

**А.В. Рудик**, канд. техн. наук

**В.І. Венжега**, канд. техн. наук

**В.А. Рудик**, магістр

Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

### **ПРОДУКТИВНІСТЬ ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ПОЗДОВЖНЬОГО ГЛУБИННОГО ШЛІФУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ ОБЕРТАННЯ ПЕРИФЕРІСЮ ТА ТОРЦЕМ ОРІЄНТОВАНОГО АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ**

**А.В. Рудик**, канд. техн. наук

**В.І. Венжега**, канд. техн. наук

**В.А. Рудик**, магістр

Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

### **ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО ПРОДОЛЬНОГО ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ ПЕРИФЕРИЕЙ И ТОРЦОМ ОРИЕНТИРОВАННОГО АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА**

**Andrii Rudyk**, PhD in Technical Sciences

**Volodymyr Venzheha**, PhD in Technical Sciences

**Vladyslav Rudyk**, master

Chernihiv National University of Technology, Chernihiv, Ukraine

### **THE PRODUCTIVITY OF HIGHLY EFFECTIVE LONGITUDINAL DEEP GRINDING OF ROTATION SURFACES BY SIDE OF THE TOOL AND BY BUTT END OF THE TURNED ABRASIVE INSTRUMENT**

*Збільшення продуктивності поздовжнього круглого шліфування можна досягти за рахунок включення торцевої ділянки орієнтованого абразивного інструменту у процес зняття припуску, що створює певні переваги: перерозподіл функцій ділянок вздовж профілю, збільшення стійкості інструменту, покращення точності оброблення. В роботі для знаходження швидкості підведення припуску по ділянках поверхні абразивного інструменту запропоновано методу, коли скалярний добуток векторів нормалі та швидкості відносного руху вирішують у системі координат деталі. Для цього використано рівняння орта нормалі та функцію формоутворення оброблення, з якої диференціюванням знаходять швидкість відносного руху.*

**Ключові слова:** глибине шліфування, продуктивність шліфування, орієнтований абразивний інструмент.

*Увеличение производительности продольного круглого шлифования можно достичь за счет включения торцевого участка ориентированного абразивного инструмента в процесс снятия припуска, что создает ряд преимуществ: перераспределение функций участков вдоль профиля, увеличение стойкости инструмента, улучшение точности обработки. В работе для нахождения скорости подведения припуска по участкам поверхности абразивного инструмента предложена методика, когда скалярное произведение векторов нормали и скорости относительного движения решают в системе координат детали. Для этого использовано уравнение орта нормали и функцию формообразования обработки, с которой дифференцированием находят скорость относительного движения.*

**Ключевые слова:** глубинное шлифование, производительность шлифования, ориентированный абразивный инструмент.

*The productivity increase of longitudinal deep grinding can be achieved at the expense of usage butt end area of the turned abrasive instrument in the process of getting down the allowance that provides a number of advantages: redistribution area's functions along the profile, increase of tool durability, improve of processing accuracy. This work suggests the method when scalar product of normal vectors and the speed of movement are calculated in the detail's coordinate system in order to find the speed of supplying the allowance on the areas of the abrasive instrument surface. For this purpose are used unit normal vector equation and the shape formation function of processing from which the speed of relative motion is calculated by differentiation.*

**Key words:** deep grinding, grinding productivity, turned abrasive instruments.

**Постановка проблеми.** Максимальна продуктивність, яка забезпечує потрібну точність та якість оброблення, є інтегральним показником процесу шліфування різноманітних поверхонь. Традиційно при поздовжньому шліфуванні весь припуск підводиться до периферійної ділянки – чим більший припуск, тим більший розмір плями контакту. Продуктивність оброблення безпосередньо пов'язана з інтенсивністю підведення металу і визначає навантаження на робочу поверхню абразивного інструменту, знос його профілю, потужність, яка витрачається на процес різання, і теплову напруженість. Збільшення продуктив-

