

Розробка моделі процесу формоутворення конічних калібрувальних ділянок кругів при двосторонньому шліфуванні круглих торців

В. В. Кальченко, В. І. Кальченко, А. В. Кологойда, О. М. Кальченко,
Д. В. Кальченко

Проведено просторове моделювання процесу правки шліфувальних кругів з конічною калібрувальною ділянкою для забезпечення двостороннього торцевого шліфування циліндричних деталей. В промисловості розповсюджені деталі з циліндричними торцевими поверхнями, наприклад, ролики підшипників, хрестовини, поршневі пальці та інші. До точності й якості торцевих поверхонь ставлять високі вимоги. Найбільш продуктивною є одночасна їх обробка на двосторонньому торцешліфувальному верстаті. Для підвищення якості, шліфування здійснюють орієнтованими кругами. Кут повороту круга у вертикальній площині обирають з умови рівномірного розподілу припуску вздовж робочої поверхні, це дозволяє зменшити температуру в зоні різання і покращити умови обробки. Для підвищення точності на шліфувальних кругах виконують конічну калібрувальну ділянку, прямолінійна твірна якої лежить у площині, що проходить через вісь обертання круга та перпендикулярна торцю деталі. Мінімумно допустима довжина калібрувальної ділянки залежить від діаметру оброблюваних деталей, і дозволяє більш ефективно використовувати робочу поверхню. Правку двох кругів здійснюють одночасно, симетрично встановленими в барабані подачі виробів, алмазними олівцями. Кутова швидкість при правці чорнової ділянки круга є постійною, що забезпечує різну її розвиненість, і поступово зменшується при правці калібрувальної ділянки для забезпечення її постійної шорсткості. Загалом це підвищує ресурс шліфувальних кругів та якість обробки. Кругам надається осьове переміщення, для забезпечення прямолінійності конусної калібрувальної ділянки. Розроблений спосіб правки може використовуватись на верстатах, оснащених системою числового програмного керування та без неї. А також може застосовуватись при обробці деталей з некруглими торцями.

Ключові слова: двостороннє шліфування, схрещені осі, правка круга, конічна калібрувальна ділянка, алмазний олівець.

1. Вступ

Постійно зростаючі вимоги до точності та якості виробів, як обов'язкової умови їх безперебійної тривалої роботи, стимулюють технічний розвиток виробництв. Все більша увага звертається на розробку й впровадження високоякісного та високопродуктивного обладнання, як засобу досягнення конкурентоспроможності. Крім того сучасний ринок вимагає достатньої гнучкості [1]. Швидка переорієнтація виробництв часто досягається шляхом використання більш універсального обладнання з системами числового програмного керування. Не-

мало значущими є розробка не тільки нового обладнання, що потребує значних початкових вкладів, а і створення нових способів та технологій на базі існуючого.

Підвищення довговічності виробів досягають різними способами. Одним з яких є створення нових конструкційних матеріалів з попередньо визначеними властивостями [2]. Активно розвивається інструментальне виробництво, що пропонує більш високопродуктивні та точні конструкції різального інструменту й інструментальні матеріали [3].

Кінцевою стадією виготовлення деталей є її чистова обробка на шліфувальних та полірувальних верстатів [4]. Саме на цих операціях забезпечується кінцева точність розмірів та необхідна якість поверхонь.

Широко поширені деталі з високоточними торцевими поверхнями, наприклад, ролики підшипників, хрестовини карданних валів, поршневі пальці, пружини та інші. Найбільш продуктивним є спосіб одночасного двостороннього шліфування торців таких деталей. При цьому, окрім збільшення продуктивності також підвищується точність взаємного розташування торцевих поверхонь. Однак при класичному двосторонньому шліфуванні з паралельними осями шліфувальних кругів та падаючого пристрою весь припуск знімається при входженні деталі в зону обробки. У результаті цього спостерігається значний знос кругів та виникає необхідність частого коригування їх профілю. Більш прогресивні схеми обробки зі схрещеними осями інструменту та деталей забезпечують рівномірний розподіл припуску і підвищують ресурс шліфувальних кругів. Однак безпосередньо схема обробки вносить геометричну похибку точності торців.

Отже створення нових схем двостороннього торцевого шліфування круглих деталей, наприклад, роликів підшипників, поршневих пальців та інші, а також методів правки шліфувальних кругів є важливою науково-технічною задачею. Вирішення якої дозволить підвищити точність обробки та збільшити період роботи інструмента.

Сучасне металообробне обладнання оснащено системами числового програмного керування, що підвищує їх гнучкість до виконання різних типів робіт. Для опису траєкторій та швидкостей руху органів верстату задають спеціальні керуючі програми. Математичною базою для їх написання є просторові моделі процесу зняття припуску та формоутворення.

Тому створення та дослідження модульних просторових математичних моделей процесу правки шліфувального круга з кінчними калібрувальними ділянками для двосторонньої обробки торців круглих деталей є актуальною задачею.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Вагоме місце на ринку шліфувальних верстатів займає компанія Junker Group [5]. Вона пропонує ряд двосторонніх шліфувальних верстатів для різних типів виробів. У зону обробки деталі подаються за рахунок обертового руху падаючого барабана в спеціальні отвори якого попередньо встановлюються заготовки. Конструкцією верстату передбачено можливість виконання обробки з паралельними осями інструмента й деталі або орієнтованими кругами. Також забезпечено можливість періодичної правки робочих поверхонь інструменту.

Проблемі вибору правлячого інструменту присвячена робота [6], у якій розглянуто різні типи алмазних олівців та досліджено схеми правки і відповідне обладнання. Однак не наведено пропозицій та методів по удосконаленню існуючих схем. У роботі [7] розглянуто форми шліфувальних кругів та їх текстуру. Доведена доцільність виконання на робочій поверхні шліфувального круга активних та пасивних ділянок. При цьому активні ділянки забезпечують знаття припуску та формоутворення процесу шліфування. А пасивні збільшують простір для відведення стружки з зони обробки. Використання таких шліфувальних кругів покращує якість обробки.

У роботі [8] пропонується попередньо правити шліфувальні круги при двосторонньому торцевому шліфуванні. Показано, що попереднє визначення форми робочої поверхні впливає на якість перших деталей партії, значно зменшуючи час на припрацювання кругів. Однак гіперболічна форма профілю круга, яку пропонується використовувати у роботі, не забезпечить високу точність поверхонь, у результаті наявності кривизни. У дослідженні [9] наведено схеми вимірювання кінематичних, динамічних і силових параметрів двостороннього шліфування. Доведено вплив різноманітних параметрів на якість виготовлених деталей та пропонується виконання контролю процесу обробки. Однак не наведено практичних рекомендацій, щодо їх оптимальних значень.

