

РОЗДІЛ III. ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ І АВТОТРАНСПОРТУ

УДК 621.923.42

В.І. Кальченко, д-р техн. наук

Д.В. Кальченко, студент

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

МОДУЛЬНЕ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ ІНСТРУМЕНТІВ, ПРОЦЕСУ ЗНЯТТЯ ПРИПУСКУ ТА ФОРМОУТВОРЕННЯ ПРИ ШЛІФУВАННІ ЗІ СХРЕЩЕНИМИ ОСЯМИ СТУПІНЧАТОГО ВАЛА І КРУГА

В.И. Кальченко, д-р техн. наук

Д.В. Кальченко, студент

Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

МОДУЛЬНОЕ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ, ПРОЦЕССА СНЯТИЯ ПРИПУСКА И ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ СО СКРЕЩЕННЫМИ ОСЯМИ СТУПЕНЧАТОГО ВАЛА И КРУГА

V.I. Kalchenko, Doctor of Technical Sciences

D.V. Kalchenko, student

Chernihiv State Technological University, Chernihiv, Ukraine

MODULE 3D DESIGN OF INSTRUMENTS, THE PROCESS OF REMOVAL OF ASSUMPTION AND FORMEDUCATION, AT POLISHING WITH THE CROSSED AXES OF STEP BILLOW AND CIRCLE

Вперше запропоновано модульне трьохмірне геометричне моделювання інструментів, зняття припуску та формоутворення оброблюваних поверхонь ступінчастих валів на базі трьох уніфікованих модулів: інструментального, орієнтації та формоутворення. Шліфування зовнішньої поверхні на всій довжині виконується за один установ вузьким кругом зі схрещеними осями його і деталі. Розроблені нові способи глибинного круглого шліфування кругами з надтвердих матеріалів, де у процесі поздовжнього переміщення шліфувального круга відносно деталі чорновий припуск знімається торцем круга, а чистове шліфування виконується його периферією. Круг розташовується нормально в кожній точці твірної і повертається на кут, який забезпечує рівномірне зняття припуску та точність формоутворення поверхонь ступінчастого вала.

Ключові слова: модульне 3D-моделювання, ступінчастий вал, формоутворення, шліфувальний круг, зняття припуску, схрещені осі.

Впервые предложено модульное трехмерное геометрическое моделирование инструментов, съема припуска и формообразования обрабатываемых поверхностей ступенчатых валов на базе трех унифицированных модулей: инструментального, ориентации и формообразования. Шлифование наружной поверхности по всей длине выполняется за один установ узким кругом со скрещивающимися осями его и детали. Разработаны новые способы глубинного круглого шлифования кругами из сверхтвердых материалов, где в процессе продольного перемещения инструмента относительно детали черновой припуск снимается торцом круга, а чистовое шлифование выполняется его периферией. Круг располагается нормально в каждой точке образующей и поворачивается на угол, который обеспечивает равномерный съем припуска и точность формообразования поверхностей ступенчатого вала.

Ключевые слова: модульное 3D-моделирование, ступенчатый вал, формообразование, шлифовальный круг, съем припуска, скрещенные оси.

The first time the module a unique three dimensional geometric modeling tools, removal allowance and machined surfaces forming stepped shafts at three unified modules: instrumental, orientation and morphogenesis. Grinding the outer surface of the entire length of the institutions performed a narrow circle with crossed axes and its details. The new ways of deep cylindrical grinding wheels of superhard materials where during longitudinal movement of the grinding wheel with respect to the details of the rough edges against the allowance removed wheel and finishing grinding runs its periphery. Circle normally located at each point and returns to the generatrix angle that provides uniform removal allowance and precision shaping of surfaces stepped shaft.

Key words: modular 3D modeling, stepped shaft, forming, grinding wheel, removal allowance, crossed axis.

Постановка проблеми. Наявна тенденція розвитку тривимірного геометричного моделювання у країнах, де розвинене машинобудування. Однак існуючі 3D-моделі недостатньо враховують особливості інструментів з надтвердих матеріалів та зняття припуску в процесі шліфування. В умовах, коли вітчизняне машинобудування прагне стати

конкурентоспроможним та високоефективним, ця проблема набуває народногосподарського значення.

На автомобільних заводах широко використовуються ступінчасті вали. Як правило, їх обробляють на торцекруглошліфувальних верстатах, де оброблення ступінчастих валів ведеться по всьому профілю методом врізання. В умовах сучасних ринкових відносин, коли швидко змінюється номенклатура оброблюємих виробів, висувуються вимоги високої гнучкості та продуктивності виробництва. Так, наприклад, верстати фірми Junker Quickpoint 1001 і Quickpoint 1002 [1], Quickpoint 3000, Quickpoint 5000 [2; 3], обробляють ступінчасті вали зі швидкістю різання до 140 м/с, при цьому шліфування ведеться зі схрещеними осями інструмента та деталі, що підвищує продуктивність оброблення до 5 разів у порівнянні з традиційним способом маятникового шліфування. Але невідомі причини такого зростання продуктивності.

