ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.923.42
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/50

Рудик А.В.
кандидат технічних наук, доцент

Рудик В.А.
Фірма ТАН

ВПЛИВ ПОХИБОК НАЛАДКИ ВЕРСТАТУ НА ПОХИБКИ ОБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ ОБЕРТАННЯ

Точність машин визначає швидкохідність, енергетичну ефективність, матеріалоємність, надійність, довговічність та інші експлуатаційні показники. Точність суттєво впливає на собівартість виготовлення. широко розповсюджених деталей машин, обмежених поверхнями обертання.

Якість обробки поверхонь визначається властивостями поверхневого шару. Фінішна обробка поверхонь обертання з сучасних матеріалів лезвійним інструментом часто ускладнена. Тому її здійснюють на фінішних операціях, зазвичай шліфуванням. Складові точності визначають проекцією на орт нормалі різниці між номінальною та реальною поверхнями. Подібним розрахунком визначена проекція швидкості відносної подачі на орт нормалі. Тому, визначені формоутворення, продуктивність, товщина зрізу, режими різання та інші показники. Це підкреслює універсальність та актуальність досліджень. Відома методика розрахунку точності обробки удосконалена. В якості прикладів розглянуті розрахунки показників точності обробки на токарному верстаті торців та поверхонь обертання. Використаний розрахунок матриці передатних коефіцієнтів двох стороннього торцево-шліфувального верстату. Верстат має продовжену функцію формоутворення та враховує розміри ланок. Врахований зв'язок між криволінійними координатами поверхні інструмента. Обчислення площі поверхні деталі виконано за допомогою якобіана. Складена матриця передатних коефіцієнтів впливу похибок положення верстатних ланок на технологічні.

Доведений вплив похибок положення верстатних ланок на технологічні на прикладах обробки поверхонь обертання для токарного та двох стороннього торцево-шліфувального верстату.

Доведена можливість взаємної корекції технологічних похибок на прикладі торцево-шліфувального верстату. Показники точності обробки на верстатах перевірені трьома розрахунковими методами та експериментально. Похибка знаходиться в межах 1,5 %.

Ключові слова: *точність, шліфування, похибка, верстат, корекція.*

Постановка проблеми. Точність машин – один з найважливіших показників якості, який суттєво впливає на швидкохідність, енергетичну ефективність, матеріалоємність, надійність та довговічність [1]. Точність визначає собівартість виготовлення деталей. Розвиток техніки пов'язаний із безперервним підвищенням вимог до точності машин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Подібно до методики статті визначені продуктивність, формоутворення, режими різання [2].

Розрахунок показників точності був представлений на прикладі обробки торців двох стороннього торцево-шліфувального верстату [3,4]. Задача досягнення потрібної точності вирішена лише частково, для одного типу верстату. Проблема може бути вирішеною для загального випадку та будь якого типу верстату.

Постановка завдання. 1. Удосконалити відому методику розрахунку точності. 2. Довести на прикладах токарного та торцево-шліфувального верстату обробку поверхонь обертання. Завдання – обґрунтувати вплив похибок положення ланок верстата та їх взаємну компенсацію на технологічні похибки.

Виклад основного матеріалу. Номінальну поверхню $\mathbf{r_0}$ [1] характеризують ідеальним розташуванням верстатних ланок. Функція формоутворення (ФФ) токарного верстату описує спектр поверхонь, які можна обробити складена з добутку лише трьох матриць (n=3) перетворення СК $\mathbf{r_0}$:

$$r_0(x,z,\varphi) = A^6(\varphi)\cdot A^3(z)\cdot A^1(x)\cdot e^4 = \left(x\cdot\cos\varphi \quad x\cdot\sin\varphi \quad z; \quad 1\right),^T$$

Вектор r_0(x,z,q) залежить від змінних параметрів, два з яких z,q рухомі, описують криволінійні координати, фіксована змінна X– визначає розмір.

Рухомі координати поверхні Z, φ, спрямовані вздовж та навколо осі Z обертання, z знаходиться в межах розміру L; x – фіксоване переміщення різця визначає радіальний розмір деталі x=R, e^4 – біжуча точка, яка співпадає з вершиною. Через наявні похибки положення верстатних ланок, крім номінальної r_0, розрізняють реальну, або базову, поверхню r_b, положення якої щодо номінальної r_0 характеризує технологічну похибку Δr_b та може бути охарактеризованим різницею [6]:

$$\Delta\overrightarrow{r_b} = \overrightarrow{r_b} - \overrightarrow{r_0}\ . \tag{1}$$

Векторну похибку враховують сумою: розмірної похибки ; малих зсувів (або поворотів); та спотворенням форми:

$$\Delta\overrightarrow{r_b} = \left(\Delta\overrightarrow{r_r} + \Delta\overrightarrow{r_e} + \Delta r_s\right)^{\rightarrow}.$$

Для практики, рівняння (1) зручно записувати як технологічну похибку в проекції на орт нормалі, який визначають $\left|\vec{n}\right| = \left|\dfrac{\partial\overrightarrow{r_0}}{\partial z}\times\dfrac{\partial\overrightarrow{r_0}}{\partial q}\cdot\dfrac{1}{\left|\vec{n}\right|}\right|$. Технологічну похибку, зручно описати скалярним добутком векторів:

$$\Delta r_b = Q\cdot\Delta n \tag{2}$$

Вектор Q складений з *шуканих* елементів q_i технологічної похибки. вектор Δn являє собою відомі проекції на орт нормалі n цих складових.

Довжину векторів ***p*** (2) визначають похибками розмірів ***r***; малих зсувів (поворотів) ***e***; можливого умовного спотворення форми ***s***:

$$p = r + e + s \tag{3}$$

Кількість r розмірних похибок r=n-m, де n – кількість ланок формотворного коду (n=3), кількість m=2 – координат, які відтворюють *рухомі* ланки:

$$\Delta r_r = q_i\cdot\left[\frac{\partial\overrightarrow{r_0}}{\partial q_i}\cdot\vec{n}\right], \tag{4}$$

де q_i – елемент вектора Q, шукана похибка розміру, кількість *розмірних* похибок r≥(n-2).

