враховує параметри заготовок і деталей, що обробляються. На рисунку 2, б приведена комбінована поверхня обертання, яка розрахована для наступних параметрів: $R_q=6\text{мм}$; $R_3=6,25\text{мм}$; $Z_q=50\text{мм}$; $t_1=0,22\text{мм}$; $t_2=0,03\text{мм}$; $Z_E-Z_N=21\text{мм}$; $Z_{K1}-Z_E=4\text{мм}$; $H=40\text{мм}$.

Для профілювання ведучого круга 1 (рис. 1) необхідно скласти рівняння, що визначає лінію контакту

$$\bar{V}_{bq} \cdot \bar{n}_q = 0, \quad (6)$$

де \bar{V}_{bq} – вектор швидкості відносного руху поверхні деталі 2 в системі координат ведучого круга 1; \bar{n}_q – одиничний вектор нормалі до поверхні деталі.

Вектор нормалі дорівнює векторному добуткові векторів дотичних до поверхні деталі. Для їхнього визначення необхідно диференціювати радіус-вектор $\bar{r}_q(Z_q, \theta_q)$ (3) поверхні деталі по обох параметрах Z_q і θ_q . Для знаходження вектора \bar{V}_{bq} відносної швидкості необхідно перенести радіус-вектор $\bar{r}_q(Z_q, \theta_q)$ (3) поверхні деталі в систему координат ведучого круга і диференціювати його за часом

$$\bar{r}_{bq}(\theta_b, \psi_b, y_c, X_c, Z_q, \theta_q) = M_6(\theta_b) \cdot M_5(\psi_b) \cdot M_2(y_c) \cdot M_1(X_c) \cdot M_3(Z_c) \cdot \bar{r}_q(Z_q, \theta_q), \quad (7)$$

де \bar{r}_{bq} – радіус-вектор точок поверхні ведучого круга 1 (рис. 1); θ_b – кутовий параметр, що визначає кутове положення деталі 2 в системі координат ведучого круга 1; ψ_b – кут перехрещення осей обертання ведучого круга 1 і деталі 2; X_c, Y_c, Z_c – координати початку координат O_q (рис. 1) деталі 2 в системі координат ведучого круга 1.

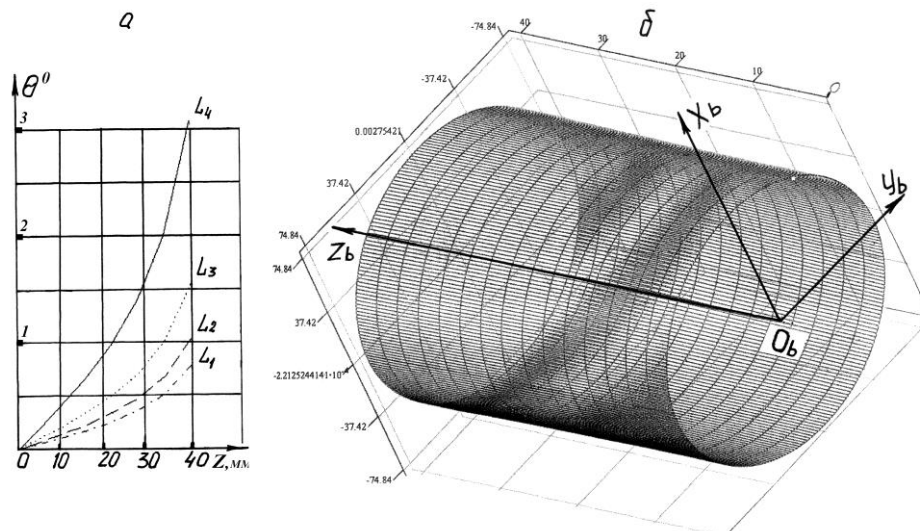


Рисунок 3 – Лінії контакту і поверхня ведучого круга, які розраховані по 3D моделі (6,7)

В рівнянні (7) кутовий параметр θ_b єдиний, котрий змінюється під час обробки, тому, при визначенні вектора \bar{V}_{bq} відносної швидкості, вектор \bar{r}_{bq} необхідно диференціювати по параметру θ_b .

