

УДК 621.923

doi:10.20998/2413-4295.2022.02.04

## ВИБІР РЕЖИМІВ ЕФЕКТИВНОГО ШЛІФУВАННЯ ВАЛІВ ПРИ КЕРУВАННІ МІЖОСЬОВОЮ ВІДСТАННЮ ВЕРСТАТА

А. В. РУДИК<sup>1</sup>, В. А. РУДИК<sup>2</sup>

<sup>1</sup> державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації ОВТ, Чернігів, УКРАЇНА

<sup>2</sup> фірма ТАН, Чернігів, УКРАЇНА

\* e-mail: andrei.rudik@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Вали та інші відповідальні деталі сучасних автомобілів обмежені поверхнями обертання. Такі деталі звичайно мають ступінчасту форму. Кінцевою обробкою поверхонь валів є шліфування через жорсткі вимоги щодо якості та високу твердість. Процес потребує значних енергетичних витрат, які супроводжуються тепловими виділеннями. Використані переваги нових способів шліфування. Ефективне шліфування поверхонь обертання торцем абразивного інструмента конічної форми шляхом раціонального вибору режимних параметрів при керуванні міжосьовою відстанню верстата є кінцевою метою. Для досягнення мети визначена форма абразивного інструмента та обмеження режимів шліфування за рахунок кінематичних факторів; знайдені розміри наладки верстату та залежності кутів орієнтації верстатних ланок на підведення припуску при глибокому шліфуванні; проведений аналіз впливу відносного положення та розмірів області контакту між інструментом та деталлю. Матеріали теоретичних досліджень доводять можливість раціонального вибору режимів ефективного шліфування поверхонь обертання торцем круга конічної форми шляхом керування міжосьовою відстанню. Покращення якості обумовлене багатопрохідною обробкою зі слідами шорсткості у вигляді сітки; меншим впливом коливань та теплової напруженості. Глибине шліфування вирівнює навантаження вздовж профілю, ділянки якого працюють в майже однакових умовах. Продуктивність шліфування обумовлена раціональним вибором кінематики, збільшенням розмірів контакту та підведенням припуску. Система нерівностей дозволяє визначити технологічні режимні параметри при доведенні локального навантаження інструмента до рівня різальної здатності вздовж профілю. Знайдені залежності по керуванню кутом конусу деталі, зв'язують ширину та довжину області контакту. Зменшення кута конусу дозволяє визначити подачу на оберт, покращити якість та шорсткість, що викликана більшою кількістю проходів. Раціональні розміри області контакту дозволяють зменшити теплові навантаження та покращити умови охолодження деталі, працювати із меншою глибиною різання на прохід. Це призводить до малих витрат абразивного матеріалу.

**Ключові слова:** шліфування; ефективність; міжосьова відстань; керування; конус; режим; кут

## THE REGIME CHOICE WITH EFFECTIVE GRINDING BY THE WAY CONTROL INTER-AXIS DISTANCE MACHINE TOOLS

A. RUDYK<sup>1\*</sup>, V. RUDYK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Research Institute for Testing and Certification of Weapons and Military Equipment, Chernihiv, UKRAINE

<sup>2</sup> TAN company, Chernihiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The problem of effective grinding of rotating surfaces is to improve the quality and increase productivity, while reducing costs. The problem can be solved by controlling the distance  $H$  between of the rotation tool axes with the part on CNC machines and rational choosing of a shape tool. The purpose of the article is to increase the grinding efficiency of the rotation surfaces with the end face of the conical abrasive tool by rational choice of mode parameters when controlling the inter-axis distance machine tools. To achieve this goal, the following research objectives should be solved. Determine the modes of grinding by limiting the kinematic factors. To find the influence of the dependence of the angular spatial orientation of the contact line of the tool and the part on the angle of small taper of its formed fragment by choosing the dimensions of the machine adjustment. To analyze the influence of the relative position and size of the contact area depending on the kinematics and technical requirements for processing. For the first time, the kinematic constraints of the limit value of the projection of the speed of relative motion in the normal direction, which is used as the grinding intensity, taking into account the rotational and translational motions of the feed. The spatial angular position of the contact line of the tool with the part is determined taking into account the dimensions of the machine adjustment, namely, the wheelbase and the angle of the circle profile. The algorithm of definition of modes of deep grinding is established. The graphical dependences of the angles of orientation of the contact line on the angle of editing of the circle and the wheelbase of the machine are obtained. The dependences of the reduction of the radial dimensions of the conical surface of the part during grinding in the direction opposite to the axial feed of the wheel are described. The dimensions of the contact area determine the quality: the length along the axis of the part, the number of passes, and the width - the conditions of heat release and cooling.

**Keywords:** grinding; efficiency; inter-axis distance; control; taper; mode; angle

### Вступ

Проблемою ефективного шліфування поверхонь обертання – є покращення якості та підвищення продуктивності обробки, при

одночасному зниженні витрат [1,2]. Проблема може бути вирішеною за рахунок керування відстанню  $H$  між осями обертання інструмента з деталлю на верстатах з ЧПК та вибором інструмента раціональної форми.

