

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.923.42

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/01>**Морочко В.В.**

Національний університет «Чернігівська політехніка»

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ПРОДУКТИВНОСТІ ШЛІФУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ОРІЄНТОВАНИМ КРУГОМ, ЗАПРАВЛЕНИМ ІЗ РІЗНИМИ ПОДАЧАМИ НА РОБОЧІЙ І КАЛІБРУЮЧІЙ ДІЛЯНКАХ

Проведено дослідження процесу формоутворення циліндричних поверхонь деталей під час їх шліфування периферією орієнтованого круга. Розроблені просторові моделі зняття припуску та формоутворення, досліджено розподіл припуску вздовж різальної ділянки інструмента під час шліфування орієнтованим інструментом. Показано, що на периферійній різальній ділянці шліфувального круга суміщаються чорнова, чистова обробки та калібрування.

Оскільки під час шліфування зі схрещеними осями припуск розподіляється вздовж чорнкової, напівчистої, чистої та калібрувальної ділянок шліфувального круга, нерівномірно від найбільшого на чорновій до практично нульового на калібрувальній ділянці, то відповідно і розвиненість робочої поверхні інструмента на вказаних ділянках повинна бути різною. У роботі пропонується забезпечувати різну розвиненість периферійної поверхні круга за рахунок різної величини подачі правлячого інструмента: більшої на чорновій ділянці і меншої на чистовій і калібрувальній. Так, на чорновій ділянці круга при правці знімається основний припуск, більші канавки забезпечують більший простір для відведення стружки, запобігаючи її прилипанню і виникненню вібрацій, що підвищить точність обробки. Чистова та калібрувальна ділянки периферії, на які припадають невеликі значення припуску, будуть забезпечувати нижчу геометричну шорсткість поверхні валів.

Упровадження запропонованого способу правки кругів при однопрохідному шліфуванні зі схрещеними осями інструменту і циліндричної деталі забезпечить більш високі точність та якість оброблених поверхонь, а також значно підвищить ефективність та продуктивність процесу обробки. Розроблений спосіб правки може бути застосований для процесів круглого шліфування зі схрещеними осями оброблюваної деталі та абразивних кругів.

Ключові слова: кругле шліфування, шліфування зі схрещеними осями, правка круга з різними подачами, знімаєми припуск, продуктивність шліфування, розвиненість поверхні круга.

Постановка проблеми. Значна частина продукції підприємств машинобудівного комплексу належить до групи тіл обертання – вали, осі, пальці, втулки, до яких висуваються високі вимоги по точності розмірів, форми, шорсткості поверхонь. Однією з головних тенденцій сучасного машинобудування в умовах ринкової економіки є забезпечення високих показників точності та якості оброблених поверхонь при високій продуктивності обробки. Ефективним способом фінішної обробки зовнішніх поверхонь обертання є шліфування зі схрещеними осями інструменту і дедалі. Дослідження, удосконалення наявних та впровадження нових способів обробки шліфуванням сприятиме підвищенню рівня конкурентоспроможності вітчизняних підприємств.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Під час шліфування циліндричних поверхонь деталей з паралельними осями деталі та інструмента задіяна не вся висота шліфувального круга, а лише частина, яка дорівнює подачі деталі на оберт круга, тому відбувається нерівномірний знос інструмента та погіршення якості і точності поверхневого шару деталі. Формоутворююча ділянки круга немає стабільного положення. Висота зношеної ділянки інструмента в кожній точці його робочої поверхні залежить від подачі та висоти припуску [1]. У вказаному способі знижується продуктивність обробки внаслідок задіяності в процесі шліфування не всієї висоти круга, а лише її невеликих частин при невідомому розташуванні формоутворюючої ділянки.

У [2] запропоновано спосіб круглого шліфування з поздовжньою подачею орієнтованим кругом зі схрещеними осями інструмента та деталі. Фіксація формоутворюючої ділянки круга здійснюється за рахунок повороту круга на кут відносно осі обертання деталі і є чітко визначеною. Вона розташована на осі поворота круга. Але в процесі зйому припуску кут його повороту залежить від величини припуску.