Кількість малих зсувів (та поворотів) менше шести (e≤6) описують матрицею ξ_b, або сумою добутків невідомих похибок на δq_i*$D_{iб}$] :

$$\varepsilon_b = \begin{bmatrix} 0 & -\gamma_b & \beta_b & \delta_{xb} \\ \gamma_b & 0 & -\alpha_b & \delta_{yb} \\ -\beta_b & \alpha_b & 0 & \delta_{zb} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^{n}\left[\Delta q_{iб}\cdot D^j_{iб}\right]. \tag{5}$$

Кожну зі складових проекції на нормаль Δn зручно представити добутком нормалі часткової похідної до номінальної поверхні dr_0/dq_i на орт. $\Delta n_i = {\partial\overrightarrow{r_0}}\big/{\partial q_i}\cdot\overrightarrow{n}$ елементи похибок малих зсувів та поворотів отримують:

$$\Delta r_b = Q\cdot\Delta n = \sum_{i=1}^{p}\Delta q_i\cdot\left(D_i\cdot\vec{r}_0\cdot\vec{n}\right). \tag{6}$$

Проекція технологічної похибки на орт нормалі повинна бути мінімальною, та складається з окремих доданків:

$$\Delta r_{e.i} = q_i \cdot \left(D_i \cdot \vec{r}_0 \cdot \vec{n} \right). \tag{7}$$

Визначають похибку спотвореної $\overrightarrow{\Delta r_s} = \Delta \vec{r}_0 + \delta \vec{r}_s$.

В найпростішому випадку, спотворення можна не враховувати Δβ=0.

По елементах вектора Δn технологічних похибок визначають вагову матрицю Hij взаємного впливу між елементами, розміром p×p:

$$H_{ij} = \frac{1}{S} \int_S \Delta n_i \cdot \Delta n_j \cdot dS, \tag{8}$$

де площа поверхні деталі S, а dS її елемент.

Знаходять матрицю, обернену до вагової H^{-1}.

Вектор Δn може містити тригонометричні функції. Враховують, що лише інтеграл квадрата тригонометричної функції дорівнює π, решта дорівнює нулю:

$$\int_0^{2\pi} (\cos\varphi) d\varphi = \int_0^{2\pi} (\sin\varphi) d\varphi = \int_0^{2\pi} (\sin\varphi \cdot \cos\varphi) d\varphi = 0; \quad \int_0^{2\pi} (\cos^2\varphi) d\varphi = \int_0^{2\pi} (\sin^2\varphi) d\varphi = \pi.$$

Згідно функції формоутворення (ФФ), знаходять загальну похибку верстата у вигляді суми добутків окремих похибок положення ланок:

$$\Delta r_n = \sum_{i=0}^{l} \sum_{j=1}^{6} \delta q_i^j \cdot \left[A_{0,i} \cdot \varepsilon_i \cdot A_{i,l} \vec{r}_l \right] \cdot \vec{n}, \tag{9}$$

де i – номер ланки ФФ, δq_i^j – шукана j-та похибка $\boldsymbol{\varepsilon_{ij}}$ i-ої ланки.

Вектор **B** похибок положення верстатних ланок, довжиною *k*, складають по елементах, де його i-ий елемент B_i :

$$B_i = \frac{1}{S} \int_S \Delta n_i \cdot \Delta r_n \cdot dS \tag{10}$$

Знаходять матрицю шуканих похибок:

$$Q = B \cdot H^{-1}, \tag{11}$$

Дисперсію σ^2, між базовою та номінальною поверхнями визначають:

$$\sigma^2 = \frac{1}{S} \cdot \iint_S \left(\Delta r_n - [Q \cdot \Delta n] \right)^2 \cdot dS : \tag{12}$$

де середньо квадратичне відхилення $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$.

Елемент матриці передатних коефіцієнтів між *k*-ою вхідною верстатною похибкою положення ланки та *l*-ою технологічною., в межах розмірів оброблюваної поверхні, визначають:

$$W_{ik} = \frac{\frac{1}{S} \cdot \iint_S B_k \cdot \Delta n_i \cdot dS}{\frac{1}{S} \cdot \iint_S \left(\Delta n_i \right)^2 \cdot dS} = \left(\frac{1}{H_{ii}} \right) \cdot \frac{1}{S} \cdot \iint_S \left(B_k \cdot \Delta n_i \right) \cdot dS \tag{13}$$

Складена [**1**] діагностична таблиця впливу верстатних похибок на технологічні. Розглянемо приклади обробки окремих окремі поверхонь.

Точність обробки торця.

Вектор номінальної поверхні торця $r_0(x, \varphi) = \begin{pmatrix} x \cdot \cos\varphi \\ x \cdot \sin\varphi \\ C \\ 1 \end{pmatrix}$,

де C=z – розмір, що характеризує положення торця.

Вектор одиничної нормалі до торцевої поверхні $n_T = \begin{pmatrix}0 & 0 & 1 & 0\end{pmatrix}^T$.

Елемент площі та загальна площа торця $dS = x \cdot d\phi \cdot dx,\ S = \pi \cdot R^2$

Похибки положення торця (малі розміри δx, δy, γ_b) не враховують, бо їх проекція на нормаль n_T дорівнює нулю. Поверхня ковзає «сама по собі». Матриця технологічних похибок містить лише кутові розміри α_b,β_b кількість можливих зсувів (поворотів): та розмірну похибку Δc.

Шуканий вектор $Q = \begin{bmatrix}\alpha_b & \beta_b & \Delta c\end{bmatrix}$.

Малі зсуви та повороти

$$\Delta r_{e1} = \alpha_b \cdot \left[D_4 \cdot \vec{r}_0 \cdot \vec{n} \right],$$

$$\Delta n_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \cdot \cos\phi \\ x \cdot \sin\phi \\ c \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = x \cdot \sin\phi$$

$$\Delta r_{e2} = \beta_b \cdot \left[D_5 \cdot \vec{r}_0 \cdot \vec{n} \right],$$

$$\Delta n_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \cdot \cos\phi \\ x \cdot \sin\phi \\ c \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = -x \cdot \cos\phi$$

Розмірна похибка $\Delta r_r = \frac{\overline{\partial \vec{r}_0}}{\partial c} = \Delta c \cdot \left[\frac{\partial \vec{r}_0}{\partial c} \cdot \vec{n} \right] = \Delta c \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \Delta c \cdot 1,\ \Delta n_3 = 1$

Вектор коефіцієнтів $\Delta n = \begin{bmatrix} x \cdot \sin\phi & -x \cdot \cos\phi & 1 \end{bmatrix}$.