Розроблення нових взаємопов'язаних модульних 3D-моделей інструментів, зняття припуску та формоутворення, які описують процес шліфування зі схрещеними осями ступінчастого вала і круга, їх дослідження сприятимуть створенню нових високоефективних способів шліфування та їх впровадженню в промисловість.

Аналіз досліджень і публікацій. У роботах [4; 5; 6] наведені 3D геометричні моделі формоутворення поверхонь і проектування інструментів під час оброблення різанням без розгляду задач зняття припуску.

У фундаментальній роботі [7] за точністю металорізальних верстатів розроблені частинні 3D-моделі формоутворюючих систем різноманітних верстатів, але загальних 3D-моделей, які враховують послідовне зняття припуску і формоутворення, не наведено.

У роботі [8] наведені 3D-моделі формоутворення і зняття припуску при круглому шліфуванні циліндричних деталей. Вони не описують процес шліфування ступінчастих валів, де діаметр змінюється за осью координатою z_{dj} деталі (рис. 1, а), формоутворення торців та вплив на їх точність кута орієнтації круга.

Вперше модульне 3D-моделювання формоутворюючих систем шліфувальних верстатів, інструментів та оброблюваних поверхонь наведено в роботі [9], де показано переваги модульного 3D-моделювання. В монографії [10] наведена ієрархія узагальнюючих модульних 3D-моделей і галузі їх використання. Однак у роботах [8;9;10] не вказані модульні 3D-моделі зняття припуску та формоутворення ступінчастих валів та нові способи їх шліфування.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Відсутність загальних модульних 3D-моделей зняття припуску та формоутворення під час шліфування ступінчастих валів.

Мета статті. Головною метою цієї роботи є створення загальної модульної 3D-моделі, яка описує інструменти, зняття припуску та формоутворення різних оброблюваних поверхонь ступінчастих валів, на базі уніфікованих модулів: інструментального, орієнтації та формоутворення. Це дозволить за загальним алгоритмом аналізувати процеси зняття припуску та формоутворення, розробити нові способи і на їх базі високоефективні технології шліфування різних ступінчастих валів зі схрещеними осями круга та деталі.

Виклад основного матеріалу. Схема процесу глибинного круглого шліфування ступінчастих валів зі схрещеними осями інструмента та деталі зображено на рис. 1, де ступінчастий вал 1 шліфується ельборовим кругом 2. Під час шліфування конусної ділянки 1-2 (рис. 1, в) вісь $O_n Y_n$, яка співпадає з віссю симетрії круга системи координат $O_n X_n Y_n Z_n$, розташовується перпендикулярно твірній конусної поверхні, при цьому кут повороту ψ дорівнює половині кута конусності. Для регулювання площі плями контакту 3 деталі 1 з торцем круга 2 його повертають навколо осі $O_n X_n$ на кут ϕ . При поздовжній подачі S_d круга 2 після оброблення точки 2 (рис. 1, в) круг повертається у поло-

ження, коли вісь $O_n Y_n$ перпендикулярна твірній циліндра, тобто $\psi=0$. Круг 2 переміщується вздовж вісі $O_d Z_d$ системи координат $O_d X_d Y_d Z_d$ деталі до точки 3, з подачею на оберт S_o , а параметр гвинтового руху p дорівнює