ності оброблення можна досягти за рахунок включення торцевої ділянки у процес зняття припуску, коли значно зростають розміри плями контакту при майже постійному значенні вектора швидкості відносного руху  $V_n$  на торці. Такий підхід приводить до появи певних переваг, серед яких: перерозподіл функцій ділянок вздовж профілю, коли деякі з них зрізують чорновий припуск, інші – виконують фінішне формоутворення; значне, майже на порядок, зменшення зношення круга при підвищенні продуктивності оброблення, бо припуск до торця підводиться майже рівномірно; покращення динаміки та точності оброблення. Тому потребують уточнення та доповнення наявні моделі процесу продуктивності шліфування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одним з найбільш перспективних напрямків підвищення продуктивності поздовжнього шліфування та розширення технологічних можливостей є підвищення швидкості різання, що задається окружною швидкістю круга. Відомо [1; 2], що збільшення швидкості різання (наприклад, у 1,5–2 рази) приводить до істотної зміни вихідних параметрів процесу шліфування та, відповідно, впливає на його ефективність. Іншим напрямом підвищення продуктивності є глибинне шліфування. Під час механічного оброблення матеріалів розрізняють продуктивності зняття припуску і формоутворення [3], за положенням у межах контакту говорять про питому і середню продуктивність, за тривалістю дії розрізняють миттєву і середню тощо.

Продуктивність зростає зі збільшенням скалярного добутку  $V_n(\rho, \theta)$  – вектора швидкості відносного руху інструменту на вектор нормалі до його поверхні, який виражає інтенсивність підведення металу до різних ділянок у межах контакту. Зняття припуску із заготовки відбувається при позитивному значенні скалярного добутку  $\vec{V}_1 \cdot \vec{n}_i > 0$ , а формоутворення поверхні деталі за умови  $\vec{V}_1 \cdot \vec{n}_i = 0$ .

Метод оброблення, коли інструмент працює в режимі швидкісного глибинного шліфування, був запропонований спеціалістами фірми «Junker Maschinen» для системи QUICKPOINT (Німеччина) (рис. 1). Однак параметри режимів та зрізу у проспектах детально не наводяться.

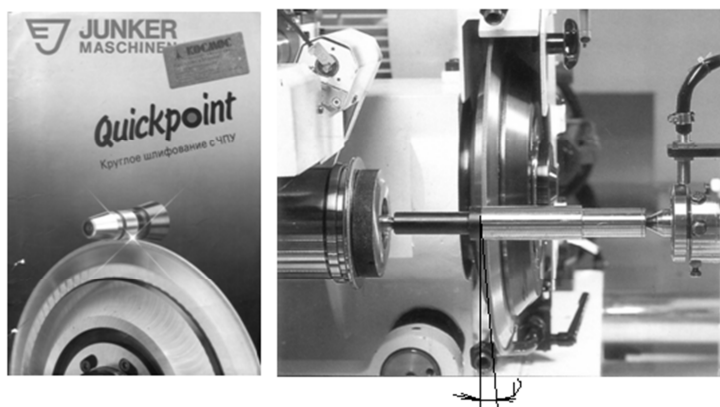


Рис. 1. Обкладинка проспекту фірми «Junker Maschinen»

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Розробленню математичних моделей продуктивності шліфування присвячено багато наукових праць А.І. Грабченка, В.І. Кальченка, В.В. Кальченка [4; 5].

Схема формоутворення, яка заснована на поєднанні обертань шліфувального круга і деталі навколо осей, що перехрещуються, є найбільш загальною, що включає всі інші схеми, як окремі випадки. Для аналізу процесу шліфування торців циліндричних деталей орієнтованим кругом, як окремого випадку шліфування із перехрещеними осями, ними запропонована розрахунково-кінематична схема і рівняння для визначення миттєвої продуктивності оброблення. На основі загальних схем формоутворюючих систем верстатів