Вали та інші відповідальні деталі сучасних автомобілів, у тому числі подвійного використання, обмежені поверхнями обертання та зазвичай мають ступінчасту форму. Вони можуть бути встановленими у робочому просторі більшості верстатів. До поверхонь валів надають жорсткі вимоги щодо точності та якості. Через високу твердість ці деталі погано піддаються обробці лезвийним інструментом. Тому, кінцевою обробкою, звичайно, є шліфування, яке потребує значно більших енергетичних витрат, які супроводжуються тепловими виділеннями.

Доведено [1,2], що енергетичні витрати процесу шліфування зростають при збільшенні діаметральних розмірів круга, вимог до точності та шорсткості обробки. При використанні шліфування інструментом з робочою поверхнею конічної форми виникає можливість керувати положенням лінії контакту (ЛК) при перерозподілі навантажень на ділянку профілю інструменту. Круг працює у режимі глибинного багатого прохідного шліфування, яке забезпечує значні розміри контакту та більше завантаження профілю. Обробку проводять за один робочий хід.

У роботі [3] доведено, що кутова орієнтація інструмента здатна підвищити продуктивність та якість обробки. За рахунок відносного положення можна обробляти різноманітні форми поверхні при простих відносних рухах.

У дослідженні [4] було запропоновано використовувати відносну кутову орієнтацію за рахунок зміни кута перехрещення. Наладка є складною, та потребує значних конструктивних змін. Дану задачу запропоновано вирішати для шліфування крупно габаритних валків з монотонною зміною геометрії. Кінцеві залежності для наладки верстату не отримані.

В роботі [5] для інтенсифікації режимів знаходження оптимальної кутової орієнтації запропоновано використовувати індикатриси інструменту та деталі. Ці характеристики не знайшли широкого використання.

Роботи [6,7] присвячені питанням моделювання процесів обробки, включаючи шліфування. Абразивний інструмент під час обробки втрачає правильну геометричну форму та розміри. Він потребує додаткової корекції відносного положення та виправлення форми.

Спеціалістами фірми Юнкер [8] створено оригінальне обладнання, інструмент та спосіб «Quickpoint» для шліфування валів периферією та торцем круга. Форму отримують захищеною точкою периферії інструмента з кутовою орієнтацією. Практикою доведено підвищення коефіцієнта шліфування, коли одиниця об'єму абразиву зрізує значний об'єм металу.

Використання способу потребує спеціального збалансованого інструмента значних діаметральних розмірів. Такий інструмент призводить до збільшення витрат електричної енергії. Значні

розміри контакту обмежені вздовж осі деталі. Це викликає інтенсивні теплові виділення та потребує значних витрат охолоджувальної рідини (можуть досягати до 200 л/хвилину).

Розроблені нові захищені патентами України способи шліфування за рахунок керування міжосьовою відстанню, яка призводить до зміни кута перехрещення [9]. Такі способи можуть бути використаними для обробки ступінчастих поверхонь обертання. Спосіб шліфування може бути реалізований на існуючому обладнанні при проведенні незначної модернізації.

Складена схема шліфування заправленим конічним торцем на верстаті з ЧПК мод.В3208Ф3 (рис. 1). Схема шліфування потребує забезпечення наступних відносних рухів: обертання інструмента  $\omega$  та деталі  $\omega_d$ , відносних поздовжньої  $S_0$ , поперечної  $S_R$  та вертикальної  $S_Y$  подач.

Кут профілю круга  $\alpha$  вимірюють між площиною обертання та дотичною. Таким чином, під час наладки верстату кут між осями обертання деталі та інструмент та встановлюють рівним  $\pi/2 - \alpha$ .

Вертикальна подача  $S_Y$  визначає зміну локальної ейлерової кривизни контакту. Нею можна керувати за рахунок відстані  $H$  між осями обертання.

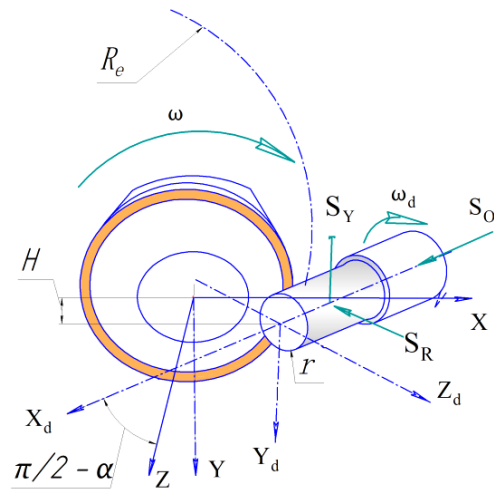


Рис. 1 – Схема шліфування торцем конічної форми при керуванні відстанню  $H$  між осями

Переваги нових способів порівняно до традиційних наведені на рис. 2.