$$p = \frac{S_o}{2 \cdot \pi} \tag{1}$$

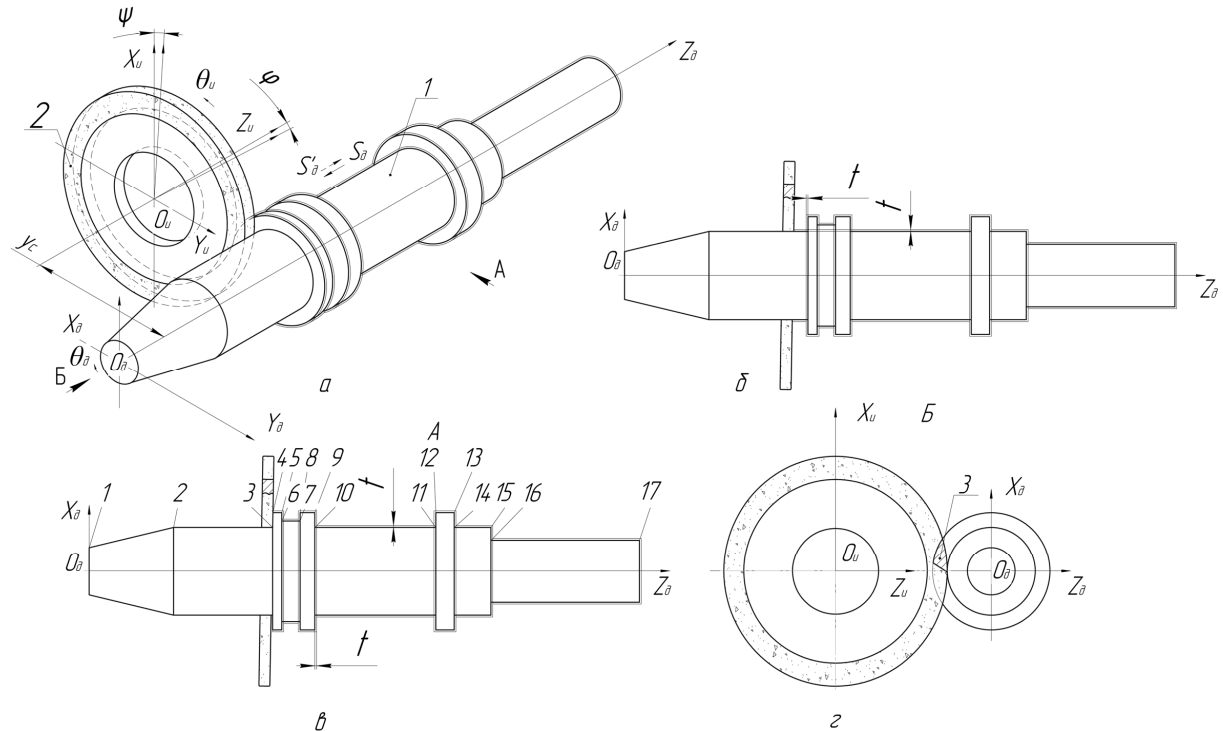


Рис. 1. Схема глибокого круглого шліфування ступінчастих валів:
а, в, з – шліфування торця, б – шліфування циліндричної поверхні

Для розроблення загальної модульної 3D-моделі зняття припуску та точності формоутворення під час шліфування ступінчастих валів необхідно описати інструментальну поверхню.

Загальна модель інструментальної поверхні шліфувального круга описується циліндричним модулем, який обумовлюється наявністю таких параметрів: i – координата ділянки шліфувального круга, за допомогою якої задаємо профіль шліфувального круга у площині $O_n Y_n Z_n$, θ_n – кут повороту інструмента навколо осі $O_n Z_n$ (рис. 1, а).

Загальну модель шліфувального круга можна представити у вигляді

$$\bar{r}_n = C_{z_n(i) \cdot \theta_n \cdot R_n(i)}^n \cdot \bar{e}_4, \tag{2}$$

де \bar{r}_n – радіус-вектор точок шліфувального круга;

$C_{z_n(i) \cdot \theta_n \cdot R_n(i)}^n$ – циліндричний модуль формоутворення шліфувального круга, який являє собою матрицю переходу радіус-вектора початкової точки \bar{e}_4 в систему координат інструмента.

У модульних 3D-моделях використовуються однокоординатні матриці $M1, M2, M3, M4, M5, M6$, які описують переміщення вздовж напрямків X_n, Y_n, Z_n та повороти навколо осей $O_n X_n, O_n Y_n, O_n Z_n$, відповідно [10]. Циліндричний модуль, який описує інструментальну поверхню, має вигляд

$$C_{\theta \cdot i}^n = M3(Z_n(i)) \cdot M6(\theta_n) \cdot M2(R_n(i)), \tag{3}$$

$$\bar{r}_n(\theta, i) = M3(Z_n(i)) \cdot M6(\theta_n) \cdot M2(R_n(i)) \cdot \bar{e}_4, \tag{4}$$

Профіль шліфувального круга запишемо за допомогою функції Хевісайда:

$$Z_{\text{н}}(i) = i \cdot (1 - \Phi(i - i_{\text{рпоч}})) + (i_{\text{рпоч}} + r \cdot \sin(\frac{i - i_{\text{рпоч}}}{r})) \cdot (\Phi(i - i_{\text{рпоч}}) - \Phi(i - i_{\text{ркін}})) + (i_{\text{рпоч}} + r) \cdot \Phi(i - i_{\text{ркін}}), \quad (5)$$

$$R_{\text{н}}(i) = R \cdot (1 - \Phi(i - i_{\text{рпоч}})) + (R + r \cdot \cos(\frac{i - i_{\text{рпоч}}}{r}) - 1) \cdot (\Phi(i - i_{\text{рпоч}}) - \Phi(i - i_{\text{ркін}})) + (R - r - i + i_{\text{ркін}}) \cdot \Phi(i - i_{\text{ркін}}), \quad (6)$$

де $i_{\text{рпоч}}$ – координата i початку профільної ділянки шліфувального круга;

$i_{\text{ркін}}$ – координата кінця профільної ділянки шліфувального круга;

R – радіус шліфувального круга;

r – радіус заокруглення кромки шліфувального круга.

Розрахунки та побудова моделей проводилась у математичному пакеті MatchCAD, профіль шліфувального круга зображено на рис. 2, де i_0 – початкова точка профілю, яка лежить на осі симетрії круга, i_k – кінцева точка профілю.