для шліфування різних поверхонь із перехрещеними осями круга і деталей розроблена загальна модель знімання припуску і формоутворення, яка має вигляд

$$Q = \sum_{n=1}^m \frac{1}{T} \cdot \int_{i_1}^{i_2} \left( \int_{\theta_{1ki}}^{\theta_{2ki}} \vec{V}_{in} \cdot \vec{n}_{in} \cdot (R_i - I_{in} \cdot \sin \alpha_{in}) \left[ 1 - \exp \left( -\frac{\sum b(t, \theta)}{b_0} \right) \right] \cdot d\theta_k \right) \cdot \sqrt{\left( \frac{dR_{in}}{di} \right)^2 + \left( \frac{dz_{in}}{di} \right)^2} \cdot di \cdot dT_n,$$

де  $m$  – кількість одночасно оброблюваних деталей;  $T$  – час контакту  $n$ -ої деталі з кругом;  $i_1, i_2$  – граничні значення параметра  $i$  осевого перерізу круга в зоні контакту;

$\theta_{2ki}, \theta_{1ki}$  – кутові координати плями контакту на радіусі  $R_i$ ;  $1 - \exp \left( -\frac{\sum b(t, \theta)}{b_0} \right)$  – ймовірність видалення матеріалу заготовки.

Однак запропонована математична модель продуктивності шліфування є загальною та складною і потребує уточнення. Відомі результати робіт [6; 7; 8], де автори спільно працювали над удосконаленням методики визначення продуктивності. В цій роботі результати доповнено.

**Мета статті.** Метою цієї статті є проведення аналізу сучасних методів шліфування поверхонь деталей на предмет виявлення резервів підвищення продуктивності та покращення якості оброблення як для відомих, так і для нових запропонованих способів, а також розроблення методики розрахунку завантаження ділянок орієнтованого інструменту при поздовжньому шліфуванні з перехрещеними осями інструменту та деталі.

**Виклад основного матеріалу.** Для знаходження швидкості підведення припуску по ділянках поверхні абразивного інструменту використаємо скалярний добуток векторів нормалі та швидкості відносного руху, який розглянемо в системі координат деталі. Застосуємо рівняння орта нормалі та функцію формоутворення оброблення, з якої диференціюванням знайдемо швидкість відносного руху.

Як відомо [3; 4], функція формоутворення шліфувальним кругом може бути умовно представлена рівнянням

$$\vec{r}_0(\rho, \theta, \phi) = \prod_{i=1}^l A_{i-1,i}^{j_i} \cdot \vec{r}(\rho, \theta), \quad (1)$$

де  $\vec{r}_0(\rho, \theta, \phi)$  – радіус-вектор точок поверхні круга;

$\rho, \theta$  – криволінійні координати цієї поверхні;

$l$  – кількість ланок формотворної системи.

Орт нормалі до ділянки профілю круга у проекціях на осі визначають через векторний добуток часткових похідних. Після спрощень

$$\vec{n}(\rho, \theta) = [\cos \theta \cdot \sin \alpha \cdot \sin \theta \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha]^T, \quad (2)$$

де  $\alpha$  – кут, який визначає поворот проти годинникової стрілки осі інструменту до положення нахилу вектора нормалі до ділянки інструменту, який спрямований у його тіло.

Перенос нормалі до системи координат деталі виконують згідно з формоутворюючим кодом під час використання можливих спрощень для невільних векторів [1].

Вектор відносної швидкості у системі координат заготовки знаходять диференціюванням рівняння (1), отже:

$$\vec{V}_{oi}(\rho, \theta, \phi) = \frac{\partial \vec{r}_0(\rho, \theta, \phi)}{\partial t} = \frac{\partial \vec{r}_0(\rho, \theta, \phi)}{\partial \phi} \cdot \frac{d\phi}{dt}, \quad (3)$$

де  $\frac{d\phi}{dt}$  – кутова чи лінійна швидкість;

$\varphi(t)$  – змінна за часом координата, що відповідає відносному положенню деталі щодо круга. Через незначну зміну за часом положення плями контакту на поверхні круга можна вважати  $\varphi = const$ , або  $\varphi = 0$ .