Покращення якості (блок 1, рис. 2) забезпечується напрямком слідів шорсткості, збільшенням кількості проходів, отримання кінцевої якості лише однією захищеною ділянкою у околі базової точки в межах подачі на рядок. Під базовою точкою розуміють місце контакту номінальних поверхонь деталі та інструмента. За рахунок наближення радіусів кривизни у напрямку осьової подачі деталі можливо збільшити довжину контакту, а звідси кількість проходів.



Рис. 2 – Переваги нових способів

Шорсткість обробленої поверхні отримують зі слідами мікро-нерівностей у вигляді сітки (п. 1.2, рис. 2). Це пояснюється зміною напрямку швидкості різання по відношенню до осі деталі за часом проходження області контакту.

Динаміка процесу покращується (п. 1.3, рис. 2) за рахунок зменшення ваги круга через менші діаметральні розміри. Інструмент з робочим профілем конічної форми, кутовим розміром  $\alpha$  від площини обертання, має великі значення ейлеревих радіусів кривизни  $R_e$  для локального місця контакту. Робоча конічна поверхня торця чашкового круга на рис. 1 виділена заливкою.

Використання абразивного інструменту невеликого діаметру призводить до зменшення маси, збільшення частоти власних коливань. Зростання розмірів контакту при тих самих умовах викликає підвищення коефіцієнту демпфування, що сприяє зменшенню коливань. Самі коливання спрямовані під кутом до оброблюваної поверхні, це знижує їх вплив.

На відміну від обробки по методу Юнкер [5], для нового способу розміри області контакту мають значну протяжність вздовж осі деталі. Ширина контакту у площині обертання деталі незначна, що сприяє кращому охолодженню та знижує теплову напруженість.

Однак, вибір режимів обробки та залежності розмірів контакту, а саме ширини та довжини, у функції від розмірів наладки верстату не були раніше розглянутими в науковій літературі.

Для нових способів доведено [9], що розміри контакту в напрямках як обертання деталі, так і осьової подачі (Ейлереві перерізи) є значно більшими, а закон підведення припуску є більш раціональним.

Порівняємо локальні робочі навантаження для різних методів обробки.

Раціональне завантаження робочої поверхні інструмента [9] до рівня різальної здатності  $V_{n,max}$  (п. 2.2, рис. 1) викликане зміною характеру залежності проекції швидкості відносного руху на напрям нормалі.

Для поздовжнього шліфування (лінія 1 на рис. 3) показано стрімке зростання нормальної швидкості при збільшенні розмірів контакту. Це обумовлює підвищене зношення інструменту для чорнових режимів. В області контакту з'являється лише крайня найбільш навантажена вузька смужка (при  $V_n < V_{n,max}^0 \approx 10$  мм/с). Граничне значення проекції швидкості відносної подачі на напрям нормалі [10].

Для способу «Quickpoint» навантаження лишаються практично не змінними (лінія 2).

Нові способи (лінія 3 на рис. 3) забезпечують високе значення коефіцієнта шліфування [9]. При наближенні до границі контакту відбувається зменшення навантаження для раціонального значення добутку нормальної швидкості.

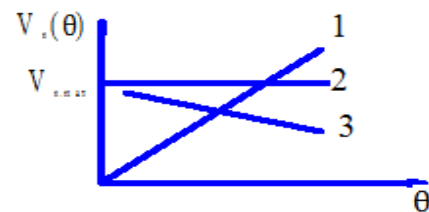


Рис. 3 – Інтенсивність підведення припуску  $V_n$ :  
1 – поздовжнє шліфування, 2 – метод «Quick point»,  
3 – торцем конічного круга

Кут  $\theta$  вимірюють в площині обертання круга між дотичною до лінії контакту та радіальним напрямком. Вибір параметрів наладки верстату є багатоваріантною поки не вирішеною задачею. Точність отримання діаметральних розмірів забезпечують як вибором верстату, так і інструменту.

Рівняння для нормальної відносної швидкості  $V_n$  було отримано у явному функціональному вигляді при врахуванні зміни відстані між осями. Проведений аналіз навантажень вздовж профілю інструмента доводить раціональний характер зміни  $V_n$ .

У роботі [10] був запропонований локальний показник інтенсивності шліфування проекція швидкості  $V_n$  відносного руху подачі на нормаль замість інтегрального показника питомої продуктивності. Доведено, що локальний показник нормальної відносної швидкості  $V_n$  можна вважати більш зручним для оцінки інтенсивності процесу шліфування. Він має чіткий змістовний сенс, пов'язаний з товщиною зрізу. Цей показник враховує усі кінематичні складові. Використання швидкості подачі відносного руху у якості показника інтенсивності дозволяє розрізнити попутну від зустрічної обробки та враховувати вплив осьової подачі, чим звичайно нехтують.

Як відомо [10], підвищення продуктивності (блок 2 на рис. 2) чорнового шліфування визначають об'ємом  $Q$  знятого матеріалу, тобто збільшенням розмірів площі контакту  $F$  та швидкістю  $V_n$

відносного руху у напрямку нормалі  $\mathbf{n}$  на кожній локальній ділянці  $dF$ :  $Q = \iint_F V_n \cdot dF$ .