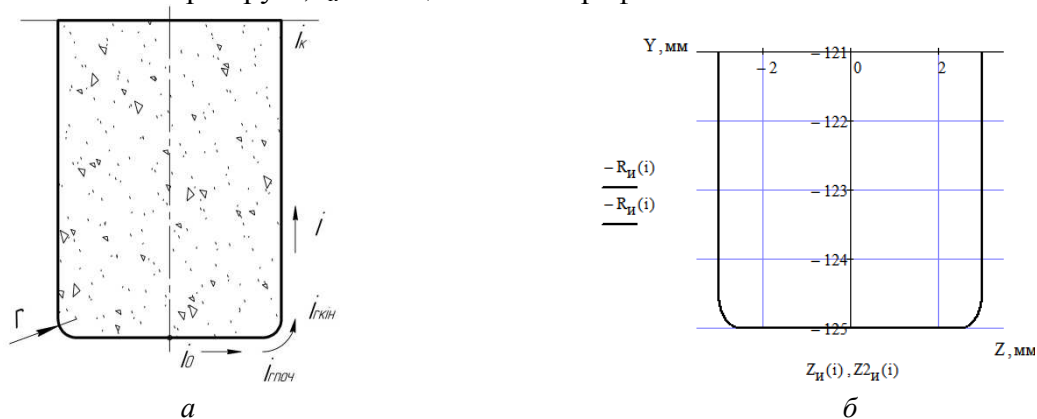


Рис. 2. Профіль шліфувального круга

Номинальна поверхня вала описується радіус-вектором шліфувального круга, модулем орієнтації та модулем формоутворення

$$\bar{r}_d = M_{\text{нд}} \cdot \bar{r}_n = C_{z_d \theta_d y_c}^{\Phi} \cdot S_{\varphi \psi}^{\sigma} \cdot \bar{r}_n, \quad (7)$$

де $M_{\text{нд}}$ – матриця переходу з системи координат інструмента в систему координат деталі, яка являє собою добуток сферичного модуля $S_{\varphi \psi}^{\sigma}$ орієнтації шліфувального круга щодо системи координат деталі та циліндричного модуля $C_{z_d \theta_d y_c}^{\Phi}$, який задає рух інструмента відносно деталі.

Сферичний модуль орієнтації інструмента дорівнює

$$S_{\varphi \psi}^{\sigma} = M4(\varphi) \cdot M5(\psi). \quad (8)$$

Циліндричний модуль формоутворення

$$C_{z_d \theta_d y_c}^{\Phi} = M3(z_d) \cdot M6(\theta_d) \cdot M2(y_c), \quad (9)$$

де y_c – міжосьова відстань шліфувального круга і деталі;

θ_d – кут повороту деталі;

z_d – подача, яка описує рух деталі вздовж осі O_0Z_0 відносно шліфувального круга.

Враховуючи формули (2), (7), рівняння обробленої поверхні має вигляд

$$\bar{r}_d(z, \theta_d, \theta, i) = C_{z_d \theta_d y_c}^{\Phi} \cdot S_{\varphi \psi}^{\sigma} \cdot C_{Z_n(i) \theta_n R_n(i)}^{\text{н}} \cdot \bar{e}_4, \quad (10)$$

Поверхня деталі залежить від 4 параметрів. Тобто треба пов'язати два параметри. Використовуючи параметр гвинтового руху, пов'яжемо подачу S_0 на оберт з кутом повороту деталі, використовуючи формулу (1)

$$z_d = \theta_d \cdot p, \tag{11}$$

враховуючи зв'язок (11) перепишемо рівняння (10)

$$\bar{r}_d(\theta_d, \theta_i, i) = C_{(\theta_d p) \cdot \theta_d z_d}^{\theta_d} \cdot S_{\varphi \cdot \psi}^{\theta_d} \cdot C_{z_d(i) \cdot \theta_i \cdot p_n(i)}^{\theta_i} \cdot \bar{e}_4. \tag{12}$$

Для визначення оброблюваної поверхні необхідно записати рівняння, яке буде визначати лінію контакту деталі та інструментальної поверхні

$$\bar{V} \cdot \bar{n} = 0, \tag{13}$$

де \bar{n} – одиничний вектор нормалі до інструментальної поверхні;

\bar{V} – вектор швидкості відносного руху інструмента в системі координат деталі.

Нормаль можна знайти як добуток векторів, дотичних до інструментальної поверхні, тобто для знаходження нормалі необхідно диференціювати радіус-вектор деталі за двома незалежними параметрами θ_i та i . Для знаходження вектора відносної швидкості необхідно радіус-вектор інструментальної поверхні в системі координат деталі диференціювати за параметром θ_d , який моделює кут повороту оброблюваної поверхні за одиницю часу.