Німецькою фірмою Junker розроблено новий спосіб обробки циліндричних і торцевих поверхонь, при якому кути осі круга і деталі схрещуються під невеликим кутом [3; 4]. Використання торцевої ділянки інструменту дозволяє значно збільшити розміри п'ятна контакту інструмента із заготовкою. Число обертів заготовки вибирається в ряді випадків більшим числа обертів шліфувального круга. Досягається подача на оберт близько 0,01, а швидкість шліфування до 160 м/с.

У роботі 5 запропоновано новий принцип шліфування циліндричних, ступінчастих та криволінійних поверхонь обертання на верстатах з ЧПК, коли вісь повороту абразивного інструменту, перпендикулярну до осі їх обертання, поєднують з нормаллю в опорній точці оброблюваної поверхні і круг повертають на кут, при якому чорнове шліфування здійснюється його торцем, напівчистове – перехідною радіусною кромкою, чистове шліфування та калібрування – широкою розвантаженою ділянкою периферії, що забезпечує підвищення продуктивності обробки в 1,5 – 3 рази в порівнянні з традиційними способами круглого шліфування, точності (ІТ 6-7) та отримання параметру шорсткості $Ra = 0,32-0,16$ мкм. При цьому поворот осі круга відносно горизонтальної осі оброблюваної деталі забезпечує фіксацію формоутворюючої точки інструменту та можливість її програмування на верстатах з ЧПК.

У роботі [6] було проведено дослідження динамічних характеристик верстату ВЗ 208 Ф4 під час шліфування периферією орієнтованого круга в режимі самозаточування. Отримані показники статичної податливості, максимальної резонансної амплітуди, коефіцієнта динамічності, резонансної частоти, параметру який характеризує вібростійкість системи.

Постановка завдання. Метою даної роботи є дослідження способу фінішного шліфування циліндричних поверхонь деталей зі схрещеними вісями інструменту і деталі для виявлення додаткових резервів, які б дали можливість підвищити точність формоутворення та продуктивність обробки. Для цього необхідно дослідити розви-

неність робочої поверхні круга після правки та запропонувати спосіб правки абразивних кругів, який би забезпечував різну розвиненість робочої поверхні інструмента у відповідності до особливостей процесу обробки.

Виклад основного матеріалу дослідження. Під час механічної обробки матеріалів розрізняють продуктивності зняття припуску і формоутворення. За положенням у межах контакту говорять про питому і середню продуктивність, за тривалістю дії розрізняють миттєву і середню. Відома залежність для визначення продуктивності підведення припуску в зону обробки:

$$Q = \iint_S V_n \cdot dS,$$

де V_n – проекція швидкості відносного руху на напрям вектору одиничної нормалі \vec{n} до поверхні інструмента, S – розміри поверхні контакту між заготовкою та абразивним інструментом, які визначають рішенням векторних рівнянь поверхонь, dS – елемент площі в її межах.

Отже, продуктивність зростає зі збільшенням швидкості різання, що задається окружною швидкістю круга та площі контакту. Скалярний добуток виражає інтенсивність підведення металу до різних ділянок у межах контакту. Зняття припуску із заготовки відбувається при позитивному значенні скалярного добутку $\vec{V}_i \cdot \vec{n}_i > 0$, а формоутворення поверхні деталі при умові $\vec{V}_i \cdot \vec{n}_i = 0$.

Під час шліфування валів 1 (рис.1) абразивний круг 2 подається на всю глибину різання t і переміщується вздовж осі $O_p Z_p$ системи координат деталі з подачею s_p . При цьому його повертають навколо осі $O_w Y_w$, розташованої на відстані C від торця інструмента. Величина кута орієнтації інструмента α залежить від висоти припуску, а торцева частина інструменту не бере участі в обробці. Схрещення осей інструмента та деталі забезпечує роботу всієї периферійної ділянки круга, а зміщення осі $O_w Y_w$ – наявність калібрувальної ділянки довжиною C , що формує вихідну точність обробки циліндричного вала [7].

При постійній подачі s_p круга на оберт деталі величина припуску t поступово зменшується від початкової точки i_1 на профілі круга до точки повороту A : в точці i_1 величина припуску максимальна t , в точці i_2-t_1 , в точці i_k-t_2 . При цьому формоутворююча точка A є початком калібрувальної ділянки периферії інструмента, де припуск практично дорівнює нулю.