Для чистового багато-прохідного шліфування кут між круговою  $S_w = \omega_d \cdot r$  та поздовжньою  $S_0 = \omega_d \cdot p$  подачами близький до прямого, де  $\omega_d$  – кутова швидкість обертання деталі;  $p$  – параметр гвинтового руху поздовжньої подачі.

Довжина ЛК є значно більшою від подачі на оберт,  $S_0 = 2\pi \cdot p$ .

Продуктивність чистового шліфування  $Q_f$  визначають обробленою площею за одиницю часу, або добутком подач:

$$Q_f = S_0 \cdot S_w = \omega_d^2 \cdot p \cdot r. \quad (1)$$

Тобто продуктивність чистового шліфування пропорційна квадрату кутової швидкості обертання заготовки та гвинтового параметру поздовжнього руху.

Доведено [8,10], що подібну залежність має стійкість абразивного інструмента.

Зниження витрат (блок 3 на рис. 2) на електричну енергію та інструмент пояснюється зменшенням діаметральних розмірів та часу обробки. Підвищення коефіцієнта шліфування [8], яке на думку авторів, викликане зменшенням показника  $V_n < V_{n,max}$ , призводить до зниження витрат абразивного матеріалу. Зменшення машинного часу викликане збільшенням осьової хвилинної подачі та зниженням кількості потрібних проходів до одного при скороченні довжини холостого ходу. Знижуються накладні витрати при зменшенні розмірів верстату.

Задача вибору розмірів наладки, згідно літературних джерел, поки є багатоваріантною остаточно невизначеною, без єдиного алгоритму знаходження режимних параметрів. Огляд публікацій не дозволяє здійснити наладку верстатів, використовуючи переваги нових способів шліфування.

Основними питаннями є обґрунтування:

1) на які технологічні показники ефективності обробки впливають форма, ширина та довжина області контакту, кут профілю конічної робочої поверхні інструмента; 2) як впливають відстань між осями обертання інструмента та деталі шліфувального верстата та співвідношення між швидкостями рухів подач на вибір режимних параметрів.

### Мета роботи

Мета дослідження полягає у підвищенні ефективності шліфування поверхонь обертання торцем абразивного інструмента конічної форми шляхом раціонального вибору режимних параметрів при керуванні міжосьовою відстанню верстата.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі задачі.

Задача 1. Визначити обмеження режимів шліфування за рахунок кінематичних факторів,

Задача 2. Вибором розмірів наладки слід знайти залежності кутів орієнтації ЛК  $\theta(\alpha, H)$ ;  $\chi(\alpha, H)$  на кут конусу, що відповідає за підведення припуску при глибинному шліфуванні для утвореного фрагменту деталі  $\varphi(\alpha, H)$ .

Задача 3. Провести аналіз впливу відносного положення та розмірів області контакту на показники ефективності шліфування.

### Виклад основного матеріалу

1. Покажемо взаємний зв'язок між подачею на оберт та глибиною різання для кута  $\varphi$ , який характеризує конус для рівномірного підведення припуску на поверхні деталі.

Інтенсивність підведення припуску  $V_n$  для глибинного шліфування, в тому числі для нового способу, визначають проекцією швидкості відносного руху подачі на напрям нормалі до поверхні деталі.

Із урахуванням кругової та поздовжньої подач [10], як складових рухів:

$$V_{n,max} = n_d \cdot \left[ 2\pi \sqrt{2r \cdot (t_0 + p \cdot \varphi) \cdot \left(1 + \frac{r}{R_e}\right)} + (t_0 + p \cdot \varphi) \right]$$

Враховуючи співвідношення між діаметрами деталі та ейлеревим робочої конічної поверхні круга  $d \ll De$  (рис.1), вираз (2) можна спростити. Нехтуючи малим впливом на проекцію  $V_n$ , отримують:

$$V_{n,max} \approx n_d \cdot \left[ 2\pi \sqrt{r \cdot (t_0 + p \cdot \varphi)} + (t_0 + p \cdot \varphi) \right] \leq V_{n,max}^0 \quad (2)$$

де  $t_0$  – глибина різання на оберт (прохід), враховує підведення припуску у площині обертання деталі за час оберту за рахунок кругової та поздовжньої подач. Доданок  $r\varphi$  враховує додаткову глибину поступального гвинтового руху.

Кут  $\varphi$  забезпечує рівномірне підведення припуску до ділянок профілю інструмента. Цей конус здійснює перерозподіл теплових та силових навантажень [9]. Його знаходження показано нижче.

Кінематичну умову (2) слід розглядати сумісно з рівнянням (1) досягнення максимуму продуктивності чистового шліфування. Умова максимуму кутової швидкості  $\omega_d \rightarrow \max$  є раціональною: вона визначає продуктивність (1) та стійкість інструмента, як було доведено [8,10].

Кут  $\varphi$  нахилу ділянки профілю деталі (рис.4) до осі обертання знаходять, використовуючи вектор  $\vec{r}_{oi}$ .

