

Розробка моделі правки інструментальної поверхні при шліфуванні зі схрещеними осями круга і циліндричної деталі

**В. І. Кальченко, В. В. Кальченко, О. М. Кальченко, Н. М. Сіра,
Д. В. Кальченко, В. В. Морочко, В. О. Винник**

Проведено тривимірне геометричне моделювання процесу формоутворення циліндричних деталей при шліфуванні зі схрещеними осями її та круга. Шліфування валів, які широко використовуються у автомобілебудуванні, верстатобудуванні, та валків стрічкопрокатних станів здійснюється за один установлений орієнтованим широким абразивним кругом. На базі отриманої просторової моделі формоутворення та зняття припуску досліджено розподіл припуску вздовж різальної ділянки інструмента при шліфуванні орієнтованим інструментом. Показано, що на периферійній різальній ділянці шліфувального круга суміщаються чорнова, чистова обробки та калібрування.

Розроблена модульна тривимірна модель правки периферійної ділянки шліфувального круга однокристалним алмазним інструментом при шліфуванні зі схрещеними осями інструмента та деталі з використанням уніфікованих модулів правлячого інструмента, орієнтації та формоутворення. На базі поданої моделі проведені дослідження геометричної точності формоутворення периферійної ділянки інструмента після його правки. З метою отримання необхідної мікрогеометрії та різальних властивостей абразивних кругів відповідно до особливостей процесу обробки валків стрічкопрокатних станів орієнтованим інструментом пропонується правка із зменшеною подачею правлячого інструмента до калібрувальної ділянки. При цьому величина подачі правлячого однокристалного інструмента залежить від величини припуску. Різна подача правлячого інструмента забезпечує різну розвиненість різальної периферійної ділянки інструмента. Це, в свою чергу, збільшує інтервали між правками шліфувального круга, який працює у режимі затуплення. А отже, підвищується стійкість та зменшується собівартість обробки. Впровадження запропонованого способу правки кругів при однопрохідному шліфуванні зі схрещеними осями інструмента та циліндричної деталі забезпечить високі точність, 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: двостороннє торцеве шліфування, схрещені осі, правка кругів, розвиненість поверхні круга, циліндричні деталі

1. Вступ

В умовах формування нового типу економіки [1] особливу роль відіграє машинобудівна галузь, яка забезпечує економічне зростання країни і підвищує

її міжнародну конкурентоспроможність. Тому до виробів вказаної галузі висуваються вимоги забезпечення високої точності та якості. У сучасному машинобудуванні, зокрема автомобілебудуванні, металорізальному та прокатному верстатобудуванні широко використовуються циліндричні деталі типу вал. Забезпечення високих показників точності обробки здійснюється використанням фінішних операцій на шліфувальних верстатах.

У відомих способах круглого шліфування циліндричних деталей їх обробка здійснюється зазвичай на одному верстаті одним і тим же абразивним кругом. При цьому основний шар металу зрізується передньою частиною круга. Інша ділянка інструмента здійснює чистову обробку. При цьому формоутворююча точка займає нестабільне положення внаслідок нерівномірного зносу круга. Це, в свою чергу, зменшує точність розмірів і геометричної форми деталей.

Використання способу шліфування зі схрещеними осями круга та деталі дає можливість фіксації формоутворюючої ділянки абразивного інструменту. Це забезпечує рівномірний розподіл припуску вздовж профілю круга, його більш рівномірний знос та підвищує продуктивність обробки.

Для забезпечення високих показників обробки необхідно, щоб при правці круга враховувались особливості його подальшої роботи.

Отже, розробка та дослідження просторових моделей правки інструментальної поверхні при круглому шліфуванні зі схрещеними осями круга і циліндричної деталі є актуальною задачею. Оскільки сприятиме підвищенню продуктивності обробки, точності виробів і стійкості інструментів та забезпечуватиме високу конкурентоспроможність у різних галузях машинобудування.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В існуючих способах багатопрхідного шліфування периферією циліндричного круга відбувається нерівномірний знос інструментальної поверхні [2]. В процесі обробки деталі 1 (рис. 1) задіяна не вся висота B шліфувального круга 2, а лише частина, яка дорівнює подачі деталі на оберт круга s_o [3]. Тому висота h_i зношеної ділянки I інструмента в кожній точці його робочої поверхні залежить від подачі s_o та висоти припуску t_i . Знос інструмента відбувається з однієї або обох сторін в залежності від способу обробки.

Зниження продуктивності обробки у вказаному способі відбувається внаслідок роботи в процесі шліфування не всієї висоти круга, а лише її невеликих частин, та невідоме розташування формоутворюючої точки.

Спосіб високошвидкісного шліфування зі схрещеними осями круга 2 та деталі 1 [4, 5] здійснила фірма Junker на верстатах Quickpoint 1000, Quickpoint 3000, Quickpoint 5000 [6]. При цьому використовуються шліфувальні круги із ельбору або алмазу висотою 4–6 мм та шириною h покриття декілька міліметрів при швидкостях шліфувального круга до 140 м/с і обертання деталі до 12000 об/хв.

В даному способі фіксація формоутворюючої точки B круга 2 (рис. 2) здійснюється за рахунок повороту інструменту на кут α відносно осі обертання деталі 1.