Розроблена програма в пакеті MathCAD [7] дозволила розраховувати положення лінії контакту L (рис. 3, а) на поверхні деталі 2 в залежності від кута ψ_b (рис. 1) перехрещення осей її і ведучого круга 1. На рисунку 3, а наведені лінії контакту L₁, L₂, L₃, L₄, розраховані для кутів $\psi_b = 1^\circ, 2^\circ, 3^\circ, 4^\circ$. При обертанні лінії контакту навколо осі O_bZ_b ведучого круга утвориться його поверхня. На рисунку 3, б показана поверхня ведучого круга, яка розрахована на базі його 3D моделі (6) (7) для наступних параметрів: $\psi_b = 4^\circ$; $y_c = 80,75$ мм, при найбільшому радіусі 75 мм ведучого круга 1 (рис. 1); $X_c = 6,36$ мм; $Z_c = 10$ мм. Параметри радіуса-вектора $\bar{r}_q(Z_q, \theta_q)$ комбінованої поверхні обертання (3) наведені вище.

Для профілювання шліфувального круга 3 (рис. 1) необхідно розробити рівняння, що визначає лінію контакту

$$\bar{V}_{uq} \cdot \bar{n}_q = 0, \quad (8)$$

де \bar{V}_{uq} – вектор швидкості відносного руху поверхні деталі 2 в системі координат шліфувального круга 3. Методика розрахунку одиничного вектора нормалі \bar{n}_q до поверхні деталі наведена вище (6) (7). Для знаходження вектора \bar{V}_{uq} відносної швидкості необхідно перенести радіус-вектор $\bar{r}_q(Z_q, \theta_q)$ (3) поверхні деталі в систему координат шліфувального круга 3 і диференціювати його за часом (по параметру θ_u).

$$\begin{aligned} \bar{r}_{Iq}(\theta_{II}, \psi_{II}, Y_{СИ}, X_c, Z_q, \theta_q) = M_6(\theta_{II}) \cdot M_5(\psi_{II}) \times \\ \times M_2(-Y_{СИ}) \cdot M_1(X_{СИ}) \cdot M_3(Z_{СИ}) \cdot \bar{r}_q(Z_q, \theta_q) \end{aligned}, \quad (9)$$

де \bar{r}_{Iq} – радіус-вектор точок поверхні шліфувального круга 3 (рис. 1); θ_{II} – параметр, що визначає кутове розташування деталі 2 в системі координат шліфувального круга 3; $X_{СИ}, Y_{СИ}, Z_{СИ}$ – координати початку координат O_q деталі в системі координат шліфувального круга; ψ_{II} – кут перехрещення осей обертання шліфувального круга 3 і деталі 2.

Розроблена програма в пакеті MathCAD дозволила розраховувати положення лінії контакту на поверхні деталі 2 у залежності від параметрів комбінованої поверхні обертання (3), яка враховує параметри заготовки і деталі, кута ψ_{II} перехрещення осей її і шліфувального круга, та координат $X_{СИ}, Y_{СИ}, Z_{СИ}$ розташування деталі в системі координат круга 3.

При обертанні лінії контакту навколо осі O_{II}Z_{II} шліфувального круга утворюється його поверхня. Поточний радіус R_i (рис. 4) поверхні шліфувального круга, в точці \dot{i} , дорівнює

$$R_i = \sqrt{X_{IL}^2 + y_{IL}^2}, \quad (10)$$

де X_{IL}, Y_{IL} – координати лінії контакту у системі координат шліфувального круга.

Поточна осьова координата Z_i (рис. 4) перерізу поверхні шліфувального круга з радіусом R_i, дорівнює

$$Z_i = Z_{IL}, \quad (11)$$

де Z_{IL} – осьова координата лінії контакту в системі координат круга.

На рисунку 4 показана поверхня шліфувального круга, яка розрахована для наступних параметрів: $Y_{СИ} = 105,79$ мм, при найбільшому радіусі 100 мм шліфувального круга 3 (рис. 1); $X_{СИ} = 6,36$ мм; $\psi_{II} = 0$, $Z_{СИ} = 10$ мм.