У роботі [10] запропоновано правити периферію шліфувального круга зі змінною осьовою подачею. Це забезпечує різну розвиненість робочого профілю та покращує умови в зоні обробки. Також в роботі проведено математичне моделювання процесу правки, запропоновано використовувати загальну модульну модель правлячого інструмента. Однак форма алмазу описана у вигляді тетраедру, що вимагає його орієнтації у просторі. Так, при деяких кутах повороту грані робочої поверхні олівця будуть виходити з контакту. Крім того в дослідженні здійснюється формоутворення тільки периферійної частини шліфувального круга. А особливості правки торцевої поверхні не розглянуто.

В роботі [11] розглянуто вплив якості обробленої поверхні роликів підшипників на довговічність їх роботи. У [12] наведено методи поліпшення якості поверхневого шару роликів підшипників та показано, що його стан значним чином підвищує ресурс роботи вузлів. У роботі [13] проведено математичне моделювання процесу двостороннього торцевого шліфування різних деталей з круглим профілем, а також деталей з різними діаметрами торців. Записані математичні моделі процесу зняття припуску та формоутворення, досліджено точність утворених торцевих поверхонь. Однак при розгляді правки шліфувального круга не враховано обертальний рух правлячого інструменту. У роботі [14] запропоновано схему правки інструменту для двостороннього торцевого шліфування круглих деталей. На торцевій поверхні шліфувального круга пропонується виконувати калібрувальну ділянку, однак не визначено яким чином приймати її розміри та визначати розташування. Розроблені математичні моделі процесу правки інструменту та двостороннього шліфування. Показано що при наявності конічних калібрувальних ділянок геометрична похибка торців деталі відсутня. Однак, при описі моделей правки не наведено функціональну залежність осьового переміщення шліфувального круга в залежності від кута поворо-

ту правлячого інструмента. Це практично унеможливило написання керуючої програми та забезпечення необхідної геометрії кругів.

Задача покращення якості поверхневого шару торців деталей, а також підвищення їх точності, може бути вирішена шляхом правки шліфувальних кругів з утворенням на них прямолінійних конічних ділянок. Розробка просторових математичних моделей дозволить більш детально розглядати та аналізувати процес формоутворення робочої торцевої поверхні круга при правці. Крім того вони стануть математичною базою для створення програм на верстаті з числовим програмним керуванням.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є просторове моделювання процесу формоутворення конічних калібрувальних ділянок кругів при двосторонньому шліфуванні круглих торців. Це дасть можливість визначити траєкторію та кутову швидкість переміщення алмазного олівця, що є математичною базою для написання керуючих програм. Правка шліфувальних кругів з утворенням прямолінійних конічних калібрувальних ділянок забезпечить підвищення точності двостороннього торцевого шліфування, а зміна кутової швидкості барабану подачі круга забезпечить рівномірну розвиненість калібрувальної ділянки. Це додатково підвищує якість оброблених торців та підвищує ресурс шліфувальних кругів.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- визначити мінімально допустиму довжину калібрувальної ділянки;
- створити просторову модель правлячого інструменту, зі сферичною робочою поверхнею;
- розробити просторові математичні моделі процесу зняття припуску та формоутворення при правці круга;
- визначити траєкторію та кутову швидкість відносного переміщення алмазного олівця та шліфувального круга.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес зняття припуску та формоутворення при правці абразивного інструменту з утворенням прямолінійної конічної калібрувальної ділянки. Визначення загального вигляду та положення калібрувальної ділянки базується на використанні методу обкатки при формоутворенні деталей. Розрахунок її мінімально допустимої довжини, здійснюється з використанням базових геометричних залежностей у математичному програмному пакеті Mathcad (Сполучені Штати Америки).

Правка шліфувальних кругів здійснюється алмазним олівцем зі сферичною робочою поверхнею. Радіус заокруглення при його вершині складає близько 0,1 мм і може збільшуватись у результаті зносу до 0,4...0,5 мм. Розмір радіусу алмазного олівця обмежується необхідною розвиненістю профіля шліфувального круга та його характеристиками.

Математичний опис робочої поверхні правлячого інструмента та шліфувального круга здійснюється з використанням трьох базових модулів – прямокутного, циліндричного та сферичного. Кожен з них визначає положення точки у

просторі у відповідній системі координат. У цьому випадку робоча поверхня алмазного олівця описується сферичним інструментальним модулем. А поверхня шліфувального круга – циліндричним. Загалом вирізняють наступні модулі: інструментальний, орієнтації, формоутворення. Для їх опису застосовують шість матриць $M1, M2... M6$ розміром 4×4 , які визначають переміщення одиничної точки в системі координат. Аналіз модулів та розрахунків конкретних геометричних значень здійснювалась у програмі Mathcad, у якій додатково розроблені логічні блоки розрахунку, з використанням вбудованих функцій.

5. Результати дослідження правки конічних калібрувальних ділянок кругів при двосторонньому шліфуванні торців круглих деталей

5. 1. Розрахунок мінімально допустимої довжини калібрувальної ділянки

Одночасну обробку торців круглих деталей пропонується здійснювати орієнтованими кругами з конічними калібрувальними ділянками на двосторонньому торцешліфувальному верстаті (рис. 1). Круглі деталі 1 радіусом R_p встановлюються в барабан подачі 2. І вводяться в зону обробки по дузі R_b , з постійною кутовою швидкістю ω_b . Обробка здійснюється двома шліфувальними кругами 3 та 4, з максимальним радіусом $R_{w1}=R_{w2}$, які обертаються зі швидкістю $\omega_{w1}=\omega_{w2}$. Осі обертання барабану подачі виробів та шліфувальних кругів попередньо знаходяться в одній горизонтальній площині на відстані L_c . З метою рівномірного розподілу припуску вздовж робочої поверхні кругів їх повертають на кут $\alpha_{w1}=\alpha_{w2}$ у вертикальній площині. Положення калібрувальної ділянки визначається орієнтацією інструменту в горизонтальній площині $\beta_{w1}=\beta_{w2}$. При цьому загальний кут орієнтації шліфувальних кругів δ_Σ можна визначити як геометричну суму кутів повороту

$$\delta_\Sigma = \sqrt{\alpha_{w1}^2 + \beta_{w1}^2} = \sqrt{\alpha_{w2}^2 + \beta_{w2}^2}. \quad (1)$$

Будова торцешліфувальних верстатів дозволяє орієнтувати круги разом зі шліфувальною бабкою. При цьому поворот здійснюється за допомогою спеціального шарніру 5, який розташовується в умовному центрі системи координат шліфувальної бабки O_{gh} . Зміщення системи координат, наприклад, правого круга $O_{w1}X_{w1}Y_{w1}Z_{w1}$ відносно системи координат шліфувальної бабки 6 $O_{gh1}X_{gh1}Y_{gh1}Z_{gh1}$ визначається координатами X_{gh1} та Z_{gh1} . Ці координати є постійними для певного типорозміру верстату.