Функція формоутворення [9] визначає форму, положення та радіальні розміри ЛК для фрагмента в

СК деталі. Рівняння ЛК зв'язує між собою параметри конічної поверхні інструмента  $\theta(\rho)$ . Дане рівняння може бути представленим у вигляді залежності  $\theta(H, \alpha, \rho, z)$

$$r_{di}(\rho, \theta(\rho)) = \begin{bmatrix} X_{di} \\ Y_{di} \\ Z_{di} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_0 - \rho \cdot \sin^2 \alpha + R(\rho) \cdot \cos \theta(\rho) \cdot \cos \alpha \\ R(\rho) \cdot \sin \theta(\rho) + H \\ Z + R(\rho) \cdot \cos \theta(\rho) \cdot \sin \alpha + \rho \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де  $\theta(\rho)$  – значення кутового параметра точки ЛК робочої поверхні круга конічної форми, що відповідає заданому радіальному параметру  $\rho$ ; кутовий параметр  $\theta$  вимірюють в межах ширини контакту в площині обертання круга від положення осі X:

$$\frac{r}{R_e} \cdot \varphi; \quad (4)$$

де  $\rho$  – лінійний параметр, спрямований вздовж твірної конічної поверхні заправленого круга, в напрямку від найбільшого радіуса периферії  $R_{max}$ ;  $2\pi\rho$  – крок гвинтового руху поздовжньої подачі;  $H$  – відстань між осями обертання,  $\alpha$  – кутова орієнтація інструмента, встановленого на верстаті, який в такому положенні, проходить правку (рис. 1);  $R_{max}$  – максимальний радіальний розмір круга;  $z$  – відстань від базової точки ЛК до осі деталі, характеризує діаметральний розмір (рис. 1 та рис. 4).

Вектор  $D_E(\rho)$ , дотичний до характеристики E у деякій (базовій) точці, знаходять диференціюванням ФФ за радіальним параметром  $\rho$ :

$$D_E(\rho) = \frac{\partial r_{di}(\rho, \theta(\rho))}{\partial \rho} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cdot \cos \alpha - tg \chi \cdot \sin \theta \\ tg \chi \cdot \cos \theta + \sin \theta \cdot \cos \alpha \\ -\sin \alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

де  $tg \chi = \theta' \cdot R$  - тангенс кута повороту ЛК при зміні відстані  $H$  між осями обертання. Кут  $\chi$  вимірюють на конічній поверхні круга між радіальним напрямком та дотичною до ЛК.

Саме керування міжосьовою відстанню  $H$  призводить до повороту ЛК (змінює кут  $\chi$ ), а тому й радіус кривизни інструмента.

Довжину вектора  $D_E(\rho)$  дотичної знаходять:

$$|D_E(\rho)| = \sqrt{1 + (\theta' \cdot R)^2} = \sqrt{1 + tg^2 \chi} = \frac{1}{\cos \chi} \quad (6)$$

Отже, сумісно вирішуючи рівняння (4-6), отримують кут конусу ділянки профілю, який залежить від розмірів наладки верстату

$$\cos \varphi(H, \alpha) = \cos \alpha \cdot \cos \theta(H, \alpha) \cdot \cos \chi(H, \alpha) - \sin \theta(H, \alpha) \sin \chi(H, \alpha) \quad (7)$$

$$\text{де } \cos \chi = \frac{1}{\sqrt{(\theta' \cdot R)^2 + 1}}, \quad \sin \chi = \frac{\theta' \cdot R}{\sqrt{(\theta' \cdot R)^2 + 1}}, \quad \theta'_{\rho} =$$

$d\theta/d\rho$  - відношення приросту кута  $d\theta$  до малої зміни радіального положення  $d\rho$  для точок ЛК.

Косинус кута  $\varphi$  визначають через скалярний добуток ортів дотичної до характеристики  $D_E$  та спрямованого вздовж осі деталі  $i$  (рис. 4):

$$\cos \varphi(H) = \frac{\overline{D_E \cdot i}}{|D_E|}. \quad (8)$$

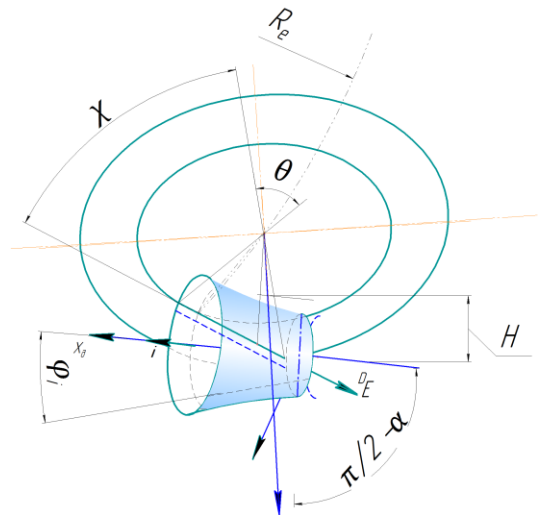


Рис. 4 – Визначення утвореного конусу  $\varphi$  фрагменту профілю деталі

## 2. Керування кутом забірною конусу $\varphi$ .

Розрахунки ЛК довели, що кут  $\varphi$  визначають через загальний припуск  $t_{\Sigma}$  та проекцію довжини області контакту на ось деталі  $L_K$ :

$$\varphi = \frac{t_{\Sigma}}{L_K} \quad (9)$$

Кут  $\varphi$  конусу фрагмента деталі знаходять через відношення за час одного оберту глибини  $t_0$  (рис.6) та подачі  $S_0$  [11]:

$$\varphi \approx tg \varphi = \frac{t_0}{0} = \frac{t_0}{2\pi \cdot p} \quad (10)$$