Тривимірна геометрична модель шліфувального круга, з урахуванням отриманих розрахункових i -тих точок профілю, має вигляд

$$\bar{r}_I(\theta_I, i) = M_3(Z_i) \cdot M_6(\theta_I) \cdot M_2(R_i) \cdot e_4, \quad (12)$$

де \bar{r}_I – радіус-вектор точок поверхні шліфувального круга; θ_I – кутовий параметр точки i профілю круга.

3D геометрична модель точок робочої поверхні опорного ножа 4 (рис. 1) описується радіус-вектором

$$\bar{r}_H = M_3(Z_H) \cdot M_1(X_H(Z_H)) \cdot M_2(Y_H(Z_H)) \cdot e_4, \quad (13)$$

де Z_H – поздовжня координата твірної робочої поверхні ножа; $X_H(Z_H)$ – поперечна координата в напрямку, перпендикулярному до осі O_qZ_q обертання деталі, в залежності від поточної координати Z_H (рис. 1); $Y_H(Z_H)$ – координата, яка визначає поточну ширину робочої поверхні опорного ножа в залежності від координат Z_H і бокових площин 5 (рис. 1).

В рівнянні (13) поточна координата $X_H(Z_H)$ дорівнює

$$X_H(Z_H) = [tg\mu_2 \cdot (Z_H - Z_{K1}) \cdot (\Phi(Z_H - Z_{K1}) + \Phi(Z_H - Z_E))] + t_2 \cdot \Phi(Z_H - Z_E) + t_1 \cdot \Phi(Z_H - Z_N) + [tg\mu_1 \cdot (Z_H - Z_E) \cdot (\Phi(Z_H - Z_E) + \Phi(Z_H - Z_N))] \quad (14)$$

де значення параметрів у рівнянні (14), аналогічні значенням в рівняннях (4) і (13).

Початок O_H (рис. 1) координат $O_H X_H Y_H Z_H$ опорного ножа 4 співпадає з точкою K_1 (рис. 1 – координата $Z_{сн}$) твірної деталі. Тому у рівнянні (14) при позитивному значенні координати Z_H , $X_H = 0$. При негативних значеннях Z_H , X_H описується рівнянням (14) і має негативні значення.