Визначають матрицю H розміром 3×3, враховуючи площу торцевої поверхні S=π*R² її елемент, $dS = x \cdot dx \cdot d\varphi$ та межі інтегрування [0.R]. [0.2π]

$$H(R) = \frac{1}{\pi \cdot R^2} \cdot \int_0^{2\pi}\int_0^{R} \Delta n_{i,j} \left(d\phi \cdot x \cdot dx \right) = \frac{1}{\pi \cdot R^2} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\pi \cdot R^4}{4} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\pi \cdot R^4}{4} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R^2/4 & 0 & 0 \\ 0 & R^2/4 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\pi \cdot R^2} \end{bmatrix}$$

Зворотна матриця $H(R)^{-1} = \begin{bmatrix} 4/R^2 & 0 & 0 \\ 0 & 4/R^2 & 0 \\ 0 & 0 & \pi \cdot R^2 \end{bmatrix}$

Похибки положення ланок верстату утворюють баланс точності верстата Δr_n:

$$\Delta r_n(x,\phi) = \left(\xi_0 \cdot A^6 \cdot A^3 \cdot A^1 + A^6 \cdot \xi_1 \cdot A^3 \cdot A^1 + A^6 \cdot A^3 \cdot \xi_2 \cdot A^1 + A^6 \cdot A^3 \cdot A^1 \cdot \xi_3 \right) \cdot \overrightarrow{n_T}$$

або $\Delta r_n(x,\phi) = x \cdot (\alpha_0 \cdot \cos\phi - \beta_0 \cdot \sin\phi + \beta_1 + \beta_2)$

Знаходимо елементи вектора В впливу верстатних на технологічні похибки. $B_i = \frac{1}{S} \int_S \Delta n_i \cdot \Delta r_n \cdot dS$. Визначають вектор похибок $Q = B \cdot H^{-1}$,

$$\alpha_b = \frac{4}{R^2} \cdot \left[\frac{1}{\pi \cdot R^2} \cdot \int_0^{2\pi}\int_0^{R} \left(x \cdot \sin\phi \right) \cdot \left[x \cdot (\alpha_0 \cdot \cos\phi - \beta_0 \cdot \sin\phi + \beta_1 + \beta_2) \right] \cdot x \cdot dx \cdot d\phi \right] = -\ \beta_0$$

$$\beta_b = \frac{4}{R^2}\cdot\left[\frac{1}{\pi\cdot R^2}\cdot\int_0^{2\pi}\int_0^R(-x\cdot\cos\phi)\cdot\left[x\cdot(\alpha_0\cdot\cos\phi-\beta_0\cdot\sin\phi+\beta_1+\beta_2)\right]\cdot x\cdot d\phi\cdot dx\right]=-\ \alpha_0$$

$$\Delta c=\pi\cdot R^2\cdot\left[\frac{1}{\pi\cdot R^2}\cdot\int_0^{2\pi}\int_0^R\left(1\cdot\left[x\cdot(\alpha_0\cdot\cos\phi-\beta_0\cdot\sin\phi+\beta_1+\beta_2)\right]\right)\cdot x\cdot d\phi\cdot dx\right]=\frac{R}{3}\cdot(\beta_1+\beta_2)$$

Отже, кутові технологічні похибки торцевої поверхні залежать лише від кутових похибок встановлення заготовки – нульової ланки. Ці похибки можуть з’явитися під час закріплення. Похибка відхилення від перпендикулярності $\sqrt{\left[\alpha_b{}^2+\beta_b{}^2\right]}$. Визначають дисперсію $\sigma^2=\frac{1}{S}\cdot\iint_S\left(\Delta r_n-\Delta q\cdot\Delta n\right)^2 dS$

$$\sigma^2=\frac{1}{S}\cdot\iint_S\left(\begin{gathered}\left[x\cdot(\alpha_0\cdot\cos\phi-\beta_0\cdot\sin\phi+\beta_1+\beta_2)\right]-\\-\left[-\beta_0\cdot x\cdot\sin\phi+\left(\alpha_0\cdot x\cdot\cos\phi\right)+\left(\frac{R}{3}\cdot(\beta_1+\beta_2)\cdot 1\right)\right]\end{gathered}\right)^2\cdot x\cdot d\phi\cdot dx$$

$$\sigma^2=\frac{1}{\pi\cdot R^2}\cdot\int_0^{2\pi}\int_0^R\left(\frac{2\cdot R}{3}\cdot(\beta_1+\beta_2)\right)^2\cdot x\cdot d\phi\cdot dx=\frac{4}{9}R^2\cdot(\beta_1+\beta_2)^2$$

Середньо квадратичне відхилення: $\sigma=\frac{2}{3}R\cdot(\beta_1+\beta_2)$

де Δq*nΔ –проекція на нормаль обумовлена наявністю похибок верстатних ланок; $S=\pi R^2$ – площа торцевої поверхні деталі, $dS=x*d\varphi*dx$ – її елемент $\sigma=\sqrt{\sigma^2}=\frac{2}{3}R\cdot(\beta_1+\beta_2)$

Наприклад, при спотворенні торця поверхнею з малим кутом π/2-β, спрямованим перпендикулярно осі z обертання (рис. 1)

$$\overrightarrow{\delta r_s}=\frac{\delta\vec{r}_s}{\delta\beta}=\begin{bmatrix}x\\0\\x\cdot tg\beta\\0\end{bmatrix}\text{ або }\Delta n_s=\frac{\delta\vec{r}_s}{\delta\beta}\cdot\vec{n}=\begin{bmatrix}x\\0\\x\cdot tg\beta\\0\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}0\\0\\1\\0\end{bmatrix}\approx x\cdot\beta$$

Довжина вектора Δn збільшується до чотирьох елементів $Q=\left[\Delta c\quad\alpha_b\quad\beta_b\quad\beta_1\right]$. Відповідно збільшуються розміри матриці H

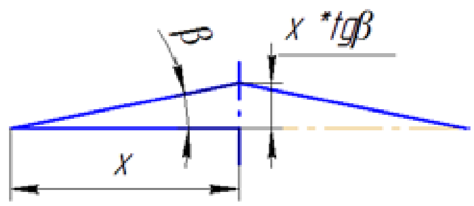

Рис. 1. Схема до розрахунку похибки торця

$$\Delta r_s=\Delta r_b+\delta r_c=\begin{bmatrix}x\cdot\cos\phi\\x\cdot\sin\phi\\c\\1\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}x\\0\\x\cdot tg\beta_1\\0\end{bmatrix},$$

$$\vec{n}^T\cdot\overrightarrow{\delta r_s}=x\cdot tg\beta_1\approx x\cdot\beta_1$$

$$H=\begin{bmatrix}\frac{2}{R} & 0 & 0 & -\beta\\ 0 & \frac{R}{3} & 0 & 0\\ 0 & 0 & \frac{R}{3} & 0\\ -\beta & 0 & 0 & \frac{3\cdot\beta}{R}\end{bmatrix}\quad \text{Обернена матриця } H^{-1}=\begin{bmatrix}2\cdot R & 0 & 0 & -\frac{3}{\beta}\\ 0 & \frac{3}{R} & 0 & 0\\ 0 & 0 & \frac{3}{R} & 0\\ -\frac{3}{\beta} & 0 & 0 & \frac{6}{R\cdot\beta^2}\end{bmatrix}$$

Визначають кут конуса β_1.