Для виключення геометричної похибки торця деталі при двосторонньому шліфуванні орієнтованими кругами, пропонується виконувати конічні калібрувальні ділянки на торцевій інструментальній поверхні. Вони повинні розташовуватись в площині, яка проходить через вісь обертання круга та перпендикулярна торцю деталі, що оброблюється. З метою найбільш повного використання робочої поверхні шліфувального круга калібрувальну ділянку бажано виконувати мінімально допустимої довжини. При цьому чорновий припуск буде зніматись більшою площею круга, що дозволить зменшити його миттєву величину і відповідно зменшити теплонапруженість обробки. Схема визначення мініма-

льно допустимої довжини калібрувальної ділянки показна на рис. 1, *в* – що відповідає вигляду з боку А. Для спрощення та наочності рисунку, барабан подачі виробів не наведено, а лише зображено радіус R_b розташування заготовок 1. І, відповідно, траєкторія їх руху в процесі шліфування.

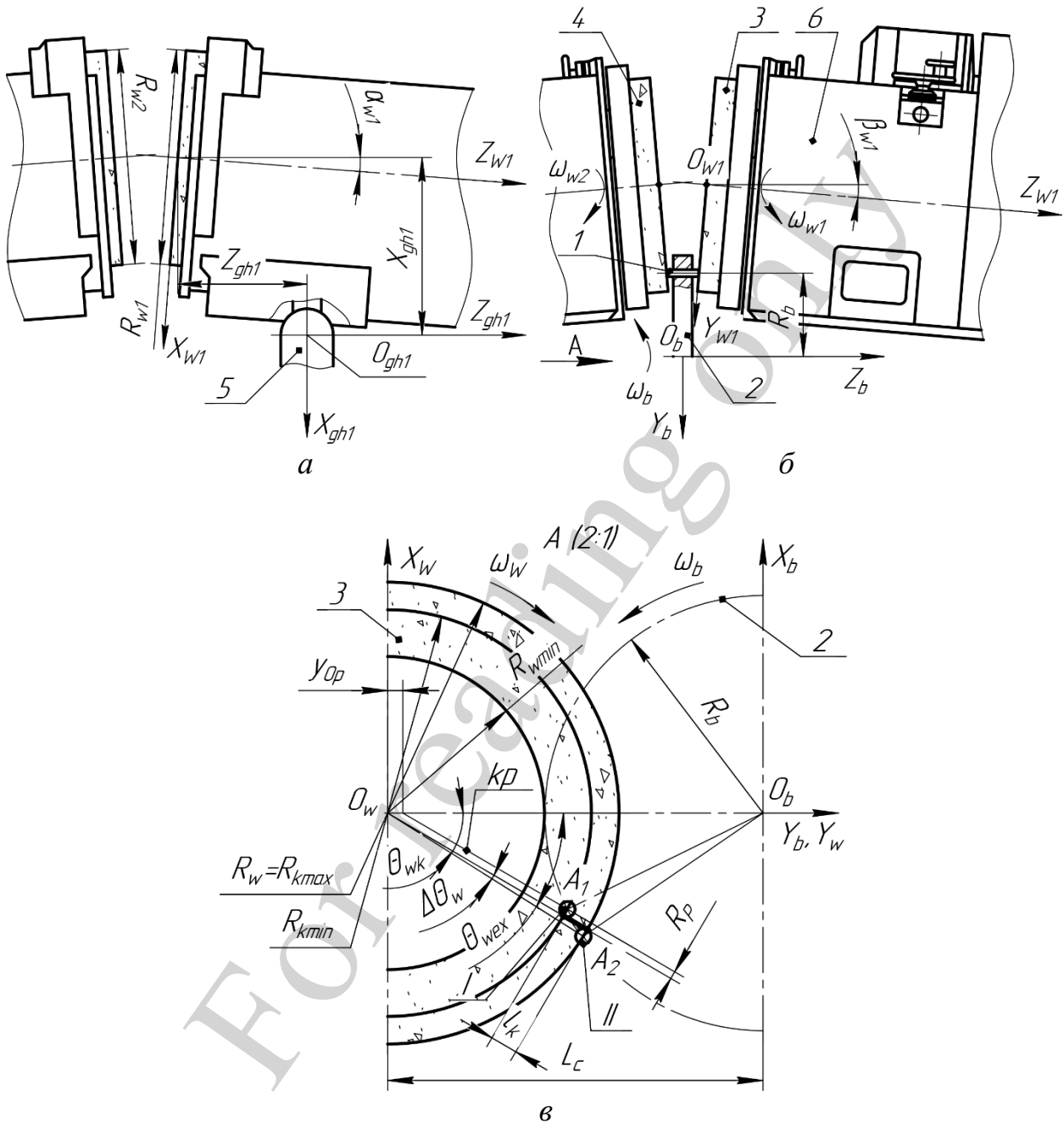


Рис. 1. Схема двостороннього шліфування торців круглих деталей кругами з кінчними калібрувальними ділянками: *а* – вигляд з переду; *б* – вигляд з гори; *в* – збільшений вид А

Максимальний радіус калібрувальної ділянки шліфувального круга приймемо рівним радіусу інструмента $R_{kmax} = R_w$. Для визначення мінімальної довжини калібрувальної ділянки розглянемо два положення оброблюємої заготовки.

Положення I – входу циліндричної заготовки в зону калібрувального шліфування, та положення II – виходу із зони обробки. Умова формоутворення, визначається рівністю нулю добутку швидкості та напрямного вектору ($n \times V=0$). Таким чином кінцева точка A_2 калібрувальної ділянки знаходиться як точка перетину профілю деталі в положенні II та прямої дотичної до неї, що проходить через центр шліфувального круга. Отже площина якій належить калібрувальна ділянка знаходиться під кутом θ_k до горизонтальної площини $O_{w1}Y_{w1}Z_{w1}$

$$\theta_k = \theta_{wex} - \Delta\theta, \quad (2)$$

де θ_{wex} – кут повороту радіусної прямої інструмента, що з'єднана з центром деталі, при її виході з зони обробки, рад; $\Delta\theta$ – кут між радіусними прямими, що проходять через центр деталі та дотичної до її поверхні.