Розробимо математичні моделі поверхні інструменту, оброблюваної деталі та процесу формоутворення під час шліфування зі схрещеними

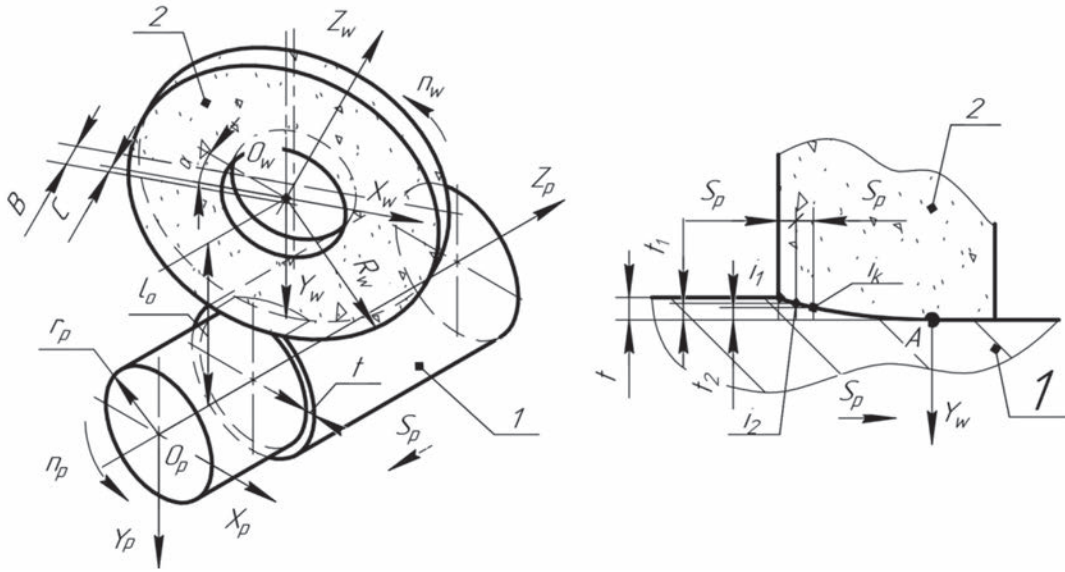


Рис. 1. Шліфування циліндричного вала периферією орієнтованого інструмента

осями інструмента та деталі з використанням пакету програмного забезпечення MatchCAD.

Радіус вектор поверхні інструмента $\overline{GW}(z, \varphi)$ описується циліндричним модулем формоутворення:

$$\begin{aligned} \overline{GW}(z, \varphi) &= MC_{z, \varphi, R_w}^w \cdot \bar{e}4 = \\ &= M3(z) \cdot M6(\varphi) \cdot M2(R_w) \cdot \bar{e}4, \end{aligned} \quad (1)$$

де MC_{z, φ, R_w}^w – циліндричний модуль формоутворення поверхні інструмента, представлений матрицею переходу радіус-вектору початкової точки $\bar{e}4$ в систему координат інструмента; $M1...M6$ – матриці переміщень та поворотів відносно координатних осей; $R_w=700$ мм – радіус шліфувального круга; $z=0...B$ – лінійна координата на периферії круга, змінюється від 0 до висоти інструмента $B=60$ мм; $\varphi=0...360^\circ$ – кутова координата профілю шліфувального круга.

Циліндрична поверхня валу \bar{P} задається радіус-вектором поверхні інструменту, матрицею переходу та модулем орієнтації шліфувального круга в системі координат деталі:

$$\begin{aligned} \bar{P} &= M^r \cdot MC_\gamma^{or} \cdot \overline{GW} = \\ &= M1(-l_o) \cdot M6(-\gamma) \cdot M3(-B+C) \cdot \overline{GW}, \end{aligned} \quad (2)$$

де $M^r = M1(-l_o)$ – матриця переходу із системи координат круга в систему координат деталі; $l_o = R_w + r_p$ – відстань між осями вала та інструмента; $MC_\gamma^{or} = M6(-\gamma) \cdot M3(-B+C)$ – циліндричний модуль орієнтації інструмента; γ – кут повороту шліфувального круга; C – довжина калібрувальної ділянки круга.