Отже, при однопараметричному огинанні зв'язок між параметрами θ_i і θ_d має вигляд рівності нулю змішаного добутку трьох векторів частинних похідних вектора \bar{r}_d

$$\left(\frac{\partial \bar{r}_d}{\partial i} \times \frac{\partial \bar{r}_d}{\partial \theta_i} \right) \cdot \frac{\partial \bar{r}_d}{\partial \theta_d} = 0, \tag{14}$$

де $\frac{\partial \bar{r}_d}{\partial i} \times \frac{\partial \bar{r}_d}{\partial \theta_i} = \bar{n}$ – вектор нормалі до інструментальної поверхні в точці з координатами i та θ_i ;

$\frac{\partial \bar{r}_d}{\partial \theta_d} = \bar{V}$ – вектор швидкості руху інструмента відносно деталі.

Знаходимо лінію контакту деталі та шліфувального круга (рис. 3) допомогою розрахункових блоків за методикою [11].

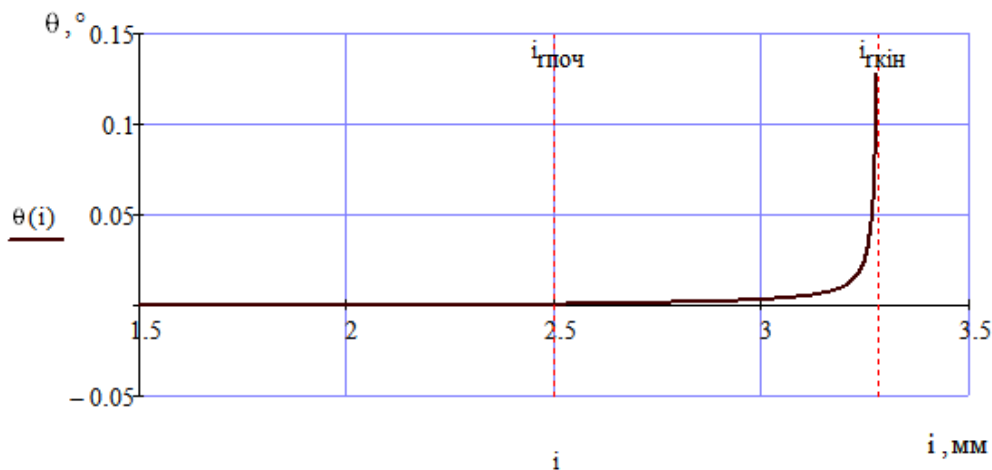


Рис. 3. Лінія контакту

Пляма контакту деталі зі шліфувальним кругом 4 під час оброблення циліндричної ділянки 2-3 зображена на рисунку 4, а, яка обмежена лініями перетину 1, 2, 3 орієнтованого шліфувального круга б і торця заготовки 5.

На рисунку 4, б зображені лінії: 1 – перетину шліфувального круга і торця заготовки; 2 – перетину зовнішнього циліндру заготовки і шліфувального круга; 3 – контакту.

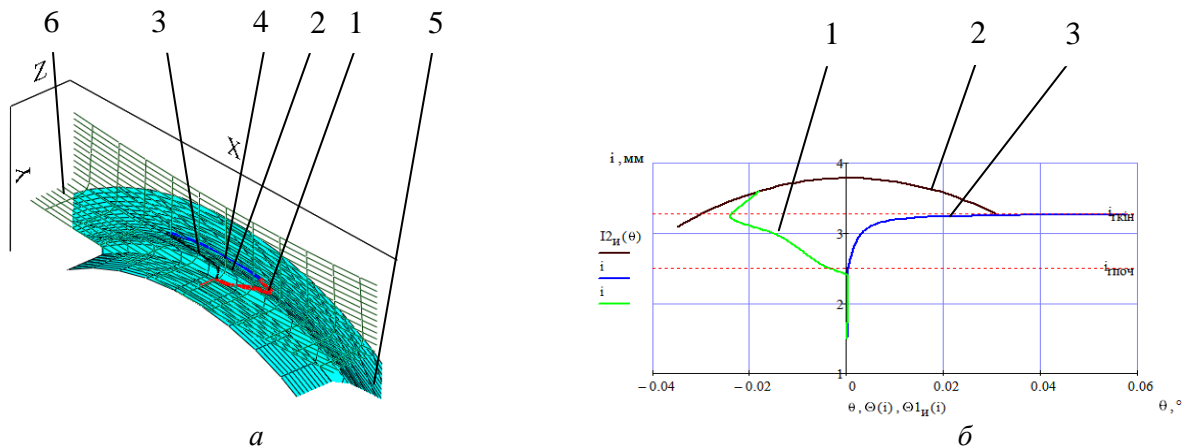


Рис. 4. Перетин шліфувального круга і вала під час оброблення циліндричної поверхні: а – пляма контакту деталі зі шліфувальним кругом; б – лінії перетину шліфувального круга і вала

Шорсткість циліндричної поверхні Ra (рис. 5) знаходимо з виразу (15) [11]

$$Ra = Prd(0) - Prd\left(\frac{S_0}{2}\right), \tag{15}$$

де $Prd(0)$ – висота профілю деталі в точці повороту кута; $Prd\left(\frac{S_0}{2}\right)$ – висота профілю деталі в точці, віддаленій на половину подачі S_0 на оберт деталі.