Зазначені кути можна розрахувати за залежностями

$$\theta_{wex} = a \cos \left(\frac{L_c^2 + R_w^2 - R_b^2}{2 \cdot L_c \cdot R_w} \right), \quad (3)$$

$$\Delta\theta = a \cos \left(\frac{2 \cdot R_w^2 - R_p^2}{2 \cdot R_w^2} \right), \quad (4)$$

де L_c – відстань між центрами шліфувального круга та барабану подачі виробів, мм; R_w – радіус шліфувального круга, мм; R_b – радіус барабану подачі, мм; R_p – радіус деталі, що оброблюється, мм.

Рівняння прямої що містить калібрувальну ділянку в системі координат круга має вигляд

$$x_k(y_k) = \operatorname{tg}(-\theta_k) \cdot y_k, \quad (5)$$

де $\operatorname{tg}(-\theta_k)$ – кутовий коефіцієнт нахилу прямої, що містить калібрувальну ділянку; y_k – поточна координата вздовж осі $O_{w1}Y_{w1}$, мм.

Для визначення початку калібрувальної ділянки необхідно знайти координати точки A_1 . Тобто точки дотику циліндричної поверхні деталі, що рухається по дузі кола R_b , з визначеною прямою.

Запишемо рівняння лінії kp , яка паралельна калібрувальній ділянці та відстроїть від неї на величину радіуса оброблюємої деталі

$$x_{kp}(y_{kp}) - x_{0p} = \operatorname{tg}(-\theta_k) \cdot (y_{kp} - y_{0p}), \quad (6)$$

де y_{kp} – поточна координата вздовж осі $O_{w1}Y_{w1}$, мм; y_{k0} , x_{k0} – координати перетину прямої kp з віссю $O_{w1}Y_{w1}$, мм.

З рис. 1 видно, що

$$x_{0p} = 0, \quad y_{0p} = \frac{R_p}{\sin \theta_k}. \quad (7)$$

Враховуючи (7), рівняння прямої (6) набуває вигляд

$$x_{kp}(y_{kp}) = \operatorname{tg}(-\theta_k) \cdot y_{kp} - \operatorname{tg}(-\theta_k) \cdot \frac{R_p}{\sin \theta_k}. \quad (8)$$

Рівняння дуги, по якій рухаються заготовки в системі координат шліфувального круга має вигляд

$$x_b(y_b) = -\sqrt{R_b^2 - (y_b - L_c)^2}, \quad (9)$$

де y_b – поточна координата точки дуги руху центру заготовки вздовж осі $O_{w1}Y_{w1}$, мм.

Координати центру деталі (x_{cl}, y_{cl}) , при її входженні в зону калібрування (положення I), можна знайти як координати точки перетину ліній (8) та (9).

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(-\theta_k) \cdot y_{cl} - \operatorname{tg}(-\theta_k) \cdot \frac{R_p}{\sin \theta_k} &= \\ &= -\sqrt{R_b^2 - (y_{cl} - L_c)^2} \Rightarrow y_{cl}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$x_{cl} = -\sqrt{R_b^2 - (y_{cl} - L_c)^2}. \quad (11)$$

Перпендикуляр проведений з центру деталі (x_{cl}, y_{cl}) до прямої, що містить калібрувальну ділянку має вигляд

$$x_{kper}(y_{kper}) = \frac{1}{\operatorname{tg}(\theta_k)} \cdot (y_{kper} - y_{cl}) + x_{cl}, \quad (12)$$

де x_{kper}, y_{kper} – поточні координати точок прямої що перпендикулярна калібрувальній ділянці і проходить через центр деталі, при її входженні в зону калібрування в системі координат круга $O_{w1} X_{w1} Y_{w1}$, мм.

Координати початку калібрувальної ділянки визначаються як точка перетину лінії описаної рівністю (5) та перпендикуляру (12), тобто

$$\operatorname{tg}(-\theta_k) \cdot y_{A1} = \frac{1}{\operatorname{tg}(\theta_k)} \cdot (y_{A1} - y_{cl}) + x_{cl} \Rightarrow y_{A1}, \quad (13)$$

$$x_{A1} = -\sqrt{R_b^2 - (y_{A1} - L_c)^2}. \quad (14)$$

Радіус початку калібрувальної ділянки в робочій площині дорівнює

$$R'_{k \min} = \frac{y_{A1}}{\cos \theta_k}. \quad (15)$$

Враховуючи, сумарний кут повороту шліфувального круга, радіус початку калібрувальної ділянки в торцевій площині менший на

$$R_{k \min} = R'_{k \min} \cdot \cos \delta_\Sigma. \quad (16)$$

Таким чином, координати точки $A_1 (x_{A1}, y_{A1})$, тобто початку калібрувальної ділянки, для визначеного типорозміру верстату, залежать тільки від радіуса оброблюваної деталі. Відповідно довжина калібрувальної ділянки також залежить тільки від розміру деталі та не залежить від припуску, що знімається.

Наприклад, при шліфуванні ($R_w=225$ мм) торців роликів ($R_p=7,5$ мм), які рухаються у барабані подачі по колу радіусом $R_b = 212$ мм, причому $L_c=365$ мм а $\delta_\Sigma=0,123$ рад, радіус початку калібрувальної ділянки $R_{k \min}=208,785$ мм. А мінімально допустима довжина калібрувальної ділянки, яка забезпечить нульову геометричну похибку торців, становить 16,215 мм.

5. 2. Створення просторової моделі правлячого інструменту, зі сферичною робочою поверхнею

У якості інструмента для правки робочої поверхні шліфувального круга з кінчними калібрувальними ділянками візьмемо алмаз в оправці. З метою проведення модульного просторового моделювання процесу правки, запишемо математичну модель робочої поверхні алмазу. Одним з найпоширеніших варіантів опису форми алмазу є його представлення у вигляді конуса з заокругленою вершиною. При цьому в роботі переважно приймає участь саме вершина алмаза, тобто сферична ділянка з радіусом ρ (рис. 2, а). Її математичний опис має вигляд

$$\bar{r}_d(\phi, \theta) = M_6(\theta) \cdot M_5(\phi) \cdot M_3(\rho) \cdot \bar{e}_4, \quad (17)$$

де ρ – радіус заокруглення вершини алмазу мм; ϕ – поточний кут повороту одиничної точки навколо осі $O_d Y_d$, $\phi=0 \dots \phi_k$ рад; ϕ_k – кут що визначає перехід від сферичної ділянки вершини алмазу до його конусної частини, $\phi_k=0,5 \cdot \psi$ рад; θ – поточний кут повороту одиничної точки навколо осі $O_d Z_d$, $\theta = 0 \dots 2 \cdot \pi$ рад.