Номинальний профіль обробленої поверхні циліндричного вала описується циліндричним модулем формоутворення $C_{\gamma_p}^{sh}$:

$$MC_{\gamma_p}^{sh} = M3(\gamma_p \cdot p_z) \cdot M6(\gamma_p), \quad (3)$$

де γ_p – поточний кут повороту деталі навколо власної осі; $p_z = \frac{s_p}{2 \cdot \pi}$ – крок гвинтової лінії; s_p – осьова подача деталі.

Остаточно номінальна поверхня деталі з урахуванням рівнянь (1)-(3) описується формулою:

$$\begin{aligned} \bar{P}(z, \gamma_p, \gamma) &= MC_{\gamma_p}^{sh} \cdot M^r \cdot MC_\gamma^{or} \cdot MC_{z, \varphi, R_w}^w \cdot \bar{e}4 = \\ &= M3(\gamma_p \cdot p_z) \cdot M6(\gamma_p) \cdot \times \\ &\times M1(-l_o) \cdot M6(-\gamma) \cdot M3(-B+C) \times \\ &\times M3(z) \cdot M6(\varphi) \cdot M2(R_w) \cdot \bar{e}4. \end{aligned} \quad (4)$$

Профіль оброблюваної поверхні вала визначається за умови взаємодії інструментальної поверхні по лінії контакту з деталлю:

$$\bar{v} \cdot \bar{n} = \left(\frac{\partial \bar{P}(z, \gamma_p, \gamma)}{\partial z} \times \frac{\partial \bar{P}(z, \gamma_p, \gamma)}{\partial \gamma} \right) \cdot \frac{\partial \bar{P}(z, \gamma_p, \gamma)}{\partial \gamma_p} = 0, \quad (5)$$

де \bar{n} – одиничний вектор нормалі до поверхні круга, що знаходиться як диференціал радіус-вектору $\bar{P}(z, \gamma_p, \gamma)$ за двома незалежними параметрами z та γ ; \bar{v} – вектор швидкості відносного руху круга в системі координат валика (диференціал радіус-вектору $\bar{P}(z, \gamma_p, \gamma)$ за параметром γ_p , який моделює кут повороту оброблюваної поверхні за одиницю часу).

Знайти лінію контакту оброблюваного вала та інструменту можна за допомогою такого розрахункового блоку:

$$\begin{aligned}
 & \gamma \leftarrow 0, \\
 & \text{for } j \in 0..N_i \\
 & \quad z \leftarrow z_{\min} + \frac{z_{\max}}{N_i} \cdot j, \\
 & \quad \gamma \leftarrow \text{root} \left(\left(\frac{\partial \bar{P}(z, \gamma_p, \gamma)}{\partial z} \times \frac{\partial \bar{P}(z, \gamma_p, \gamma)}{\partial \gamma} \right) \cdot \frac{\partial \bar{P}(z, \gamma_p, \gamma)}{\partial \gamma_p}, \gamma \right), \quad (6) \\
 & \quad M^{(j+1)} \leftarrow \begin{pmatrix} z \\ \gamma \end{pmatrix}, \\
 & \quad M^T.
 \end{aligned}$$

де N_i – кількість точок на периферії інструмента; $z_{\min}=0$, $z_{\max}=B$ – відповідно, найменша та найбільша координати точок на профілі круга; γ – кутова координата точки контакту на поверхні інструмента; M – матриця координат точок лінії контакту.

За результатами розрахунків отримані геометричні тривимірні моделі поверхонь валка 1 (рис. 2), інструмента 2 та площі їх контакту, обмежені лініями: 3 – контакту, 4 – перетину інструмента і торця заготовки; 5 – перетину зовнішнього циліндру заготовки і шліфувального круга. Як видно із рис. 2, у процесі зняття припуску задіяна вся периферія шліфувального круга 2. Схрещення осей інструмента та деталі забезпечує розвантаження чистової і калібрувальної ділянок круга, на які припадають найменші значення припуску. А отже, їх знос мінімальний, що практично не впливає на точність формоутворення деталі.