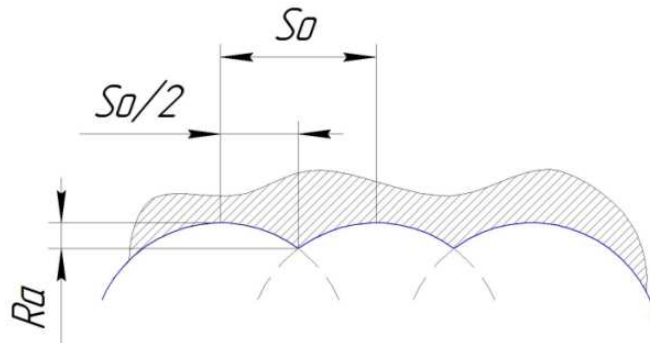


Рис. 5. Утворення геометричної шорсткості

Необхідна шорсткість забезпечується регулюванням S_0 залежно від діаметра круга і кута його нахилу.

Позначення на рисунку б такі ж, як і на рисунку 4.

Коли шліфувальний круг підходить до точки 3-t (рис. 1, в, а і б) він починає обробляти припуск t торця 3-4 вала. При цьому збільшується пляма контакту 4 (рис. б) і виділення тепла, що негативно впливає на якість оброблення, утворюються прижоги. Щоб цього уникнути, треба зменшити подачу S_0 або частоту обертання вала.

Питома продуктивність шліфування $Q(i)$ розраховується за формулою (16)

$$Q(i) := \int_{\theta_1(i)}^{\theta_2(i)} V_n(\theta, i) \cdot R_H(i) d\theta \tag{16}$$

де V_n – проекція вектора відносної швидкості на напрямок нормалі до поверхні круга; $\theta_1(i)$, $\theta_2(i)$ – кути входу і виходу шліфувального круга з деталі.

Площа плями контакту S знаходиться з виразу (17)

$$S_{\text{кв}} := \int_{i_1}^{i_2} \int_{\theta_1(i)}^{\theta_2(i)} R_H(i) d\theta di \tag{17}$$

де $\theta_1(i)$, $\theta_2(i)$, i_1 , i_2 – межі інтегрування.

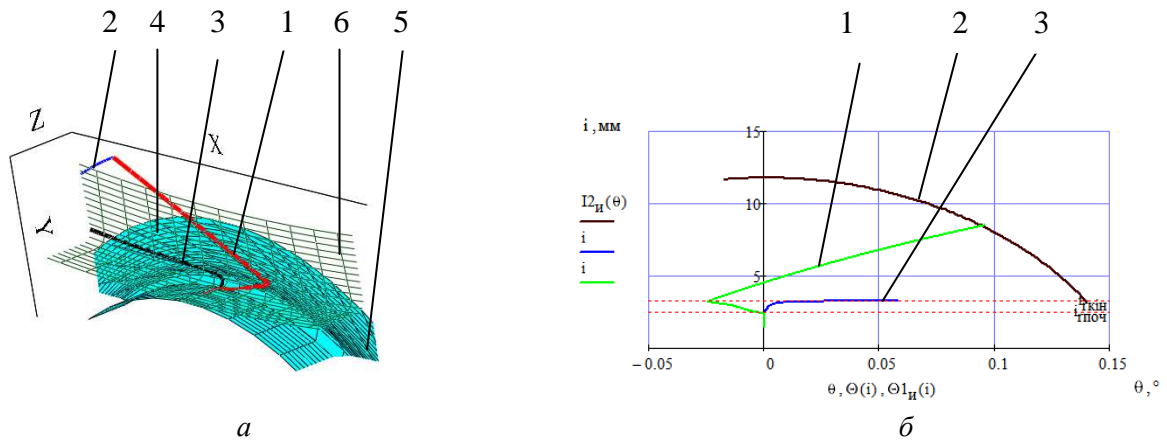


Рис. 6. Перетин шліфувального круга і вала під час оброблення торця

Питома продуктивність оброблення під час шліфування циліндричної поверхні вала зображена на рис. 7.

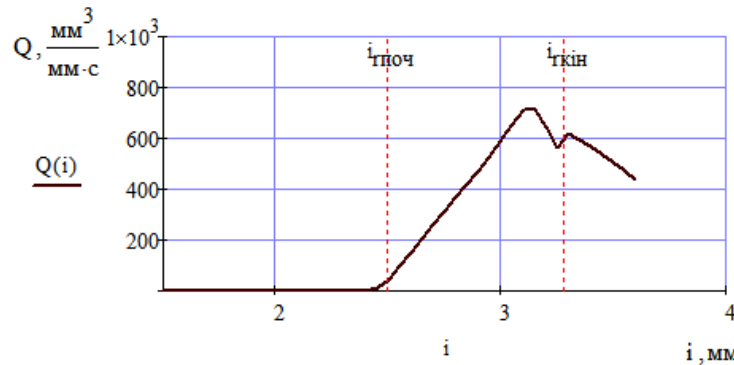


Рис. 7. Розподіл питомої продуктивності шліфування під час оброблення циліндричної поверхні

Питома продуктивність оброблення під час шліфування торця вала зображена на рис. 8.