Конусна прямолінійна ділянка алмазного інструменту описується рівністю

$$\bar{r}_d(\phi, \theta) = M_6(\theta) \cdot M_1(h(\phi)) \cdot M_3(-h(\phi)) \cdot M_5(\phi_k) \cdot M_3(\rho) \cdot \bar{e}_4, \quad (18)$$

де φ – поточний кут повороту одиничної точки навколо осі $O_d Y_d$, $\varphi = \varphi_k \dots \pi$ рад; $h(\varphi) = \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot \rho \cdot \tan(\varphi - \varphi_k)$ – функція, яка задає поточні координати точки прямолінійної ділянки алмазного інструменту в здовж осей $O_d X_d$ та $O_d Z_d$, в залежності від зміни поточного кута φ , мм.

Загальну модель правлячого інструменту (рис. 2, б) можна описати сумістивши рівняння (17), (18) шляхом введення функції Хевісайда.

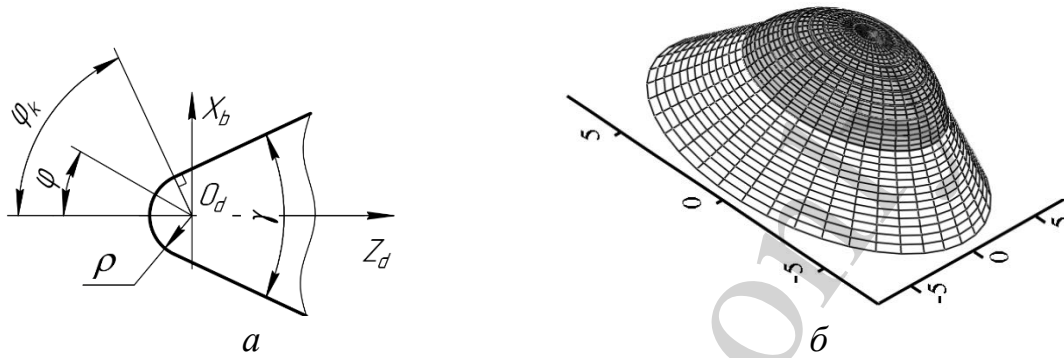


Рис. 2. Робоча частина правлячого інструменту: а – розрахункова схема; б – математична модель

В процесі моделювання правки круга можна використовувати спрощену модель алмазного інструменту (17), заважаючи на невелику кількість знімаемого матеріалу. Крім того, змінюючи радіус заокруглення вершини алмазу ρ , враховується знос правлячого інструменту.

5. 3. Розробка просторових математичних моделей процесу зняття припуску та формоутворення при правці круга

Правку шліфувальних кругів з конічними калібрувальними ділянками при двосторонньому шліфуванні торців круглих деталей пропонується здійснювати двома алмазними інструментами. При цьому алмазні олівці встановлюються в барабан подачі виробів 2 (рис. 1) симетрично відносно центральної площини $O_b X_b Y_b$. З метою утворення прямолінійної конічної калібрувальної ділянки шліфувальні круги 3 та 4 додатково переміщуються вздовж осей $O_{w1} Z_{w1}$ та $O_{w2} Z_{w2}$, відповідно. Для забезпечення постійної розвиненості торцевої робочої поверхні на калібрувальній ділянці барабан подачі виробів рухається зі змінною кутовою швидкістю.

Загальну математичну модель формоутворення торцевої робочої поверхні кругів можна описати рівнянням

$$\bar{r}_w(\varphi, \theta) = C_{\theta_w, z_w}^F \cdot S_{\alpha_w, \beta_w}^O \cdot P_{x_{gh1}, L_c, z_{gh1}}^T \cdot C_{\theta_b, R_b}^T \cdot \bar{r}_d(\varphi, \theta), \quad (19)$$

де C_{θ_b, R_b}^T – циліндричний модуль переходу з системи координат алмазного інструменту в систему координат барабану подачі; P_{x_m, y_m, z_m}^T – прямокутний мо-

дуль перенесення в систему координат верстату, для опису орієнтації кругів; S_{α_w, β_w}^O – сферичний модуль орієнтації; C_{θ_w, z_w}^F – циліндричний модуль формоутворення при правці.

Рівняння (19) можна переписати у вигляді

$$\begin{aligned} \bar{r}_w(\theta_w, z_w, \theta_b, \phi, \theta) = & M_6(\theta_w) \cdot M_3(z_w) \cdot M_4(\beta_w) \cdot M_5(\alpha_w) \times \\ & \times M_3(z_{gh1}) \cdot M_2(L_c) \cdot M_1(x_{gh1}) \cdot M_6(\theta_b) \cdot M_2(R_b) \cdot \bar{r}_d(\phi, \theta), \end{aligned} \quad (20)$$

де R_b – радіус руху вершини алмазного олівця в барабані подачі, мм; θ_b – поточний кут повороту барабана подачі, рад; L_c – відстань між центром барабану подачі й осі обертання шліфувального круга вздовж координатної прямої $O_{w1}Y_{w1}$, мм; x_{gh1}, z_{gh1} – відстань від початку системи координат круга до поворотного шарніру, мм; α_w, β_w – кути орієнтації шліфувального круга відносно осей O_wY_w та O_wX_w , відповідно, рад; z_w – зміщення шліфувального круга вздовж осі O_wZ_w , мм; θ_w – поточний кут повороту шліфувального круга, рад.

Математична модель торцевої поверхні шліфувального круга (20) має п'ять змінних. При цьому параметри ϕ і θ визначають робочу поверхню правлячого інструменту. Кут повороту барабану θ_b необхідно задати у вигляді функціональної залежності від кута повороту шліфувального круга θ_w , це забезпечить постійну розвиненість калібрувальної ділянки. Осьове переміщення z_w повинно знаходитись у функціональній залежності від кута повороту барабана подачі θ_b з метою формування прямолінійної конічної ділянки.

5. 4. Визначення траєкторії та кутової швидкості відносного переміщення алмазного олівця та шліфувального круга

Розглянемо більш детально формоутворення конусної калібрувальної ділянки правого шліфувального круга 3 (рис. 1). Як зазначалось вище положення та довжина калібрувальної ділянки визначаються сумарним кутом орієнтації інструмента і діаметром оброблюємих деталей. За методом, що пропонується, на калібрувальній ділянці необхідно створити криву, яка за характером буде відповідати спіралі Архімеда з постійними кроком S_a . Для досягнення цього необхідно змінювати, а саме зменшувати, кутову швидкість обертання барабану подачі при переході до обробки калібрувальної ділянки.