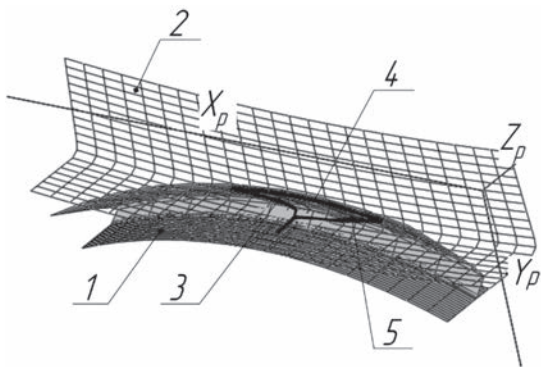


Рис. 2. Пляма контакту під час шліфування валу 1 орієнтованим кругом 2, обмежена лініями: 3 – лінія контакту; 4 – лінія перетину інструмента і торця заготовки; 5 – лінія перетину зовнішнього циліндру заготовки і шліфувального круга

Отриманий графік проекції лінії контакту 3 на площину (рис. 3) демонструє, що припуск t вздовж периферії круга рівномірно зменшується від чорнової ($50 < z < 20$) до чистової та калібрувальної ділянок ($20 < z < 0$). Від координати z (рис. 3), що

відповідає висоті B шліфувального круга, до координати $z=0$ (початок калібрувальної ділянки) припуск (заштрихована ділянка під лінією контакту 3) поступово зменшується і на калібрувальній ділянці практично дорівнює нулю.

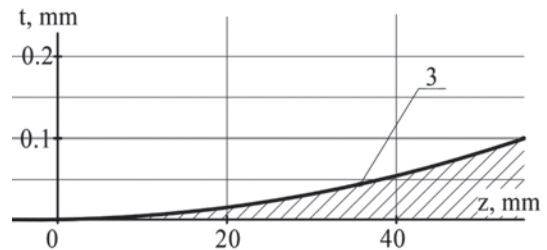


Рис. 3. Розподіл припуску t вздовж лінії контакту 3 шліфувального круга та деталі під час шліфування орієнтованим інструментом: z – висота шліфувального круга

Оскільки під час шліфування зі схрещеними осями припуск розподіляється вздовж чорнової, напівчистової, чистової та калібрувальної ділянок шліфувального круга, то і розвиненість робочої поверхні інструмента на вказаних ділянках повинна бути різною. У роботі пропонується забезпечувати різну розвиненість периферійної поверхні круга за рахунок різної величини подачі правлячого інструмента: більшої на чорновій ділянці і меншої на чистовій і калібрувальній. Так, на чорновій ділянці круга при правці знімається основний припуск, більші канавки забезпечують більший простір для відведення стружки, запобігаючи їй прилипанню і виникненню вібрацій, що підвищить точність обробки. Чистова та калібрувальна ділянки периферії, на які припадають невеликі значення припуску, будуть забезпечувати нижчу геометричну шорсткість поверхні валків.

Приведений спосіб правки також збільшує період між правками (45 хв) за рахунок наявності канавок різної конфігурації на чорновій та чистовій ділянках шліфувального круга у поєднанні з особливостями процесу обробки орієнтованим інструментом. Продуктивність обробки під час шліфування зі схрещеними осями абразивного круга, периферійна ділянка якого заправлена даним способом, та валка зростає на 10% за рахунок можливості використання підвищених режимів обробки.

Оскільки для обробки орієнтованим кругом здійснюється різна правка на його чорновій, чистовій та калібрувальній ділянках, даний спосіб накладає обмеження на довжину вказаних ділянок. Тому приведений спосіб правки не може бути застосований при правці вузьких кругів, а також алмазних та ельборових. Тривимірна

модель правки шліфувального круга дає можливість отримати тільки його геометричний профіль із урахуванням впливу профілю алмазного олівця, глибини різання та подачі. Однак отримана модель профіля круга не враховує вплив жорсткості системи та вібрацій.

У подальшому модель правки може бути застосована для способів шліфування орієнтованим інструментом не лише циліндричних, а й ступінчастих та криволінійних поверхонь обертання.