Кути  $\theta(\alpha, H)$ ,  $\chi(H, \alpha) = arctg(\theta' \cdot R)$  та  $\varphi(\alpha, H)$  (рис.4) залежать від однієї функції  $C(\alpha, H)$  та можуть бути через ті ж самі коефіцієнти регресії вираженими спрощеними залежностями [9].



**Обговорення результатів**

Отримані графічні залежності орієнтації лінії контакту (рис. 5) залежно від кута правки та міжосьової відстані: для площини обертання  $\theta(\alpha, H)$ , між лінією контакту та радіальним напрямком  $\chi(\alpha, H)$ , відносно осі обертання деталі  $\varphi(\alpha, H)$ . Графіки  $\theta(\alpha, H)$ ;  $\chi(\alpha, H)$ ;  $\varphi(\alpha, H)$  доводять, що данні розміри впливають немонотонно. Тому доцільно, з точки зору аналізу, умовно поділити область визначення на чотири частини.

При зростанні залежності  $\theta(\alpha, H)$ ;  $\chi(\alpha, H)$  зменшуються, а  $\varphi(\alpha, H)$  – зростає. Кут  $\alpha$  впливає неоднозначно.

Згідно із графіком (рис.5,в) кут  $\varphi$  зростає зі збільшенням значення міжосьової відстані  $H$  та кута  $\alpha$  профілю інструмента. Це призведе до укорочення довжини контакту, локалізації навантажень та підвищення температури, в тому числі через умови охолодження деталі.

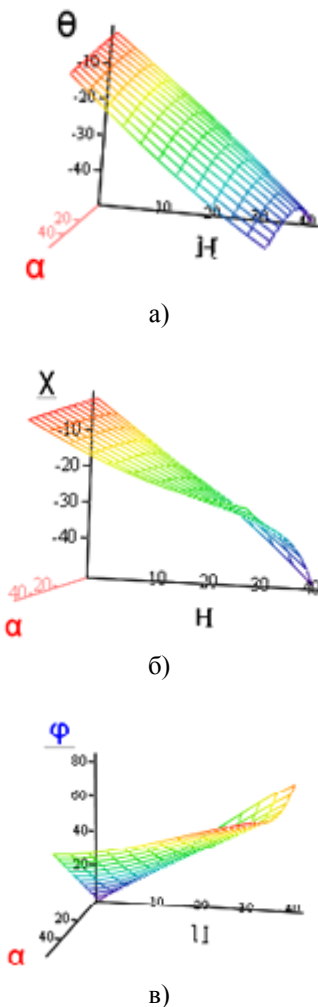


Рис. 5 – Графічні залежності зміни кутів у функції від розмірів наладки а)  $\theta(\alpha, H)$ ; б)  $\chi(\alpha, H)$ ; в)  $\varphi(\alpha, H)$

Графіки можуть бути лише частково реалізованими через зв'язок між обертанням деталі та осьовою подачею, реальним значенням кута профілю круга, шириною конічного пояса інструмента.

3. Проведемо аналіз впливу відносного положення та розмірів області контакту.

Радіальні розміри деталі у деякій точці ЛК визначають, враховуючи відстань між осями  $H$  та від базової точки до положення осі деталі:

$$R_d(H, z) = \sqrt{Y_{di}^2 + Z_{di}^2}. \quad (11)$$

Профіль ділянки згідно (7) визначають за радіальними  $R_d$  та осьовими  $X_d$  координатами. Зміщуючи на відстань осьового кроку отриманий профіль у напрямку подачі, знаходять припуск (рис. 6). Радіальним розміром деталі при обробці можна керувати (7) відстанню  $z$  до її осі від поверхні круга, або між осями  $H$ .

Довжина області контакту повинна знаходитись в межах ширини конічного пояса інструмента  $L_k < B / \cos \chi$ . На рис.1 (конічний поясок виділений заливкою).

При ширині робочої поверхні торця круга 5 мм та деякій відстані  $H$  між осями, довжина ЛК може значно перебільшувати цей розмір.