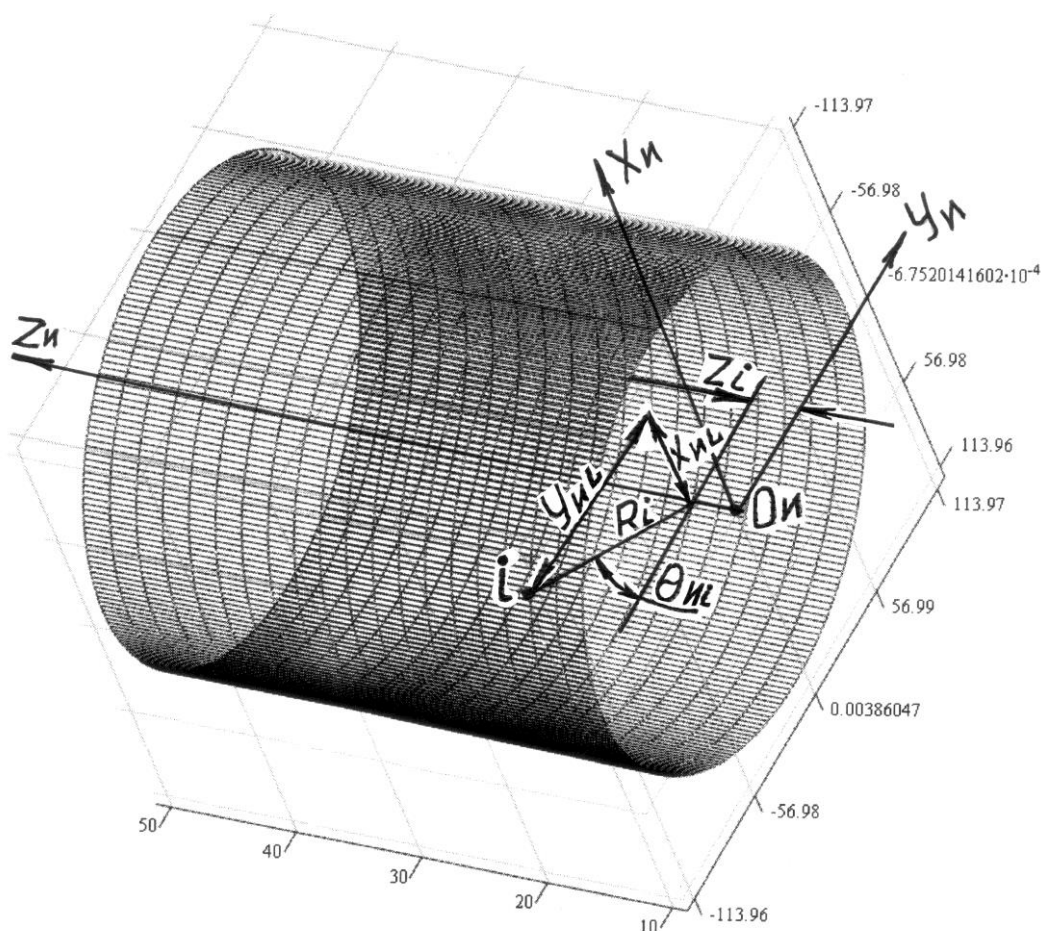


Рисунок 4 – Робоча поверхня шліфувального круга, яка розрахована по 3D моделі (8, 9)

Щоб базування деталі 2 на опорному ножі і ведучому крузі виконувалось по поверхні, що оброблена шліфувальним кругом, необхідно їх елементи базування

змістити в осьовому напрямку відносно шліфувального круга. При цьому однойменні точки твірних шліфувального круга 3, опорного ножа 4 і ведучого круга 1 повинні розташовуватись на гвинтовій лінії з параметром

$$P = \frac{S_o}{2\pi}, \quad (15)$$

де S_o – величина осьової подачі деталі 2 на один оберт.

Для виконання цих умов, осьове зміщення $Z_{он}$ ножа, дорівнює

$$Z_{он} = \theta_{зн} \cdot P, \quad (16)$$

де $\theta_{зн} = 90^0 - (\theta_n + \theta_{II})$ – кут між точками А і В (рис. 1) контакту деталі 2 з шліфувальним кругом 3 і опорним ножом 4; θ_n – кут нахилу площини ножа.

Осьове зміщення $Z_{об}$ ведучого круга 1, дорівнює

$$Z_{об} = \theta_{zb} \cdot P, \quad (17)$$

де $\theta_{zb} = 180^0 - (\theta_{II} + \theta_b)$ – кут між точками А і С (рис. 1) контакту деталі 2 з шліфувальним 3 та ведучим 1 кругами.

Для опису 3D моделі процесу зняття припуску і формоутворення необхідно одержати рівняння, що визначає лінію контакту шліфувального круга 3 (рис. 1) і деталі 2

$$\bar{V}_{II} \cdot \bar{n}_{II} = 0, \quad (18)$$

де \bar{V}_{II} – вектор швидкості відносного руху круга в системі координат деталі; \bar{n}_{II} – одиничний вектор нормалі до поверхні круга.

Для визначення векторів дотичних до поверхні шліфувального круга, при визначенні вектора нормалі до неї, необхідно диференціювати радіус-вектор $\bar{r}_{II}(\theta_{II}, i)$ (12) поверхні круга по обох параметрах θ_{II} і i . Для визначення вектора \bar{V}_{II} необхідно перенести радіус-вектор $\bar{r}_{II}(\theta_{II}, i)$ у систему координат деталі і диференціювати за часом

$$\begin{aligned} \bar{r}_{qII}(Z_{СИ}, \theta_q, \psi_{II}, Y_{СИ}, X_{СИ}, \theta_{II}, i) = M_3(Z_{СИ}) \cdot M_6(\theta_q) \times \\ \times M_5(-\psi_{II}) \cdot M_2(Y_{СИ}) \cdot M_1(-X_{СИ}) \cdot \bar{r}_{II}(\theta_{II}, i) \end{aligned}, \quad (19)$$

де \bar{r}_{qII} – радіус-вектор точок поверхні, що обробляється. Значення інших параметрів у рівнянні (19) аналогічні приведеним у рівняннях (9) і (12).