Висновки. У роботі проведено аналіз сучасних методів шліфування поверхонь деталей на предмет

виявлення резервів підвищення продуктивності та покращення якості обробки та запропоновано спосіб шліфування циліндричних поверхонь деталей периферією орієнтованого інструмента, за якого на периферійній різальній ділянці шліфувального круга суміщаються чорнова, чистова обробки та калібрування з рівномірним зменшення припуску до чистової та калібрувальної ділянок вздовж різальної поверхні інструмента. Запропонований спосіб правки периферійної ділянки абразивного круга із різною подачею правлячого інструмента відповідно до особливостей процесу шліфування.

Список літератури:

1. Кальченко В.І., Кальченко В.В., Єрошенко А.М., Сіра Н.М. Дослідження способу шліфування валків стрічкопрокатних станів зі схрещеними осями інструмента та деталі. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2016. № 4. С. 80–87.
2. Кальченко В.И. Способ круглого шлифования с продольной подачей. А.с. 1234163 СССР, МКИ В24В 5/04. Авт. Изобр. № 3813415/25-08. Заявлено 20.11.84. Опубл. 30.05.86. Бюл № 20. 4 с.
3. Chang He Li, Ling Yun Qi, Hua Yang Zhao. Application and Development of High-Efficiency Abrasive Finishing. *Advanced Materials Research*. 2011. P. 189–193.
4. Yali Hou, Changhe Li, Yan Zhou. Applications of High-Efficiency Abrasive Process with CBN Grinding Wheel. *Engineering*. 2010. № 2(3). P. 184–189.
5. Сіра Н.М. Підвищення ефективності шліфування циліндричних, ступінчастих та криволінійних поверхонь обертання зі схрещеними осями круга та деталі. Дисертація на здобуття ступеня кандидата технічних наук. Чернігівський національний технологічний університет. Чернігів, 2017. 176 с.
6. Кальченко В.В., Венжега В.І., Сіра Н.М., Морочко В.В. Дослідження динамічних характеристик процесу шліфування циліндричних поверхонь периферією орієнтованого круга в режимі затуплення на верстаті В3208Ф4. *Технічні науки та технології. Науковий журнал*. 2020. № 4(22). С. 9–18.
7. Modeling of Tool Surface Dressing with Two-Sided Grinding of the Parts Ends / Vitaliy Kalchenko, Volodymyr Kalchenko, Natalia Sira, Vladimir Venzhega, Dmytro Kalchenko / Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes. Inter Partner 2020: Advanced Manufacturing Processes II pp. 513–523.

Morochko V.V. IMPROVING THE ACCURACY AND PRODUCTIVITY OF GRINDING CYLINDRICAL SURFACES WITH AN ORIENTED CIRCUIT FILLED WITH DIFFERENT FEEDS AT WORK

A study of the process of forming cylindrical surfaces of parts during their grinding by the periphery of the oriented circle. Spatial models of allowance removal and shaping have been developed, the distribution of allowance along the cutting section of the tool during grinding with an oriented tool has been investigated. It is shown that on the peripheral cutting section of the grinding wheel roughing, finishing and calibration are combined.

Since when grinding with crossed axes, the allowance is distributed along the rough, semi-finished, finishing and calibration sections of the grinding wheel, unevenly from the largest on the rough to almost zero on the calibration section, then the development of the tool surface in these areas should be different. In the work it is offered to provide various development of a peripheral surface of a circle due to various size of giving of the operating tool: bigger on a rough site and smaller on finishing and calibration. Thus, on the rough section of the circle during editing, the main allowance is removed, larger grooves provide more space for chip removal, preventing it from sticking and vibration, which will increase the accuracy of processing. The finishing and calibration sections of the periphery, which have small allowance values, will provide a lower geometric surface roughness of the rolls.

The introduction of the proposed method of straightening wheels in single-pass grinding with crossed axes of the tool and the cylindrical part will provide higher accuracy and quality of machined surfaces, as well as significantly increase the efficiency and productivity of the machining process. The developed method of straightening can be applied to the processes of circular grinding with crossed axes of the workpiece and abrasive wheels.

Key words: circular grinding, grinding with crossed axes, editing of a circle with different feeds, removable allowance, grinding productivity, development of a circle surface.