Показаний вплив на технологічні похибки положення верстатних ланок. Знайдена дисперсія, спотвореної конусом форми. Визначають, яка з похибок є більшою. Слід враховувати зміну положення заготовки під час закріплення.

Вплив похибок на точність обробки циліндричної поверхні

Вектор номінальної поверхні циліндричної ступені **r0** $r_0(z,\varphi)=\begin{pmatrix}R\cdot\cos\varphi\\ R\cdot\sin\varphi\\ z\\ 1\end{pmatrix}$,

де x=R – фіксоване радіальне переміщення, що визначає розмір деталі.

Елемент площі dS поверхні $dS=R\cdot d\varphi\cdot dz$. Орт нормалі $n^T=\begin{bmatrix}\cos\phi & \sin\phi & 0 & 0\end{bmatrix}$

Не враховують рухи спрямовані вздовж та навколо осі Z циліндричної поверхні $\delta_{zb}=0$ $\gamma_b=0$, кількість можливих малих переміщень n=4

Вектор малих зсувів, складений із добутків нормалі та часткових похідних $\Delta\vec{r}_i=\Delta q_i\cdot{\partial\vec{r}_0}/{\partial q_i}=\Delta q_i\cdot\left[D_i\cdot\vec{r}_0\cdot\vec{n}\right]$ по всіх зсувах, включно кутові похибки.

Для зсуву вздовж осі X отримують

$$\Delta r_{e1}=\delta_{Xb}\cdot\Delta n_i=\delta_{Xb}\cdot\left[D_1\cdot\vec{r}_0\cdot\vec{n}\right],\ \textit{або}$$

$$\Delta n_i=\begin{bmatrix}0&0&0&1\\0&0&0&0\\0&0&0&0\\0&0&0&0\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}R\cdot\cos\phi\\ R\cdot\sin\phi\\ z\\ 1\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\cos\phi\\ \sin\phi\\ 0\\ 0\end{bmatrix}=\cos\phi$$

$$\Delta r_{e2}=\delta_{Yb}\cdot\Delta n_2=\delta_{Yb}\cdot\left[D_2\cdot\vec{r}_0\cdot\vec{n}\right],\textit{де}$$

$$\Delta n_2=\begin{bmatrix}0&0&0&0\\0&0&0&1\\0&0&0&0\\0&0&0&0\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}R\cdot\cos\phi\\ R\cdot\sin\phi\\ z\\ 1\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\cos\phi\\ \sin\phi\\ 0\\ 0\end{bmatrix}=\sin\phi$$

$$\Delta r_{e3}=\alpha_b\cdot\Delta n_3=\alpha_b\cdot\left[\cdot D_4\cdot\vec{r}_0\cdot\vec{n}\right],\ \textit{де}$$

$$\Delta n_3=\begin{bmatrix}0&0&0&0\\0&0&-1&0\\0&1&0&0\\0&0&0&0\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}R\cdot\cos\phi\\ R\cdot\sin\phi\\ z\\ 1\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\cos\phi\\ \sin\phi\\ 0\\ 0\end{bmatrix}=-z\cdot\sin\phi$$

$$\Delta r_{e4} = \beta_b \cdot \left[D_5 \cdot \vec{r}_0 \cdot \vec{n} \right], \partial e$$

$$\Delta n_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \cdot \cos\phi \\ R \cdot \sin\phi \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\phi \\ \sin\phi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = z \cdot \cos\phi$$

Розмірний параметр циліндричної ступені ΔR (r=n-2=1):

$$\Delta r_r = \Delta R \cdot \left[\frac{\partial \vec{r}_0}{\partial R} \cdot \vec{n} \right] = \Delta R \cdot \begin{bmatrix} \cos\phi \\ \sin\phi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\phi \\ \sin\phi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \Delta R \cdot 1, \quad \Delta n_5 = 1$$

Або разом $\Delta n = \left[\cos\phi \quad \sin\phi \quad -z \cdot \sin\phi \quad z \cdot \cos\phi \quad 1 \right]$

Матриця ваги H розміром (p * p) враховує зважений (методом найменших квадратів) вплив між технологічними похибками.

$$H = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{L}{2} & 0 \\ 0 & 1 & -\frac{L}{2} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{L}{2} & \frac{L^2}{2} & 0 & 0 \\ \frac{L}{2} & 0 & 0 & \frac{L^2}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

Обернена: $$H^{-1} = 2 \cdot \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & \frac{2}{L} & 0 \\ 0 & \frac{2}{3} & -\frac{2}{3 \cdot L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2}{3 \cdot L} & \frac{4}{3 \cdot L^2} & 0 & 0 \\ \frac{2}{L} & 0 & 0 & \frac{4}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 & \frac{4}{L} & 0 \\ 0 & \frac{4}{3} & -\frac{4}{3 \cdot L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{4}{3 \cdot L} & \frac{8}{3 \cdot L^2} & 0 & 0 \\ \frac{4}{L} & 0 & 0 & \frac{8}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Шуканий вектор технологічних похибок Q=[δ_{xb}, δ_{yb}, α_b, β_b, ΔR]^T положення *базової* поверхні визначають з рівняння: $Q = B \cdot H^{-1}$

Можливе спотворення, наприклад, конусністю (s>0), не враховуємо.

Вектор B верстатних похибок, складений з урахуванням впливу похибок положення ланок. Проекцію Δr_n, для загального випадку токарного верстату визначають:

$$\Delta r_0(z, \varphi) \cdot n = \left(\varepsilon_0 \cdot A^6 \cdot A^3 \cdot A^1 + A^6 \cdot \varepsilon_1 \cdot A^3 \cdot A^1 + A^6 \cdot A^3 \cdot \varepsilon_2 \cdot A^1 + A^6 \cdot A^3 \cdot A^1 \cdot \varepsilon_3 \cdot e^4 \right) \cdot n,$$

Малі похибки положення заготовки – нульова ланка, перший доданок ξ_0, відповідають зміні заготовки щодо осі центрів шпинделя, присутні під час її затискання: $\varepsilon_0 \cdot A^6 \cdot A^3 \cdot A^1 \cdot n = \left(\delta_{x0} \cdot \cos\phi + \delta_{y0} \cdot \sin\phi \right) + \beta_0 \cdot z$.

Другий доданок при ξ_1 відповідає зміні положення осі шпинделя відносно поперечного супорта. Третій доданок при ξ_2 відповідає малій похибці положення між супортами поперечним та поздовжнім.

$$A^6 \cdot \varepsilon_1 \cdot A^3 \cdot A^1 \cdot n = \delta_{x1} \cdot + \beta_1 \cdot z.$$

$$A^6 \cdot A^3 \cdot A^1 \cdot \varepsilon_2 \cdot n = \delta_{x2} \cdot + \beta_2 \cdot z.$$

Вектор Δr_n являє собою довгий ланцюг, котрий складається із окремих доданків, які враховують залежно від результату добутку множників.