З умови мінімальності довжини калібрувальної ділянки, радіус її початку відповідає значенню R_{kmin} , а закінчення – R_{kmax} . Однак, якщо при обробці деталей деяким радіусом R_p , при перетині дуги руху виробів у барабані подачі R_b з мінімальним радіусом R_{kmin} , кінцева точка деталі дотикається до калібрувальної прямої. То у випадку правки алмазним олівцем, з порівняно невеликим радіусом заокруглення вершини ρ , при перетині дуги його подачі з радіусом R_{kmin} , він відстоїть від точки A_1 на деякій відстані $A_1A'_1$ (рис. 3). Враховуючи, що це конічна поверхня обертання точка, A'_1 буде розташовуватись дещо нижче, і для забезпечення прямолінійності калібрувальної ділянки, необхідно надати кругу додаткове осьове переміщення z_w . Єдина точка, у якій $z_w=0$ це точка A_0 – пере-

тину дуги руху алмазного олівця R_b з калібрувальною ділянкою. Будемо вважати цю точку базовою та визначати осьові переміщення відносно неї. Координати полюсу A_0 можна визначити, як координати точки перетину прямої що містить калібрувальну ділянку (5) та дуги барабану подачі (9)

$$\operatorname{tg}(-\theta_k) \cdot y_{A_0} = -\sqrt{R_b^2 - (y_{A_0} - L_c)^2} \Rightarrow y_{A_0}, \quad (21)$$

$$x_{A_0} = -\sqrt{R_b^2 - (y_{A_0} - L_c)^2}. \quad (22)$$

де x_{A_0}, y_{A_0} – координати точки A_0 в системі координат шліфувального круга, мм.

Радіус розміщення полюсу A_0 на торцевій поверхні шліфувального круга

$$R_{A_0} = y_{A_0} \cdot \frac{\cos \delta_\Sigma}{\cos \theta_k}. \quad (23)$$

Поточний кут повороту барабану подачі з алмазним олівцем при формоутворенні полюсу A_0

$$\theta_{bA_0} = a \cos \left(\frac{L_c^2 + R_b^2 - R_{A_0}^2}{2 \cdot L_c \cdot R_b} \right). \quad (24)$$

Визначимо необхідні осьові переміщення і відповідні кути повороту барабану подачі та шліфувального круга при формоутворенні точок калібрувальної ділянки, що відповідають поточному радіусу круга до полюсу та після нього.

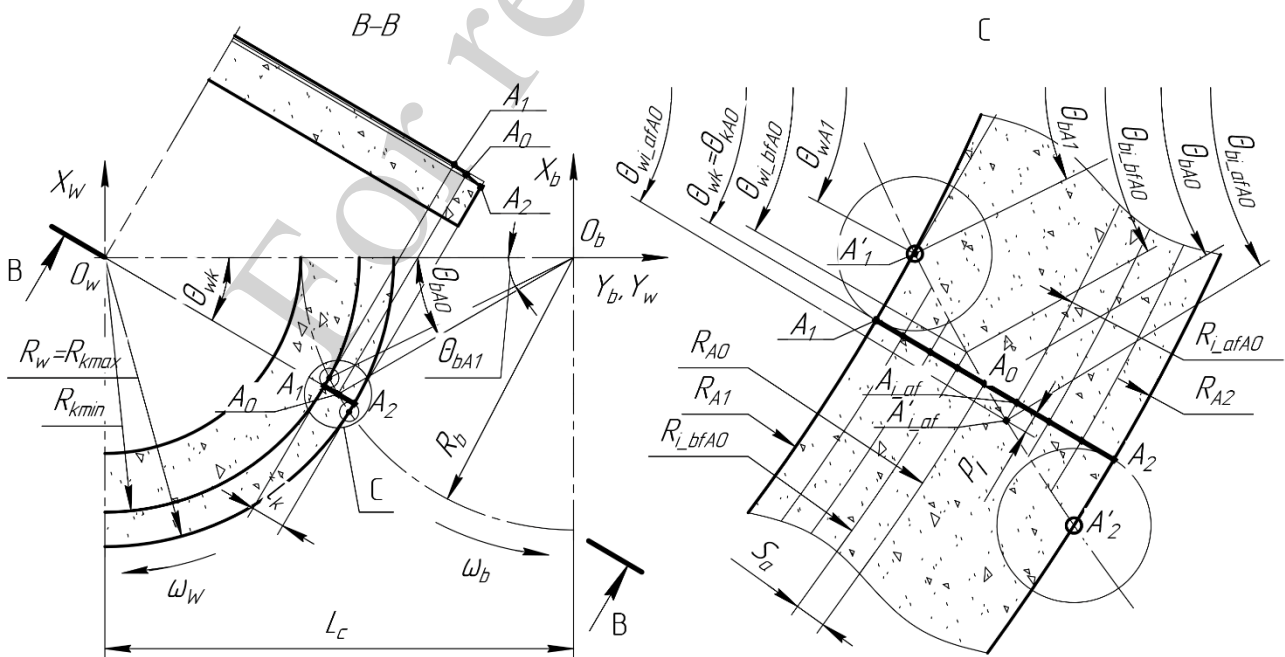


Рис. 3. Схема визначення осьового переміщення шліфувального круга

Розглянемо частину калібрувальної ділянки, яка лежить нижче точки A_0 , тобто відрізок A_0A_2 . Будемо вважати, що до моменту правки точки A_0 шліфувальний круг зробив N обертів і його поточний кут положення становить $2\pi N + \theta_{wk}$ або $2\pi N + \theta_{wA0}$. При цьому барабан подачі повернувся на кут θ_{bA0} . Для формування на калібрувальній ділянці певної шорсткості з кроком S_a , необхідно забезпечити відповідність кута повороту барабану подачі θ_{bi_afA0} , та осьового переміщення шліфувального круга z_{wi_afA0} куту повороту інструмента θ_{wi_afA0} . При цьому радіус деякої i -ї точки на шліфувальному крузі визначається

$$R_{i_afA0} = R_{A0} + i \cdot S_a, \quad (25)$$

де i – порядковий номер точки що розглядається, $i=1,2,\dots$.
Тоді кут повороту шліфувального круга і барабану подачі

$$\theta_{bi_afA0} = a \cos \left(\frac{L_c^2 + R_b^2 - R_{i_afA0}^2}{2 \cdot L_c \cdot R_b} \right). \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \theta_{wi_afA0} &= 2 \cdot \pi \cdot N + i \cdot 2 \cdot \pi + a \cos \left(\frac{L_c^2 + R_{i_afA0}^2 - R_b^2}{2 \cdot L_c \cdot R_{i_afA0}} \right) = \\ &= 2 \cdot \pi \cdot (N + i) + a \cos \left(\frac{L_c^2 + R_{i_afA0}^2 - R_b^2}{2 \cdot L_c \cdot R_{i_afA0}} \right). \end{aligned} \quad (27)$$

Для визначення осьового переміщення шліфувального круга проведемо з точки A_{i_afA0} перпендикуляр до калібрувальної прямої та знайдемо точку його перетину з дугою руху алмазного олівця. Координати точки A_{i_afA0}

$$\begin{aligned} x_{i_afA0} &= \frac{R_{i_afA0}}{\sin \theta_{wi_afA0}}, \\ y_{i_afA0} &= \frac{R_{i_afA0}}{\cos \theta_{wi_afA0}}. \end{aligned} \quad (28)$$

Рівняння перпендикуляру проведеного з точки A_{i_afA0}

$$\begin{aligned} x_{kpi_afA0} (y_{kpi_afA0}) &= \\ &= \frac{1}{\operatorname{tg}(\theta_k)} \cdot (y_{kpi_afA0} - y_{i_afA0}) + x_{i_afA0}, \end{aligned} \quad (29)$$

де x_{kpi_afA0} , y_{kpi_afA0} – поточні координати точок, що лежать на прямій перпендикулярній калібрувальній ділянці і проходить через точку A_{i_afA0} , мм.