Кінематика оброблення (рис. 2) включає три основні рухи: обертання круга і деталі, відносно поздовжню подачу. Обертання інструмента можна не враховувати, бо цей рух не приводить до відносної зміни положення верстатних ланок – поверхня круга «ковзає сама по собі».

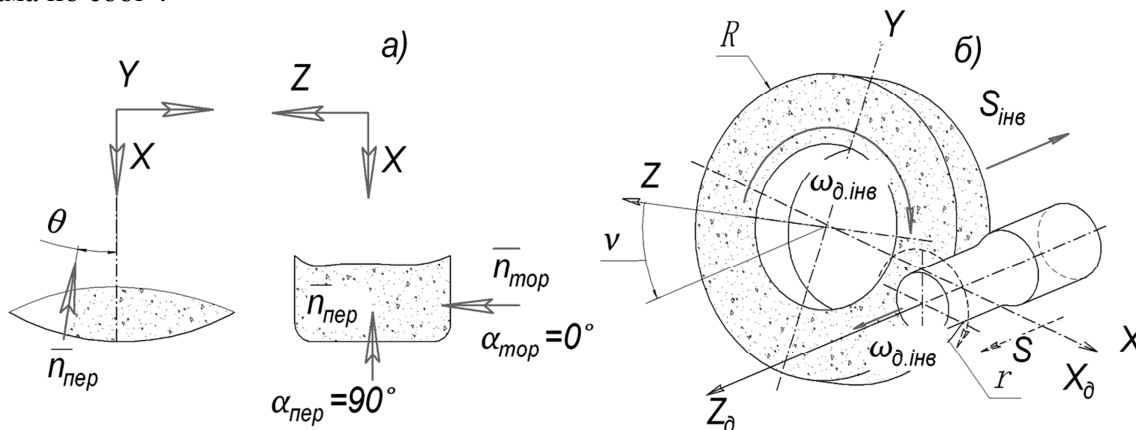


Рис. 2. Схема до визначення  $V_n$

Профіль інструмента умовно можна поділити на три ділянки: периферійну, торцеву, яка зрізує основний припуск, та перехідну, яка з'єднує вказані.

Радіус-вектор периферійної  $\vec{r}_{пер}(\theta, z)$  та торцевої  $\vec{r}_{тор}(\theta, R)$  поверхонь інструменту, записаний через матриці перетворення СК, має вигляд:

$$\begin{aligned} \vec{r}_{пер}(\theta, z) &= A^6(\theta) \cdot A^1(R(z)) \cdot A^3(z) \cdot \vec{e}^4, \\ \vec{r}_{тор}(\theta, R) &= A^6(\theta) \cdot A^1(R) \cdot A^3(z) \cdot \vec{e}^4, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $R(z)$  – радіальний розмір положення рухомої точки круга у функції поздовжньої координати.

Вектор нормалі можна визначити за допомогою виразу

$$\vec{n}(\rho, \theta) = [\cos \theta \cdot \sin \alpha \cdot \sin \theta \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha]^T.$$

Для периферії кут  $\alpha$  між віссю інструмента та напрямком орта нормалі відповідно дорівнює  $\alpha_{пер} = -\pi/2$  для торця  $\alpha_{тор} = 0$ , отже, враховуючи малість кута  $\theta$  та його від'ємне значення в межах контакту, отримаємо:

$$\vec{n}_{пер}(\theta) = \begin{bmatrix} -\cos \theta \\ \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} -1 \\ \theta \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \vec{n}_{тор} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Процес підведення припуску до ділянок інструмента можна записати через функцію формоутворення на верстаті, перенесенням інструменту до СК деталі

$$\vec{r}(\theta, z, \phi) = A^3(-p \cdot \phi) \cdot A^6(\phi) \cdot A^4(-v) \cdot A^1(-L) \cdot \vec{r}(\theta, z), \quad (6)$$

де  $p = S_0/2\pi$  – параметр гвинтового руху.