Після спрощень: $\Delta r_n = \left(\delta_{x0} \cdot \cos\phi + \delta_{y0} \cdot \sin\phi\right) + \sum_{i=1}^{3} \delta_{xi} + z \cdot \sum_{i=0}^{3} \beta_i.$

Знаходять елементи вектора верстатних похибок $B_i = \int_S n\Delta_i \cdot \Delta r_n \cdot dS$,

$$B_1 = \frac{1}{2\pi RL} \cdot \int_0^{2\pi}\int_0^{L} \left(\cos\phi \cdot \left[\left(\delta_{x0} \cdot \cos\phi + \delta_{Y0} \cdot \sin\phi\right) + \sum_{i=1}^{3} \delta_{xi} + z \cdot \sum_{i=0}^{3} \beta_i \right] \right) \cdot R \cdot dz \cdot d\phi = \frac{\delta_{x0}}{2}$$

$$B_2 = \frac{1}{2\pi RL} \cdot \int_0^{2\pi}\int_0^{L} \left(\sin\phi \cdot \left[\left(\delta_{x0} \cdot \cos\phi + \delta_{Y0} \cdot \sin\phi\right) + \sum_{i=1}^{3} \delta_{xi} + z \cdot \sum_{i=0}^{3} \beta_i \right] \right) \cdot R \cdot dz \cdot d\phi = \frac{\delta_{y0}}{2}$$

$$B_3 = \frac{1}{2\pi RL} \cdot \int_0^{2\pi}\int_0^{L} \left(-z \cdot \sin\phi \cdot \left[\left(\delta_{x0} \cdot \cos\phi + \delta_{Y0} \cdot \sin\phi\right) + \sum_{i=1}^{3} \delta_{xi} + z \cdot \sum_{i=0}^{3} \beta_i \right] \right) \cdot R \cdot dz \cdot d\phi = \frac{-L \cdot \delta_{y0}}{4}$$

$$B_4 = \frac{1}{2\pi RL} \cdot \int_0^{2\pi}\int_0^{L} \left(z \cdot \cos\phi \cdot \left[\left(\delta_{x0} \cdot \cos\phi + \delta_{Y0} \cdot \sin\phi\right) + \sum_{i=1}^{3} \delta_{xi} + z \cdot \sum_{i=0}^{3} \beta_i \right] \right) \cdot R \cdot dz \cdot d\phi = \frac{L \cdot \delta_{x0}}{4}$$

$$B_5 = \frac{1}{2\pi RL} \cdot \int_0^{2\pi}\int_0^{L} \left(1 \cdot \left[\left(\delta_{x0} \cdot \cos\phi + \delta_{Y0} \cdot \sin\phi\right) + \sum_{i=1}^{3} \delta_{xi} + z \cdot \sum_{i=0}^{3} \beta_i \right] \right) \cdot R \cdot dz \cdot d\phi = \frac{\sum_{i=1}^{3} \delta_{xi}}{2\pi} + \frac{L}{4\pi} \cdot \sum_{i=0}^{3} \beta_i$$

Згідно $Q = B \cdot H^{-1}$, визначають шукані елементи вектора технологічних похибок Q=[δ_{xb}, δ_{yb}, α_b, β_b, ΔR]T положення *базової* поверхні залежно від похибок ланок:

$$\delta_{xb} = \left(4 \cdot B_1 + \frac{4}{L} \cdot B_4 \right) = \frac{\delta_{x0}}{4} 4 + \frac{L \cdot \delta_{x0}}{4} \cdot \frac{4}{L} = 2 \cdot \delta_{x0}$$

$$\delta_{yb} = \left(\frac{2}{3} \cdot B_2 - \frac{2}{3L} \cdot B_3 \right) = \frac{2}{3} \cdot \delta_{y0} - \frac{L}{4} \cdot \frac{4}{3L} \cdot \delta_{y0} = \frac{1}{3} \cdot \delta_{y0}$$

Технологічні похибки, які визначають биття заготовки, можуть бути усуненими лише її зсувом вздовж відповідних осей.

$$\alpha_b = \left(-\frac{4}{3L} \cdot B_2 + \frac{8}{3L^2} \cdot B_3 \right) = - -\frac{4}{3L} \cdot \frac{\delta_{y0}}{2} - \frac{8}{3L^2} \cdot \frac{L \cdot \delta_{y0}}{4} = -\frac{4}{3} \cdot \frac{\delta_{y0}}{L}$$

$$\beta_b = \left(\frac{4}{L} \cdot B_1 + \frac{8}{L^2} \cdot B_4 \right) = \frac{4}{L} \cdot \frac{\delta_{x0}}{2} + \frac{8}{L^2} \cdot \frac{L}{4} \cdot \delta_{x0} = 4 \cdot \frac{\delta_{x0}}{L}$$

Загальна кутова похибка $\varepsilon_b = \sqrt{{\alpha_b}^2 + {\beta_b}^2}$

Похибка розміру $\Delta R = B_5 = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\sum_{i=1}^{3} \delta_{xi} + L \cdot \sum_{i=0}^{3} \beta_i \right).$

Дисперсія щодо номінального положення: $\sigma^2 = \frac{1}{S} \cdot \iint_S \left(\Delta r_n - \Delta q \cdot N\Delta \right)^2 dS$

де $\Delta r_n - \Delta q \cdot N\Delta$ – сумарна похибка положення верстатних ланок.

$$\sigma^2 = \frac{1}{S} \cdot \iint_S \begin{pmatrix} \left[\left(\delta_{x0} \cdot \cos\phi + \delta_{y0} \cdot \sin\phi\right) + \sum_{i=1}^{3} \delta_{xi} + z \cdot \sum_{i=0}^{3} \beta_i \right] - 2\left(\delta_{x0} \cdot \cos\phi + \delta_{y0} \cdot \sin\phi\right) - \\ -0 - \sum_{i=1}^{3} \delta_{xi} + \frac{L}{2} \cdot \sum_{i=0}^{3} \beta_i \end{pmatrix}^2 \cdot R \cdot dz \cdot d\phi$$

Доведений вплив положення ланок на окремі складові точності. Досягнення потрібної точності можна досягти за рахунок аналізу діагностичних сигналів технологічних похибок [1].

Найбільший практичний інтерес для розрахунку представляють похибки ланок, які дозволяють усувати їх вплив. Слід враховувати вплив силового навантаження. Можливе спотворення конусністю циліндричної ділянки характеризують кутом β.