Координати x_{pi_afA0} , y_{pi_afA0} перетину проведеного перпендикуляра з дугою руху правлячого алмазу

$$\frac{1}{\operatorname{tg}(\theta_k)} \cdot (y_{pi_afA0} - y_{i_afA0}) + x_{i_afA0} =$$

$$= -\sqrt{R_b^2 - (y_{pi_afA0} - L_c)^2} \Rightarrow y_{pi_afA0}.$$
(30)

$$x_{pi_afA0} = -\sqrt{R_b^2 - (y_{pi_afA0} - L_c)^2}.$$
(31)

Довжина отриманого відрізка

$$p_i = \sqrt{(x_{i_afA0} - x_{pi_afA0})^2 - (y_{i_afA0} - y_{pi_afA0})^2}.$$
(32)

Обробка конічної поверхні, на відміну від плоскої зумовлює деяке просторове викривлення. Так, при проведенні дуги радіусом R_{i_afA0} , вона буде перетинати криву руху алмазного олівця у точці, що знаходиться на деякій відстані від попередньо проведеного перпендикуляра. Ця відстань і є величиною додаткового осьового руху шліфувального круга. Для її визначення знайдемо довжину хорди кола радіусом R_{i_afA0} , що обмежена кутами θ_{wA0} та θ_{wi_afA0}

$$h_i = \sqrt{2 \cdot R_{wi_afA0}^2 - 2 \cdot R_{wi_afA0} \cdot \cos(\theta_{wi_afA0} - \theta_{wA0})}.$$
(33)

Знаючи довжину перпендикуляру p_i , хорди h_i та кута протилежного хорді $\psi_i = 90 - \theta_{wi_afA0} + \theta_{wA0}$ у трикутнику $p_i h_i z_{wi_afA0}$, миттєве переміщення шліфувального круга можна визначити з виразу

$$z_{wi_afA0} = p_i \cdot \cos \psi_i + 0,5 \cdot \sqrt{4 \cdot p_i^2 \cdot \cos^2 \psi_i - 4 \cdot (p_i^2 - h_i^2)}.$$
(34)

Таким чином рівняння (26), (27) та (34) визначають взаємозв'язок між кутом повороту барабану подачі, осьовим переміщенням і кутом повороту шліфувального круга при правці калібрувальної ділянки на проміжку між точками A_0 та A_2 . Рівняння щодо визначення відповідних залежностей при правці ділянки $A_0 A_1$, яка розташована вище полюса визначаються аналогічно.

Кожна наступна точка A_{i_bfA0} обирається у напрямку зменшення діаметру через крок S_a . При цьому, на відміну від попереднього випадку, радіус поточної точки буде зменшуватись

$$R_{i_bfA0} = R_{A0} - i \cdot S_a. \quad (35)$$

Враховуючи зворотній порядок розрахунку, кут повороту шліфувального круга також зменшується

$$\theta_{wi_afA0} = 2 \cdot \pi \cdot (N - i) + a \cos \left(\frac{L_c^2 + R_{i_afA0}^2 - R_b^2}{2 \cdot L_c \cdot R_{i_afA0}} \right). \quad (36)$$

Методика розрахунку кута повороту барабана подачі (26) та величини осевого переміщення шліфувального круга (34) залишається не змінною.

Отже розраховані поточні значення кутових координат барабану подачі й шліфувального круга, та лінійного переміщення круга є вхідними даними для написання керуючої програми правки. Виключення параметра циклу i та перетворення результату розрахунку рівнянь (26), (27), (34), (36) у функціональні залежності виду $\theta_b(\theta_w)$ та $z_w(\theta_w)$, можна здійснити стандартними засобами програми Mathcad. Підстановка їх у математичну модель процесу правки торцевої поверхні шліфувального круга (20), залишає тільки три незалежних параметри. Змінні φ і θ , що утворюють інструментальну поверхню алмазу та поточний кут повороту шліфувального круга θ_w . Таким чином математична модель процесу зняття припуску та формоутворення при правці (20) стає повністю визначеною, і дозволяє проводити дослідження характеристик процесу різання.

6. Обговорення результатів дослідження процесу правки кругів з утворенням конічних калібрувальних ділянок

Запропонована схема правки шліфувальних кругів (рис. 1) забезпечує одночасне формоутворення двох кругів та може використовуватись не тільки на верстатах з оснащених системами ЧПК, але і без них. За рахунок одночасної правки двох кругів зменшується на 50 % час підготовки до роботи і відповідно підвищується загальна продуктивність роботи обладнання.

Розраховано мінімально допустиму довжину калібрувальної ділянки (16), яка розміщується в площині що проходить через вісь обертання шліфувального круга і перпендикулярна торцю деталі. Використання мінімальної за розміром калібрувальної ділянки дозволяє більш повно використовувати робочу площу шліфувального круга та підвищує його ресурс. Кут повороту кругів у вертикальній площині обирається з умови рівномірного розподілу припуску вздовж чорнової частини круга. А кут орієнтації в інструменту в горизонтальній площині визначає положення калібрувальної ділянки.

При правці чорнової та чистової ділянок кутова швидкість барабану подачі постійна, це забезпечує формування різної шорсткості вздовж радіусної прямої та покращує умови в зоні різання. У разі правки калібрувальної ділянки кутова швидкість поступово зменшується (36), це забезпечує постійну розвиненість цієї частини поверхні. Це підвищує якість шліфування торців на відміну від відомих способів, де правка інструмента здійснюється з постійною подачею.

Розроблені модульні математичні моделі інструментальної поверхні алмазного олівця (18) (рис. 2) та процесу зняття припуску і формоутворення при правці (20). Запропоновано використання спрощеної моделі правлячого інструмента, що є доцільним враховуючи невеликі товщини зрізаємого шару. Крім того математична модель алмазного олівця враховує його знос, шляхом зміни радіусу при вершині.