Обертання інструмента тут наведено в інверсному русі.

Диференціюванням за часом (або кутом  $\phi$ ) радіус вектора визначає швидкість відносного руху круга у проекціях на осі системи координат деталі

$$V = \frac{\partial \vec{r}(\theta, z, \phi)}{\partial \phi} = \left[ p \cdot DA^3(p \cdot \phi) \cdot A^6(\phi) + A^3(p \cdot \phi) \cdot DA^6(\phi) \right] \cdot A^4(-\nu) \cdot A^1(-L) \cdot \vec{r}(\theta, z)$$

$$\vec{V}(\theta) \Big|_{\phi=0} = \omega_\delta \cdot \begin{bmatrix} z \cdot \sin \nu + R \cdot \sin \theta \cdot \cos \nu \\ L - R \cdot \cos \theta \\ S_0 / 2\pi \end{bmatrix} \approx \omega_\delta \cdot \begin{bmatrix} z \cdot \nu + R \cdot \theta \\ r_\delta \\ p \end{bmatrix}, \quad (7)$$

де  $\omega_\delta = \frac{d\phi}{dt}$ ,  $r_\delta = L - R$ .

Вектори нормалі, перенесені до системи координат деталі, мають проєкції  $\vec{n}_{oi} = L^4(\nu) \cdot \vec{n}$ .

$$\vec{n}_n(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta \cdot \sin \alpha \\ \sin \alpha \cdot \sin \theta \cdot \cos \nu + \cos \alpha \cdot \sin \nu \\ \cos \alpha \cdot \cos \nu - \sin \alpha \cdot \sin \theta \cdot \sin \nu \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Враховуючи значення кута  $\alpha$  для периферійної та торцевої ділянок, тоді

$$\vec{n}_{nep}(\theta, \nu) = \begin{bmatrix} -1 \\ -\theta \\ \theta \cdot \nu \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} -1 \\ -\theta \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \vec{n}_{mop}(\theta) = \begin{bmatrix} 0 \\ \nu \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Скалярний добуток цих векторів не залежить від кута  $\phi$  обертання деталі. Тому параметру  $\phi$  можна присвоїти будь-яке значення, наприклад,  $\phi=0$ , що спрощує подальші розрахунки.

Визначимо  $V_n$  для кожної з ділянок та проведемо аналіз їх завантаження.

Для малих значень кута  $\nu$ , що характеризує перехрещення осей, можна замінити значення синуса безпосередньо кутом у радіанах. Тоді значення  $V_n$  для торця та периферії

$$V_{nep}(\theta, z) = \omega_\delta \cdot (z \cdot \nu + \theta \cdot L),$$

$$V_{mop}(\theta, R) = \omega_\delta \cdot (p + \nu \cdot r_\delta). \quad (10)$$

Користуючись першим з цих рівнянь, можна знайти лінію контакту як залежність  $\theta(z)$ , прирівнюючи його до нуля.

$$\theta(z) \approx -\frac{z \cdot \nu}{L}. \quad (11)$$

Звідси знаходять кут її нахилу до осьової площини навколо базової точки та кривизну  $K$  Ейлеревого перерізу круга та хвилястість формоутворення у поздовжньому перерізі деталі.

Аналізуючи друге з рівнянь, можна помітити, що швидкість  $V_n$  залишається постійною в межах контакту по торцю (в цьому виразі незначно змінюється лише радіус у межах контакту).

Питома та середня продуктивність визначається лише розмірами плями контакту, які значно більші, ніж при круглому поздовжньому шліфуванні. Тому продуктивність шліфування значно вища, а питомі витрати абразивного матеріалу є меншими.

Продуктивність підведення припуску до робочої поверхні круга для поздовжнього глибинного шліфування визначають за подібними залежностями згідно з наведеним методичним підходом.