Точність шліфування торців при компенсації кутів орієнтації кругів верстата моделі 3342 АДО

Фінішну обробку відповідальних поверхонь здійснюють шліфуванням. До торцевого шліфування надають жорсткі вимоги як до точності обробки, так і високої продуктивності. А саме, для торців твердосплавних пластин важливими є вимоги щодо паралельного положення торців до базової площини. Задачу вирішують орієнтацією шліфувальних бабок у горизонтальній γ та вертикальній ν площинах. Це верстатні похибки B, які створюють технологічну похибку обробки торців T.

Зменшення впливу похибок положення ланок та їх можлива взаємна корекція дозволить зменшити загальну помилку обробки.

Отже, питання взаємної корекції [3,4] наявних верстатних похибок є актуальною задачею. Додатковими складностями проблеми забезпечення потрібної точності є питання втрати форми абразивного інструменту, що викликані зношенням. Абразивний інструмент потребує правку.

До верстатних похибок відносять сукупність B малих кутових чи лінійних відхилень положення або розмірів ланок від номінального значення. Відхилення обумовлені якістю складання, зазорами у спряженнях, зміною розмірів за рахунок теплових або силових деформацій. Вказані похибки завжди присутні.

Елемент матриці W між *k*-ою вхідною (похибка положення ланки верстату) та *i*-ою вихідною технологічною похибками наведений вище (13).

$$W_{ik}=\frac{\frac{1}{S}\cdot\iint\limits_S B_k\cdot\Delta n_i\cdot dS}{\frac{1}{S}\cdot\iint\limits_S\left(\Delta n_i\right)^2\cdot dS}=\left(\frac{1}{H_{ii}}\right)\cdot\frac{1}{S}\cdot\iint\limits_S\left(B_k\cdot\Delta n_i\right)\cdot dS$$

Елементарні площинки відіграють роль вагової функції по усередненню впливу у межах площі обробленої поверхні. Але, криволінійні координати інструмента за допомогою якобіана слід привести до полярних.

Результати роботи [4] дозволили врахувати положення лінії контакту за рахунок зміни профілю зношеного інструмента. Тут *β, ρ* – криволінійні координати, описують рухи подачі, та положення лінії контакту β(ρ).

Перевагами вибору верстату та заготовки є наступне.

– Верстат використовують на фінішних операціях двох стороннього шліфування торців, має клас точності А, характеризується високою продуктивністю, Форму інструмента отримують в процесі правки, а далі здійснюють кінцеве формоутворення поверхонь торців.

Найбільш проста кругла форма перетину поверхні, площею $S=\iint dS.$, або $S=\pi*r^2$ де r – радіус деталі (r=10).

Торцеву поверхню деталі повинна характеризуватись мінімальним кутовим відхиленням Λ від перпендикулярності торця. Одиничний вектор нормалі до номінальної поверхні торця деталі (орт) при обраному положенні систем координат спрямований вздовж осі *Z*: $\vec{n}=\begin{bmatrix}0 & 0 & 1 & 0\end{bmatrix}^T$.

У якості вектора верстатних похибок використовують лише кути орієнтації шліфувальних бабок у вертикальній ν та горизонтальній γ площинах з метою ефективної обробки, коли їх співвідношенням досягають потрібну точність. Тобто вектор похибок містить лише елементи $B=\begin{bmatrix}\nu & \gamma\end{bmatrix}^T$.

Технологічні похибки Δn номінального розташування торця заготовки поділяють на малі лінійні та кутові зміщення щодо номінального розташування, як і будь-якої іншої ланки. Для цього знаходять [3]:

$$\Delta\overrightarrow{r_б}(\beta,\rho)\approx\varepsilon_b\cdot\overrightarrow{r_0}(\beta,\rho), \tag{14}$$

де $r_0(\beta,\rho)$ – радіус-вектор номінальної поверхні [3,4]; $\varepsilon_б$ – загальна матриця похибок ланки, враховує невідомі малі зсуви та кути відносно номінальної СК. Для торця елементи δ_{xb}, δ_{yb} та γ_b загальної матриці

ε_b не враховують, їх проекція на нормаль дорівнює нулю, вони призводять лише до ковзання площини «самій по собі».

Рівняння векторної похибки базової поверхні щодо номінального розташування торця можна подати у вигляді

$$\Delta\overrightarrow{r_b}(\beta,\rho) = \varepsilon_б^* \cdot \overrightarrow{r_0}(\beta,\rho) = \{\delta_{bz} \cdot D^3 + \alpha_b \cdot D^4 + \beta_b \cdot D^5\} \cdot \overrightarrow{r_0}(\beta,\upsilon), \tag{15}$$

де $D^1, \ldots, D^6$ – матриці похибок окремих складових переміщень відносно осей координат [1,4].

Вектор Δn технологічних похибок можна представити:

$$\Delta n = \begin{bmatrix} \delta_{bz} & \alpha_b & \beta_b \end{bmatrix}^T \tag{16}$$

Тут розмірну похибку δ_{zb}, відкореговують переміщенням пінолі.

Задача підвищення точності шліфування плоских поверхонь була аналітично вирішена трьома методами [3,4]:

А) рішенням векторних рівнянь поверхні круга та сімейства твірних;

В) варіаційним методом [3,4];

С) за допомогою матриць передатних коефіцієнтів [4].

Кут ν орієнтації шліфувальних бабок у вертикальній площині, необхідний для підвищення продуктивності, коли торцеву поверхню інструмента включають у процес зняття припуску.

Оптимальне співвідношення кутів орієнтації шліфувальних бабок (метод А) знаходили по кроках за часом обробки, сумісно вирішуючи векторні рівняння сімейства твірних ліній заготовки з поверхнею інструмента. Порівняння проводили по координаті, яка відповідає осьовому напряму. Кращим вважали співвідношення кутів, коли різниця координат приймала мінімального значення.

Виявилося, що на похибку більше впливає (орієнтовно в 1,57 рази) кут орієнтації ν у вертикальній площині. Кути впливають з різним знаком, тому можуть бути взаємно відкоригованими.

Варіацію вектору верстатних B похибок [3,4] (метод В) знаходять по результатах розрахунків та вимірювання. Для продуктивного зняття припуску попередньо вибирають раціональне значення кута ν. Далі через раціональне співвідношення γ/ν здійснить попередній вибір кута орієнтації γ_0 у горизонтальній площині. Потім проводять його корегування $\Delta\gamma$ з метою покращення точності, визначають корегований кут $\gamma_0 + \Delta\gamma = \gamma_к$.

Вектор верстатних B похибок наладки у якості елементів має: кутове корегування орієнтації $\Delta\gamma$ шліфувальних бабок і розмір Δz осьового положення їх пінолей $\delta = \begin{bmatrix} \Delta\gamma & \Delta z \end{bmatrix}^T$.