Визначено залежність осевого переміщення шліфувального круга (34) від кута повороту барабана подачі при правці, з метою утворення прямолінійної калібрувальної ділянки. Наявність калібрувальної ділянки визначеної форми виключає виникнення геометричної похибки торця деталі, що підвищує загальну точність обробки. Це відрізняє отриманий результат від стандартних методів правки, де правлячий інструмент здійснює рух тільки по дузі кола, а це призводить до наступного: калібрувальна ділянка формується у вигляді кривої четвертого порядку, що унеможлиблює отримання плоского торця та зумовлює виникнення похибки форми. Визначені залежності та модульні моделі є математичною базою для написання керуючих програм.

Однак в роботі не проведено дослідження мінімально довжини калібрувальної ділянки для обробки торців не круглих деталей. Крім того доцільно провести уточнюючі розрахунки для обробки деталей які обертаються в процесі двостороннього шліфування.

7. Висновки

1. Визначено мінімально допустиму довжину калібрувальної ділянки шліфувального круга при двосторонній обробці торців круглих деталей. Показано що її довжина залежить тільки від діаметру виробів, що обробляються, та не залежить від величини припуску, що знімається. Виконання калібрувальної частини з мінімальними розмірами дозволяє більш повно використовувати робочу поверхню шліфувального круга і збільшує його ресурс. Крім того, зменшує величину припуску, що знімається в одиницю часу, у результаті чого зменшується теплонапруженість процесу та підвищується якість поверхневого шару оброблених деталей.

2. Розроблено загальну модель правлячого інструмента, з головною робочою частиною у вигляді сфери, радіус якої дорівнює радіусу заокруглення алмазного олівця та додатковою конусною частиною, яка приймає участь у роботі у разі збільшення припуску на правку. Запропонована модель враховує знос правлячого інструменту, шляхом коригування радіуса сфери.

3. Запропоновано загальні модульні просторові моделі правки шліфувальних кругів для двостороннього шліфування торців круглих деталей, таких як ролики підшипників, поршневі пальці та інші. На торцевій поверхні шліфувальних кругів формують калібрувальну ділянку у вигляді прямої, яка лежить у площині, що проходить через вісь обертання круга й перпендикулярна торцю деталі. Для підвищення якості обробки правку калібрувальної ділянки здійснюють зі зміною кутовою швидкістю алмазного олівця, це забезпечує її рівномірну розвиненість. При цьому подача барабану при правці чорнової ділянки є більшою за значенням та постійною в часі. Таким чином формується змінна

шорсткість круга, що полегшує видалення стружки при чорновому та чистовому шліфуванні та підвищує якість обробки.

4. Визначено миттєві осьові переміщення шліфувального круга в залежності від кута повороту барабану подачі, які формують прямолінійну калібрувальну ділянку. Знайдено взаємозв'язок між кутовою швидкістю шліфувального круга та правлячого інструменту. Це дає можливість отримати однакову розвиненість робочої поверхні калібрувальної ділянки, що підвищує якість шліфування торців круглих деталей. Використання знайдених залежностей дозволяє записати керуючу програму процесу правки.

Література

1. Shkarlet, S., Kholiavko, N., Dubyna, M. (2019). Information economy: management of educational, innovation, and research determinants. *Marketing and Management of Innovations*, 3, 126–141. doi: <https://doi.org/10.21272/mmi.2019.3-10>
2. Ломов, С. Б. (2016). Новые поколения конструкционных металлических композиционных материалов на основе алюминиевого сплава, армированного непрерывными и дискретными волокнами Al₂O₃ (обзор). *Труды ВИАМ*, 12 (48), 21–27. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/novye-pokoleniya-konstruktsionnyh-metallicheskih-kompozitsionnyh-materialov-na-osnove-alyuminievogo-splava-armirovannogo>
3. Complete Machining Solution. Rotating tool lines. Tooling Sysytems. Catalogue (2019). ISCAR.
4. Шлифовальные станки завод «Харверст». Харьковский станкостроительный завод «Харверст», 20. URL: http://harverst.com.ua/upload/files/Buklet_stanko_ru.pdf
5. Double-wheel surface grinding machines. Junker. URL: <https://www.junker-group.com/grinding-machines/product-category/double-wheel-surface-grinding-machines>
6. Баринов, А. В., Платонов, А. В., Лебедева, С. М., Самсонов, И. С. (2016). Исследование особенностей настройки шлифовальных станков для обработки металлических деталей. Часть 2. Исследование особенностей правки шлифовальных кругов. *Приволжский научный вестник*, 5 (57). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-osobennostey-nastroyki-shlifovalnyh-stankov-dlya-obrabotki-metallicheskih-detaley-chast-2-issledovanie-osobennostey>
7. Li, H. N., Axinte, D. (2016). Textured grinding wheels: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 109, 8–35. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.07.001>
8. Вайнер, Л. Г., Флусов, Н. И. (2013). Геометрическая модификация торцешлифовальных кругов в процессе правки. *Вестник Тихоокеанского государственного университета*, 17.
9. Вайнер, Л. (2019). Измерение и диагностика параметров торцешлифовальной обработки. *Вестник Тихоокеанского государственного университета*, 2, 35–42.
10. Kalchenko, V., Kalchenko, V., Kalchenko, O., Sira, N., Kalchenko, D., Morochko, V., Vynnyk, V. (2020). Development of a model of tool surface dressing

when grinding with crossed wheel and cylindrical part axes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (1 (105)), 23–29. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.202441>

11. Zhou, W. H., Yao, W. F., Feng, M., Lv, B. H., Deng, Q. F. (2013). The Polishing Process of Cylindrical Rollers by Using a Double-Side Lapping Machine. *Key Engineering Materials*, 589-590, 447–450. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.589-590.447>

12. Nguyen, D. N., Chau, N. L., Dao, T.-P., Prakash, C., Singh, S. (2019). Experimental study on polishing process of cylindrical roller bearings. *Measurement and Control*, 52 (9-10), 1272–1281. doi: <https://doi.org/10.1177/0020294019864395>

13. Kalchenko, V., Kalchenko, V., Sira, N., Yeroshenko, A., Kalchenko, D. (2020). Three-Dimensional Simulation of Machined, Tool Surfaces and Shaping Process with Two-Side Grinding of Cylindrical Parts Ends. *Advanced Manufacturing Processes*, 118–127. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_12

14. Kalchenko, V., Kalchenko, V., Kolohoida, A., Yeroshenko, A., Kalchenko, D. (2022). Building a model of dressing the working surfaces of wheels during the two-side grinding of round end faces at CNC machines. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (1 (115)), 86–93. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.252642>

For reading