**Висновки і пропозиції.** У роботі проведено аналіз сучасних методів шліфування поверхонь деталей на предмет виявлення резервів підвищення продуктивності та покращення

якості оброблення та запропоновано методику, яка дозволяє розраховувати інтенсивність підведення припуску до різних ділянок робочої поверхні круга при шліфуванні одночасно периферією та торцем інструменту, а також до робочої поверхні круга при поздовжньому глибинному шліфуванні. Ця методика може мати практичне використання під час оцінювання техніко-економічних показників на початковій та завершальній стадії процесу.

Розроблена методика дозволяє також порівнювати теоретично розраховані похибки оброблення з експериментальними даними. Складено алгоритм та програми розрахунку в пакеті програм MathCAD. Отримані експериментальні результати не суперечать теоретичним. Похибка знаходиться в межах 10 %.

#### Список використаних джерел

1. *Маслов Е. Н.* Теория шлифования металлов / Е. Н. Маслов. – М. : Машиностроение, 1974. – 319 с.
2. *Филимонов Л. Н.* Высокоскоростное шлифование / Л. Н. Филимонов. – Л. : Машиностроение, 1979. – 248 с.
3. *Решетов Д. Н.* Точность металлорежущих станков / Д. Н. Решетов, В. Т. Портман. – М. : Машиностроение, 1986. – 336 с.
4. *Кальченко В. В.* Научные основы эффективного шлифования со скрещивающимися осями инструмента и обрабатываемой детали : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В. В. Кальченко. – Х., 2006. – 36 с.
5. *Грабченко А. И.* Шлифование со скрещивающимися осями инструмента и детали : монография / А. И. Грабченко, В. И. Кальченко, В. В. Кальченко. – Чернигов : ЧГТУ, 2009. – 356 с.
6. *Повышение* производительности шлифования поверхностей со скрещивающимися осями инструментов и деталей / В. И. Кальченко, В. В. Кальченко, А. В. Рудик, В. И. Венжега // Резание и инструмент в технологических системах : Межд. научн.-техн. сборник. – 2005. – Вып. 67. – С. 241–246.
7. *Венжега В. И.* Підвищення ефективності шліфування торців при схрещених осях деталі та круга з калібрувальною ділянкою : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.03.01 / В. И. Венжега. – Х., 2009. – 214 с.
8. *Рудик А. В.* Формоутворення торців деталей автомобілів при двосторонньому шліфуванні / А. В. Рудик, В. И. Венжега // Вісник Чернігівського державного технологічного університету : збірник. – Чернігів : ЧДТУ, 2008. – Вип. 34. – С. 80–89.

УДК 534.1:539.3

**О.Л. Деркач**, аспірант

Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

#### РОЗРАХУНОК НЕСТАЦІОНАРНИХ КОЛИВАНЬ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ З П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИМИ АКТИВНИМИ НАКЛАДКАМИ ПРИ ВИПАДКОВОМУ КІНЕМАТИЧНОМУ ЗБУДЖЕННІ

**О.Л. Деркач**, аспирант

Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

#### РАСЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНЫХ КОЛЕБАНИЙ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ АКТИВНЫМИ НАКЛАДКАМИ ПРИ СЛУЧАЙНОМ КИНЕМАТИЧЕСКОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

**Oleh Derkach**, PhD student

Chernihiv National University of Technology, Chernihiv, Ukraine

#### CALCULATION OF TRANSIENT VIBRATIONS OF A VEHICLE WITH ACTIVE PIEZOELECTRIC PATCHES SUBJECTED TO RANDOM KINEMATIC PERTURBATIONS

*Враховуючи широку сферу застосування в техніці smart-матеріалів, при проектуванні необхідно розраховувати smart-конструкції на дію випадкового навантаження. Досліджено демпфірування нестационарних коливань моделі транспортного засобу з п'єзоелектричними активними накладками, який рухається по поверхні з випадковими нерівностями. Нестационарні коливання досліджуються за допомогою методики скінченно-елементного моделювання у*