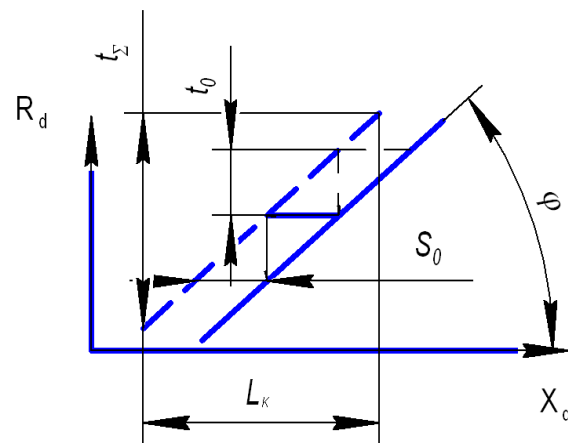


Рис. 6 – Зміна послідовних положень лінії контакту відносно перерізу деталі (а) та динаміка по проходах (обертах)

Кількість обертів (проходів) інструмента над деякою точкою деталі, визначає шорсткість обробленої поверхні. Враховуючи співвідношення між довжиною ЛК та подачею на оберт отримують:

$$K = n_d \cdot \tau \approx n \cdot \frac{L_k}{S_0}, \quad (12)$$

де  $\tau$  - час проходження довжини контакту ЛК.

У межах останньої формотворної ділянки деталь повинна здійснити декілька обертів (проходів) для покращення шорсткості. Це залежить від кута  $\varphi$  на деталі, який визначає силове (рис. 3,4) та теплове навантаження через ширину області контакту та умови охолодження. Малі значення кута  $\varphi$  дозволяють знизити температуру, через покращення охолодження та меншу локалізацію навантажень в області формотворної точки деталі.

Ступінчатий профіль деталі отримують комбінацією подач: радіальної, при обробці торця, та поздовжньої для циліндричної ступені. Якість торців ступенів, як і під час шліфування тарілчастими кругами, виходить краще, без припалів, порівняно із обробкою торцем круга.

### Висновки

Матеріали теоретичних досліджень доводять можливість раціонального вибору режимів ефективного шліфування поверхонь обертання торцем круга конічної форми з кутом  $\alpha$ . шляхом керування міжосьовою відстанню  $H$ .

Покращення якості обумовлене багато-прохідною обробкою. зі слідами шорсткості у вигляді сітки; меншим впливом коливань та теплової напруженості. Продуктивність шліфування обумовлена збільшенням розмірів контакту та раціональним підведенням припуску.

Задачі методики досягнуті.

Система нерівностей (1, 2) дозволяє визначити технологічні режимні параметри при доведенні локального навантаження інструмента до рівня різальної здатності вздовж усього профілю.

2. Знайдені залежності по керуванню кутом  $\varphi$  конусу фрагмента деталі, зв'язують розміри інструмента, ширину та довжину області контакту.

3. Зменшення кута конусу  $\varphi$  дозволяє визначити подачу на оберт, покращити якість через зменшення шорсткості, яка викликана більшою кількістю проходів.

Раціональні розміри області контакту дозволяють зменшити теплові навантаження та покращити умови охолодження деталі. Доцільніше працювати із меншою глибиною різання на прохід.

Рівномірне глибинне шліфування вирівнює навантаження вздовж усього профілю: всі точки працюють у однакових умовах ефективного шліфування. Це може забезпечити значну продуктивність шліфування, малі витрати абразивного матеріалу.

Методика не накладає значних обмежень по використанню. Тому загальні вирази та положення можуть бути прийнятними для інших способів обробки. Перспективним напрямком є дослідження інструмента іншої форми профілю.

### Список літератури

1. Sareh S. C., Esmaceli M. J., Mayer R. R. CNC table based compensation of inter-axis and line an axis scale gain errors for a five-axis machine tool from symbolic variation kinematics. *CIRP Annals*. Vol. 70. Iss. 1. 2021. P. 439–442. doi: 10.1016/j.cirp.2021.04.042.
2. Aurich I. C., Biermann A. D., Blum E. H. Modeling and simulation of process machine iteration in grinding. *Production Engineering Research and Development*. 2017. P. 111–120. doi: 10.1007/s11740-008-0137-x.
3. Okhrimenko O., Vovk V., Maidaniuk S., Lashyna Y. (2021). Determining the width of a layer cut with saws with multidirectional teeth. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 3(1 (111)). P. 14–20. doi: 10.15587/1729-4061.2021.231779.
4. Kalchenko V., Yeroshenko A., Boyko S., Sira N. Determination of cutting forces in grinding with crossed axes of tool and workpiece. *Actamechanica et automatica*. 2017. Vol. 11 (1). P. 58–63. doi: 10.1515/ama-2017-0009.
5. Radzevich S. *Gear Cutting Tools: Fundamentals of Design and Computation*. 2010. P. 115–135. doi: 10.1201/9781439819685.
6. Boess V., Chatti S., Laperrière L., Reinhart G., Tolio T. Geometric Modeling of Machining. *The International Academy for Production (eds) CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2018. doi: 10.1007/978-3-642-35950-7\_6696-4.
7. Chen M., Li X., Yang, P. Study on surface grinding hardening of SKD11 hardened steel. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*. 2007. 12(1). P. 236–245. doi: 10.1504/IJMTM.2007.014152.
8. Quickpoint. All in one fix. Prosp. «Junkermaschinen» company on machines «Quickpoint 1000», «Quickpoint3000», «Quickpoint 4000». ErwinJunker: MaschinenfabricGmbH, Junkerstraße 2. Postfach 25. D 77787. Nordrash, Germany. 2003. URL: <https://www.junker-group.com/ru/shlifovalnye-stanki/products/quickpoint/>
9. Рудик А. В., Рудик В. А. Формоутворення поверхонь обертання торцем круга чашкової форми. *Вісник Херсонського національного технічного університету: Збірник*. – Херсон: ХНТУ. 2016. № 1(56). С. 77–83.
10. Rudyk A. V., Chupryna V. M., Pasov G. V., Venzhega V. I. Methods for determining the efficiency of the grinding process. *Науковий вісник НГУ*. 2020. № 5 (179). P. 95–101. doi: 10.33271/nvngu/2020-5/095.
11. Denkena B., Tönshoff H. K. Modeling and simulation. Basics of Cutting and Abrasive processes. *Lecture notes in production engineering*. Springer-Verlag Berlin. 2018.