З профілограми через рівні кути, для периферійних точок складають вектор довжиною p (де $p \le k = 12$) з похибок Δ, виміряних в напрямку нормалі. Елементи матриці M розміром $p \times 2$, викликані орієнтацією бабок в точці заготовки з параметрами β, ρ визначають, проекцією варіації векторної похибки на напрям нормалі [3]:

$$M = \begin{bmatrix} \vec{V}_\gamma & \vec{V}_z \end{bmatrix} \cdot \vec{n}. \tag{17}$$

Вирішують рівняння $M*\delta = \Delta$, звідки знаходять шукані похибки наладки γ_0:

$$\delta = (M^T \cdot M)^{-1} \cdot M^T \cdot \Delta. \tag{18}$$

Для початкових значень кутів $\nu = 1/400$ $\gamma_0 = 1{,}37*\nu$, отримали значення похибки наладки $\delta = \begin{bmatrix} \Delta z \\ \Delta\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.001 \\ -0{,}098 \end{bmatrix}$.

Знаходять значення корекції кута $\Delta\gamma$ для заданих значень кутів ν, γ_0 за рівнянням визначають оптимальне співвідношення кутів орієнтації шліфувальних бабок $\gamma/\nu = 1{,}57$ (рис. 2):

$$\frac{\gamma_к}{\nu} = \frac{\gamma_0 + \Delta\gamma}{\nu} \approx 1.58 \tag{19}$$

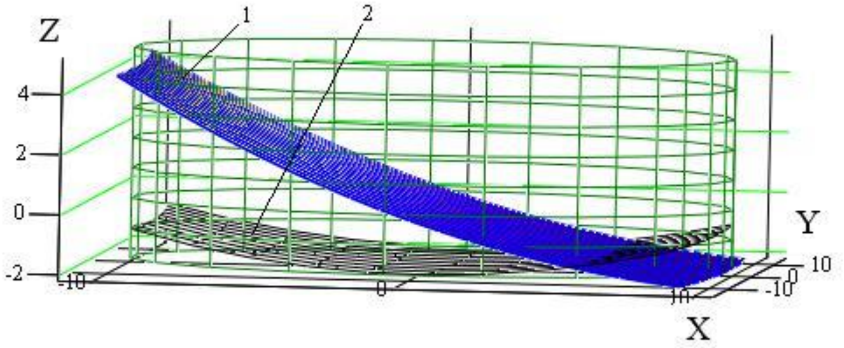

Рис. 2. Початкове положення торця 1 для кута γ_0 та корекція $\gamma_к$ торця 2

Отримані профілограми початкового положення торця та відкоригованої поверхні (рис. 2), похибки якої не перебільшили значення 2 мкм для широкого діапазону зміни відношення кутів *γ/ν*.

У роботі [4] задачу вирішено із використанням матриці передатних коефіцієнтів (метод С):

$$W_{i,k}=\frac{\int\limits_{\theta_1}^{\theta_2}\int\limits_{\theta_{b1}}^{\theta_{b2}} ja\cdot B_i\cdot\left(N\Delta_k\right)\partial\theta_b\cdot\partial\theta}{\int\limits_{\theta_1}^{\theta_2}\int\limits_{\theta_{b1}}^{\theta_{b2}} ja\cdot\left(N\Delta_k\right)^2\partial\theta_b\cdot\partial\theta}.$$

Деякою складністю розрахунку є необхідність застосовувати якобіан перетворення декартових координат в криволінійні:

$$Ja=\frac{\partial B}{\partial\theta}\cdot\frac{\partial B}{\partial\theta}-\frac{\partial B}{\partial\theta}\cdot\frac{\partial B}{\partial\theta}$$

$$\frac{\partial B}{\partial\theta}=D5\cdot\frac{\partial\overrightarrow{r_0}\left(\theta_b,\theta\right)}{\partial\theta};\quad \frac{\partial\Delta n}{\partial\theta_b}=\frac{r_{01}(\beta)\cdot A^4(-\gamma)\cdot D5\cdot A^5(-\nu)\cdot r_{02}(\theta(\rho))\cdot\vec{e}^{\,4}}{\partial\theta};$$

$$\frac{\partial B}{\partial\theta}=D4\cdot\frac{\partial\overrightarrow{r_0}\left(\theta_b,\theta\right)}{\partial\theta}\quad \frac{\partial\Delta n}{\partial\theta_b}=\frac{r_{01}(\beta)\cdot D4\cdot A^4(-\gamma)\cdot A^5(-\nu)\cdot r_{02}(\theta(\rho))\cdot\vec{e}^{\,4}}{\partial\theta}$$

Вплив верстатних похибок (кути орієнтації бабок) на технологічні, які характеризують відхилення від перпендикулярності торця, має вигляд *B=W*Δn*:

$$\begin{bmatrix}\alpha_b\\ \beta_b\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}w_{\alpha\nu} & w_{\alpha\gamma}\\ w_{\beta\nu} & w_{\beta\gamma}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\nu\\ \gamma\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}w_{\alpha\nu} & w_{\alpha\gamma}\\ w_{\beta\nu} & w_{\beta\gamma}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}1\\ \gamma/\nu\end{bmatrix}\cdot\nu. \qquad (20)$$

Отримали матрицю передатних коефіцієнтів $W=\begin{bmatrix}-0{,}002 & -0{,}0014\\ -0{,}915 & 0{,}583\end{bmatrix}.$,

Крім похибок від перпендикулярності положення обробленого торця, які оцінюють кутом $\sqrt{\alpha_b^2+\beta_b^2}$, математична модель дозволяє визначити міру розсіювання навколо базової площини через дисперсію σ^2:

$$\sigma^2=\frac{1}{S}\cdot\iint\limits_s\left[\Delta r_n(\beta,\rho)-\Delta r_{b.n}(\beta,\rho)\right]^2 dS, \qquad (21)$$

де проекцію $\Delta r_n(\beta,\rho)$ *вихідної* похибки на нормаль для виміряних точок та $\Delta r_{bn}(\beta,\rho)$ для базової площини, визначають у точці торця.

1. Елемент матриці $W_{\alpha\nu}$ та $W_{\beta\nu}$ показує, наскільки сильно впливає кут орієнтації *ν* шліфувальної бабки (або *γ*) на значення кутової похибки базової площини α_b. Загальний вплив кута *ν* на зміну кутів α_b, β_b, тобто на відхилення від перпендикулярності торця, оцінюють як $\sqrt{W_{\alpha\nu}^2+W_{\beta\nu}^2}$.

2. Вплив кутів орієнтації $\gamma,\cdot\nu$ шліфувальних бабок на вихідні похибки протилежний, тому зміну значення одного з цих кутів можна частково компенсувати іншим.

3. Елементи матриці передатних коефіцієнтів дозволяють визначити співвідношення, коли похибка формоутворення приймає мінімальне значення. Сума квадратів вихідних похибок, яка визначає результуючу при орієнтації, повинна бути мінімальною $\alpha^2_b+\beta^2_b\rightarrow min$.