Координата $Z_{СИ}$ початку координат шліфувального круга 3 в системі координат деталі 2, в процесі зняття припуску і формоутворення, дорівнює

$$Z_{СИ} = Z_o - p \cdot \theta_q, \quad (20)$$

де Z_o – осьова координата, яка відповідає початку обробки деталі.

У рівняннях (19) (20) кутовий параметр θ_q єдиний, що змінюється під час обробки, і при визначенні вектора \bar{V}_{II} відносної швидкості, \bar{r}_{qII} (19) диференціюють по параметру θ_q .

Розроблено програму в пакеті MathCAD, що дає можливість розраховувати положення лінії контакту на поверхні шліфувального круга в залежності від поточного значення осьової координати $Z_{СИ}$ (20) і встановленого кута ψ_{II} перехрещення осей. При обертанні лінії контакту навколо осі деталі по гвинтовій лінії з параметром p (15) утворюється поточна поверхня заготовки.

Рівняння (18) (19) (20) представляють собою 3D модель зняття припуску і формоутворення циліндричних поверхонь при безцентровому шліфуванні. При $Z_{СИ} = Z_o$ – заготовка 2 (рис. 1) торкається шліфувального круга 3 в точці А (рис. 1), потім через кут її повороту $\theta_{зн}$ (16) – ножа 4 в точці В, а через кут θ_{zb} (17) – ведучого круга 1 в точці С. Коли $Z_{СИ} = Z_E - Z_N$, а координата $Z_{к2}$ заготовки 2 співпадає з торцем шліфувального круга 3 висотою Н (рис. 1) (рис. 2, а), отримаємо поверхню

заготовки приведена на рисунку 2, б. При $Z_{СИ} \geq Z_{K2}$ отримаємо оброблену циліндричну поверхню з радіусом R_q (рис. 2, а) деталі 2, яка торкається кругів в точках A_1, B_1, C_1 .

Розроблено новий спосіб безцентрового поздовжнього шліфування циліндричних поверхонь і тривимірні геометричні моделі процесів профілювання кругів, опорного ножа, зняття припуску і формоутворення. Підвищення точності шліфування здійснюється за рахунок скасування геометричної похибки схеми формоутворення. Це забезпечується профілюванням опорного ножа, ведучого і шліфувального кругів та їх осьовим відносним розташуванням.

Подальші дослідження доцільно направити на оптимізацію профілів опорного ножа, ведучого і шліфувального кругів та їх вплив на точність формоутворення при урахуванні деформацій, які виникають в процесі шліфування.

Література:

1. Прохоров А.Ф., Константинов К.Н., Волков Л.П. Настройка и эксплуатация бесцентровых шлифовальных станков. – М.: Машиностроение, 1976. – 192 с.
2. Филькин В.П., Колтунов И.Б. Прогрессивные методы бесцентрового шлифования. – М.: Машиностроение, 1971. – 204 с.
3. Солонимский В.И. Теория и практика бесцентрового шлифования – М.: Машгиз, 1952. – 286 с.
4. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1986. – 336с.
5. Кальченко В.В. 3D моделирование обрабатываемых поверхностей при шлифовании со скрещивающимися осями кругов и деталей // Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць НТУ „ХПІ”. – Харків, 2001 – Вип. 1 (4) – с. 149-153.
6. Кальченко В.В. Трёхмерное геометрическое моделирование погрешности шлифования поверхностей со скрещивающимися осями кругов и деталей // Резание и инструмент в технологических системах. – Межд. научн. – техн. сборник. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2001. – Вып. 60. - С. - 90-95.
7. Дьяконов В. MathCAD: Учебный курс - СПб: Питер, 2000. - 592 с.