### References (transliterated)

1. Sareh S.C., Esmaceli M. J., Mayer R. R. CNC table based compensation of inter-axis and line an axis scale gain errors for a five-axis machine tool from symbolic variation kinematics. *CIRP Annals*, 2021, Vol. 70, Iss. 1, pp. 439-442, doi: 10.1016/j.cirp.2021.04.042.
2. Aurich I. C., Biermann A. D., Blum E. H. Modeling and simulation of process machine iteration in grinding. *Production Engineering Research and Development*, 2017, pp. 111–120, doi: 10.1007/s11740-008-0137-x.

3. Okhrimenko O., Vovk V., Maidaniuk S., Lashyna Y. Determining the width of a layer cut with saws with multidirectional teeth. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, 3(1 (111)), pp. 14–20, doi: 10.15587/1729-4061.2021.231779.
4. Kalchenko V., Yeroshenko A., Boyko S., Sira N. Determination of cutting forces in grinding with crossed axes of tool and workpiece. *Actamechanica et automatica*, 2017, 11 (1), pp. 58–63, doi: 10.1515/ama-2017-0009.
5. Radzevich S. *Gear Cutting Tools: Fundamentals of Design and Computation*, 2010, pp. 115–135, doi: 10.1201/9781439819685.
6. Boess V., Chatti S., Laperrière L., Reinhart G., Tolio T. Geometric Modeling of Machining. *The International Academy for Production (eds) CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2018, doi: 10.1007/978-3-642-35950-7\_6696-4.
7. Chen M., Li X., Yang, P. Study on surface grinding hardening of SKD11 hardened steel. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 2007, Vol. 12, pp. 236–245, doi: 10.1504/IJMTM.2007.014152.
8. Quickpoint. All in one fix: [Prosp. «Junkermaschinen» company on machines «Quickpoint 1000», «Quickpoint3000», «Quickpoint 4000»] ErwinJunker: MaschinenfabricGmbH, Junkerstraße 2. Postfach 25. D 77787. Nordrash, Germany, Available at: <https://www.junker-group.com/ru/shlifovalnye-stanki/products/quickpoint/>
9. Rudyk A. V., Rudyk V. A. Formoutvorennya poverkhon' obertannya tortsem kruha chashkovoyi formy [Forming of surfaces of rotation by the end of a cup-shaped circle]. *Visnyk Khersons'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu: Zbirnyk. – Kherson: KHNTU*, 2016, no. 1(56), pp. 77–83.
10. Rudyk A. V., Chupryna V. M., Pasov G. V., Venzhega V. I. Methods for determining the efficiency of the grinding process. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2020, no. 5 (179), pp. 95–101, doi: 10.33271/nvngu/2020-5/095.
11. Denkena B., Tönshoff H. K. Modeling and simulation. Basics of Cutting and Abrasive processes. *Lecture notes in production engineering*. Springer-Verlag Berlin, 2018.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Рудик Андрій Васильович** – кандидат технічних наук, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, старший науковий співробітник; м. Чернігів, Україна; ORCID: 0000-0002-3582-9279; e-mail: andrei.rudik@gmail.com.

**Rudyk Andrei** – Ph. D., Research Institute for Testing and Certification of Weapons and Military Equipment, Chernihiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-3582-9279; e-mail: andrei.rudik@gmail.com.

**Рудик Владислав Андрійович** – науковий співробітник, фірма ТАН, інженер, м. Чернігів, Україна; ORCID: 0000-0001-6233-4872 e-mail: Var\_911-91@mail.ru.

**Rudyk Vladislav** – TAN company, researcher, engineer, Chernihiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6233-4872 e-mail: Var\_911-91@mail.ru

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

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

*Please cite this article as:*

Rudyk A., Rudyk V. The regime choice with effective grinding by the way control inter-axis distance machine tools. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 2 (12), pp. 25–32, doi:10.20998/2413-4295.2022.02.04.

*Надійшла (received) 02.06.2022*