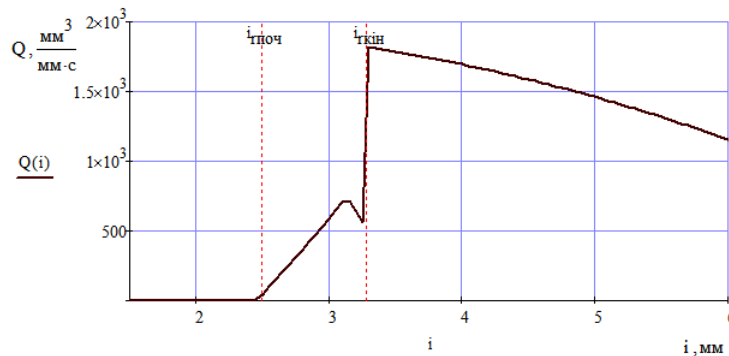


Рис. 8. Розподіл питомої продуктивності шліфування під час оброблення торця вала

На рисунках 6, 7 питома продуктивність, починаючи з точки $i_{\text{поч}}$ (рис 2, а), розгорнута на вісь абсцис, яка співпадає з периферією круга.

Оскільки шліфувальний круг, повернений навколо осі $O_H X_H$ на кут φ , тобто вісі інструмента і деталі не паралельні, виникає похибка. Для знаходження похибки формоутворення торця деталі, рівняння оброблюваної поверхні (10-14) перетинають площинною $Z_H O_H Y_H$, переріз якої показано на рис. 9. Профіль торця ступінчастого вала діаметром 30 мм, отриманий при шліфуванні з повздовжньою подачею $S_o=0,1$ мм/об та кутом орієнтації ельборового круга $\varphi=1^\circ$. Похибка торця δ описується рівнянням (18).

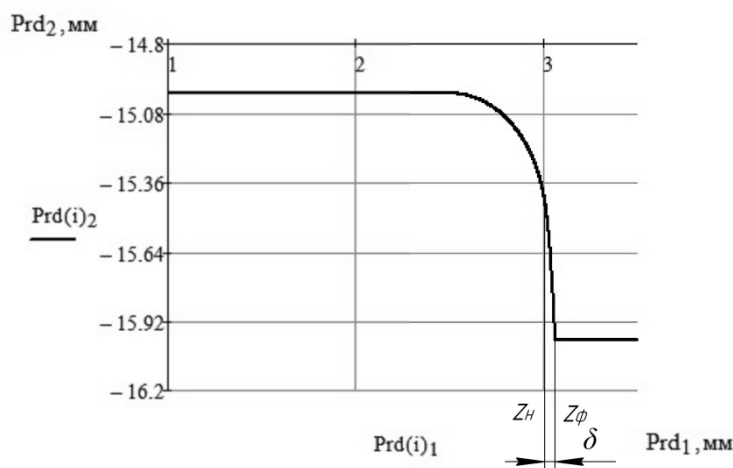


Рис. 9. Профіль деталі під час оброблення торця вала

$$\delta = z_{\phi} - z_H, \tag{18}$$

де z_{ϕ} – координата кінця лінії перетину (рис. 6) шліфувального круга з деталлю;
 z_H – лінія перетину при відсутності похибки.

Залежність похибки торця оброблюваної деталі від кута нахилу шліфувального круга наведено на рис. 10. Зі збільшенням кута точність торця зменшується.

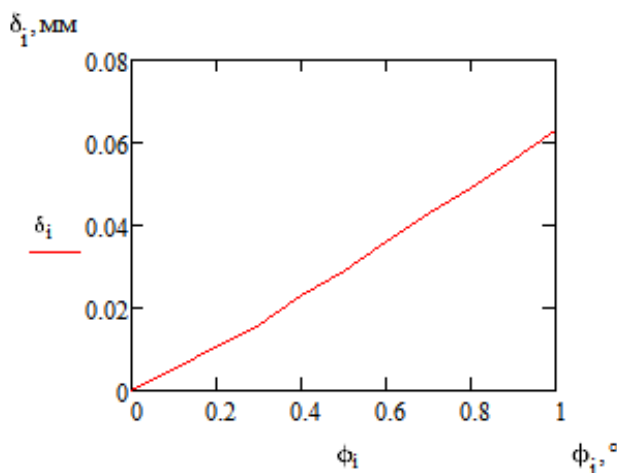


Рис. 10. Графік залежності похибки торця від кута нахилу шліфувального круга

Після оброблення торця 3-4 (рис. 1, в), де в кінцевому положенні круга деталь повинна зробити не менше одного оберта, шліфують циліндричні поверхні 4-5, 6-7, 8-9, 10-11, 12-13, 14-15, 16-17 та торці ступінчастого вала в напрямку подачі S_d (рис. 1, а): 7-8, 11-12.