Сумарну кутову похибку формоутворення торця визначають з рівняння:

$$\Lambda(\gamma.\nu)^2 = \left[w_{\alpha\nu}\cdot\nu + w_{\alpha\gamma}\cdot\gamma\right]^2 + \left[w_{\beta\nu}\cdot\nu + w_{\beta\gamma}\cdot\gamma\right]^2 \rightarrow \min \ . \quad (22)$$

Знайшовши та зробивши похідну нулеві, отримують оптимальне співвідношення кутів орієнтації шліфувальних бабок, яке забезпечує найкращу точність формоутворення торців [4]:

$$\frac{\gamma}{\nu} = -\frac{w_{\alpha\nu}\cdot w_{\alpha\gamma} + w_{\beta\nu}\cdot w_{\beta\gamma}}{\left(w_{\alpha\gamma}\right)^2 + \left(w_{\beta\gamma}\right)^2} = 1{,}57. \quad (23)$$

Графік функції представлений на рис. 3. Результати добре співвідносяться з [3] та можуть бути використаними для діагностики роботи.

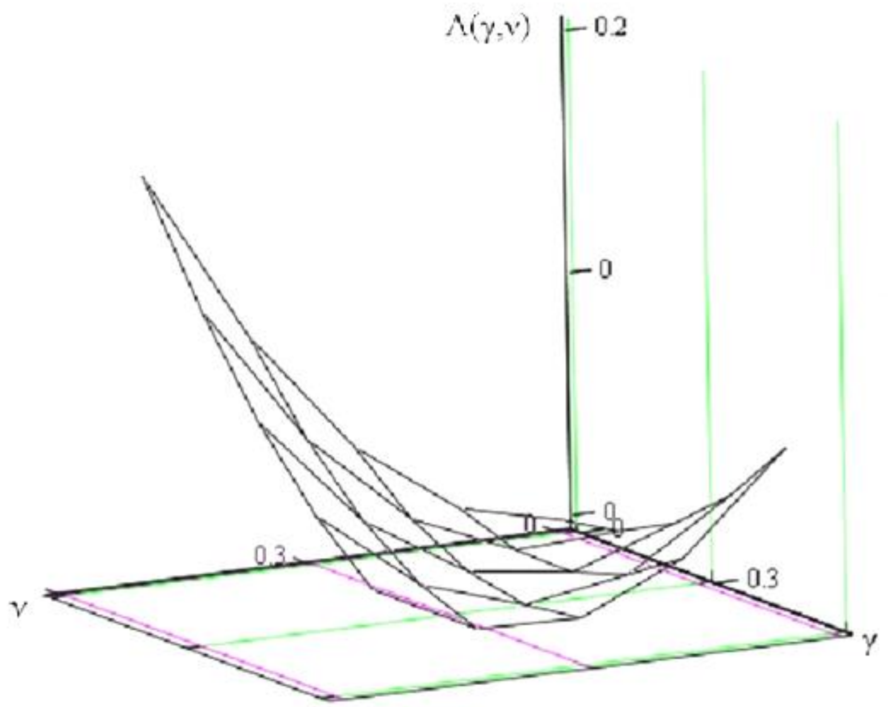

Рис. 3. Співвідношення між кутами орієнтації шліфувальної бабки, що визначає мінімальну похибку формоутворення

Висновки.

1. Перевірено декілька методів, а саме: A) рішення векторних рівнянь поверхні круга із сімейством твірних, B) варіацію функції формоутворення та C) знаходження матриці передатних коефіцієнтів. Похибка розрахунків по різних методиках знаходиться в межах 1,5%.

2. Кожен із методів має свої переваги. У якості обмежень виступають діапазони зміни кутів γ,ν, обумовлений граничними значеннями припуску та, максимальної продуктивності. Варіація функції формоутворення має відносну простоту визначення та дозволяє врахувати дисперсію обробленої поверхні, а метод передатних коефіцієнтів дає можливість розрахунку сили впливу спряжень між ланками на окремі елементи технологічної похибки.

3. Експериментальні дослідження відповідають розрахунковим.

Список літератури:

1. What Is The Accuracy Of A CNC Machine, And How Is It Calculated?/ URL: https://yijinsolution.com/news-blog/what-is-the-accuracy-of-a-cnc-machine/

2. Рудик. А.В., Рудик В.А. Вибір режимів ефективного шліфування валів при керуванні міжосьовою відстанню верстата. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 2 (12). С. 25-32. doi:10.20998/2413-4295.2022.02.04.

3. Рудик А.В., Венжега В.І. Формоутворення торців деталей автомобілів при двосторонньому шліфуванні. *Вісник ЧДТУ: Збірник*. Чернігів: ЧДТУ, 2008. Вип.34. С. 80–88.

4. A.V. Rudyk, V. M. Chupryna, V.A. Rudyk. Effect of shape formation on the accuracy of grinding ends while compensating for machine tool errors/ EEJET, № 2/1 (110)2021, p. 90-97. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.226479.

Rudyk A.V., Rudyk V.A. INFLUENCE OF MACHINE SETTING ERRORS ON ERRORS IN THE PROCESSING OF ROTATING SURFACES

Machine accuracy determines speed, energy efficiency, material capacity, reliability, durability and other performance indicators. Accuracy significantly affects the cost of production. of widespread machine parts limited by surfaces of rotation. The quality of surface treatment is determined by the properties of the surface layer. Finishing of turning surfaces from modern materials with a blade tool is often complicated. Therefore, it is carried out during finishing operations, usually by grinding. The accuracy components are determined by the projection of the difference between the nominal and real surfaces on the orth normal. The projection of the relative feed speed on the orth normal is determined by a similar calculation. Therefore, shaping, productivity, slice thickness, cutting modes and other parameters are defined. This emphasizes the universality and relevance of research. The well-known method of calculating the accuracy of processing has been improved. As examples, the calculations of the accuracy indicators of the lathe of the ends and surfaces of rotation are considered. The calculation of the matrix of transmission coefficients of the two-sided face-grinding machine is used. The machine has an extended forming function and takes into account the dimensions of the links. The relationship between the curvilinear coordinates of the tool surface is taken into account. The calculation of the surface area of the part is performed using the Jacobian. Composite matrix of transfer coefficients of influence of position errors of machine parts on technological ones. The influence of errors in the position of the machine parts on the processing of turning surfaces for a lathe and a two-sided face-grinding machine is proven. The possibility of mutual correction of technological errors using the example of an end-grinding machine is proven. The indicators of the accuracy of processing on the machines were verified by three calculation methods and experimentally. The error is within 1.5%.

Key words: *precision, grinding, error, machine, correction.*