Після оброблення циліндричної поверхні 16-17 (рис. 1, в) кут нахилу шліфувального круга змінюється на протилежний – ϕ і шліфуємо необроблені торці: 15-16, 13-14, 9-10, 5-6 у напрямку подачі S'_d (рис. 1, а). При цьому в рівнянні (5) $Z_{ii}(t)$ перед дужками заміняємо знак «+» на «-».

Ступінчасті вали, які мають багато ділянок різних діаметрів невеликої довжини, шліфують з постійним кутом нахилу ϕ , який вибирається з умов забезпечення необхідної точності оброблення торців. Після розрахунку ϕ знаходимо оптимальну подачу на оберт S_o .

Із графіка, наведеного на рис. 10, знаходимо залежно від потрібної точності кут орієнтації ϕ . З виразу, запропонованого в роботі [8], розраховують оптимальну подачу S_o залежно від кута ϕ , яка дорівнює

Подача

$$S_{\varphi} = \varphi \cdot \sqrt{\frac{2-R+r\varphi}{R+r}} \quad (19)$$

Висновки. Вперше запропоновано модульне трьохмірне геометричне моделювання інструментів, зняття припуску та формоутворення оброблюваних поверхонь ступінчастих валів на базі трьох уніфікованих модулів: інструментального, орієнтації та формоутворення.

З аналізу модульних 3D-моделей розроблені нові способи глибинного круглого шліфування ступінчастих валів кругами з надтвердих матеріалів, де у процесі поздовжнього переміщення шліфувального круга відносно деталі чорновий припуск знімається торцем круга, а чистове шліфування виконується його периферією. Круг розташовується нормально в кожній точці твірної і повертається на кут, який під час оброблення циліндричної поверхні вибирається з умов потрібної шорсткості Ra, а при шліфуванні торців – з умов отримання необхідної точності δ .

Шліфування зовнішньої поверхні на всій довжині виконується за один установ вузьким кругом зі схрещеними осями його і деталі завдяки розробленому оригінальному поводковому пристрою.

Список використаних джерел

1. *Круглое* шлифование с ЧПУ : [просп. фирмы «Junkermaschinen» на станки «Quickpoint 1001» и «Quickpoint 1002»] / ErwinJunker: MaschinenfabricGmbh, Junkerstraße 2. Postfach 25. D 7618. – Nordrash, Germany, 1991. – 16 с.
2. *Quickpoint*. Все в одном закреплении : [просп. фирмы «Junkermaschinen» на станки «Quickpoint 1000», «Quickpoint 3000», «Quickpoint 4000»] / ErwinJunker: MaschinenfabricGmbh, Junkerstraße 2. Postfach 25. D 77787. – Nordrash, Germany, 2006. – 12 с.
3. *Look & See* : [журнал для клиентов фирмы «Junkermaschinen»] / ErwinJunker: MaschinenfabricGmbh, Junkerstraße 2. Postfach 25. D 77787. – Nordrash, Germany, 2010. – Вып.: Ноябрь. – 12 с.
4. *Равская Н. С.* Основы теории формообразования поверхностей при механической обработке / Н. С. Равская, П. Р. Родин // Вестник НТУУ «Киевский политехнический институт». Машиностроение. – 1998. – № 33. – С. 74-82.
5. *Основи* формоутворення поверхонь при механічній обробці / Н. С. Равська, П. Р. Родін, Т. П. Ніколаєнко, П. П. Мельничук. – Житомир : ЖІТІ, 2000. – 232 с.
6. *Перепелица Б. А.* Отображение аффинного пространства в теории формообразования поверхностей резанием / Б. А. Перепелица. – Х. : Вища школа, 1991. – 512 с.
7. *Решетов Д. Н.* Точность металлорежущих станков / Д. Н. Решетов, В. Т. Портман. – М. : Машиностроение, 1996. – 336 с.
8. *Кальченко В. І.* Глибинне кругле шліфування зі схрещеними осями деталі і круга / В. І. Кальченко, В. В. Кальченко, М. А. Дмитренко // Вісник Черніг. держ. технолог. ун-ту. – Чернігів, 2009. – № 37. – С. 64-72.
9. *Кальченко В. В.* Модульне 3D-моделювання формоутворюючих систем шліфувальних верстатів, інструментів та оброблюваних поверхонь / В. В. Кальченко // Вісник Тернопільського державного технологічного університету. – 2005. – Том 12. – С. 68 -79.
10. *Грабченко А. И.* Шлифование со скрещивающимися осями инструмента и детали : монография / А. И. Грабченко, В. И. Кальченко, В. В. Кальченко. – Чернигов : ЧДТУ, 2009. – 256 с.
11. *Кальченко В. И.* Повышение производительности и точности шлифования со скрещивающимися осями эльборового круга и ступенчатого валика / В. И. Кальченко, Н. Н. Погиба, Д. В. Кальченко // Резание и инструмент в технологических системах : межд. научн.-техн. сб. – Х. : НТУ «ХПИ», 2011. – Вып. 80. – С. 131-140.