Це забезпечує рівномірний розподіл припуску вздовж профілю інструмента. Значна частина припуску припадає на торець круга. Величина матеріалу, що

знімається за один прохід, розбивається на декілька частин. Це дозволяє розвантажити периферію круга та виділити деяку калібрувальну ділянку, що і забезпечить кінцеву точність обробки.

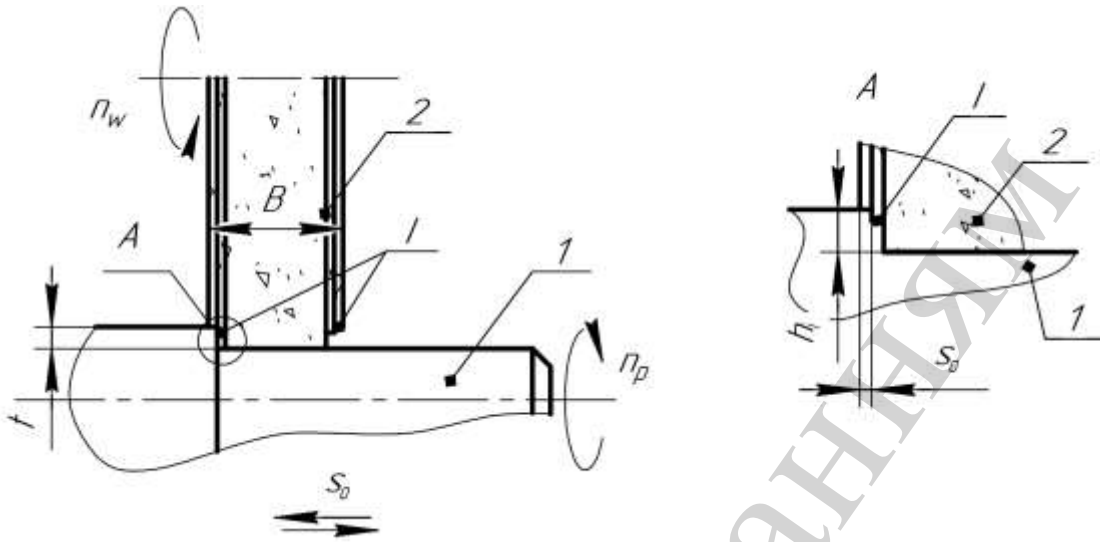


Рис. 1. Спосіб багатопрохідного шліфування периферією циліндричного круга

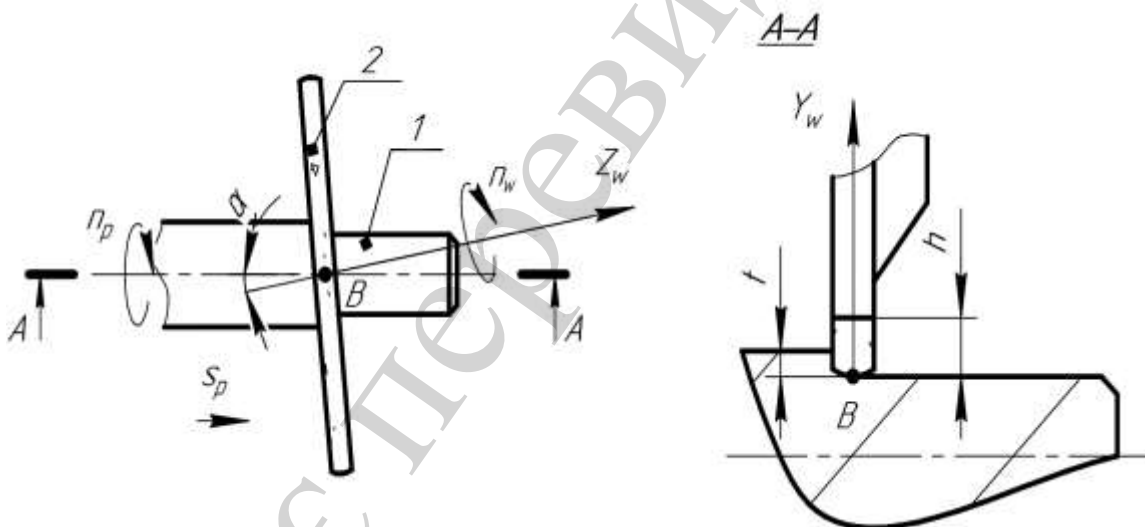


Рис. 2. Спосіб шліфування зі схрещеними осями інструмента та деталі фірми Yunker

Однак при однопрохідному чистовому шліфуванні валів з глибинами різання близько 0,3–0,5 мм вихідна точність обробки є недостатньою. А використання алмазних та ельборових кругів стає економічно не вигідним внаслідок їх високої вартості та невеликої розвиненості рельєфу робочої поверхні.

Так, наприклад, при обробці валків стрічкопрокатних станів використовуються абразивні круги діаметрами 700–1080 мм і висотою 50–150 мм [7]. При цьому необхідно забезпечити високі точність (IT6-8) та шорсткість ($Ra=0,4-1,6$ мкм) робочих поверхонь [8] і витримати допуск на відхилення круглості бочки та шийок – 0,010–0,015 мм й похибки твірної валків – 5–10 мкм.

Забезпечити високі показники точності розмірів, низькі шорсткість та хвилястість оброблених поверхонь можна в процесі роботи шліфувальних кругів у режимі затуплення [9]. Різальні та деформуючі зерна міцно утримуються зв'язкою в інструменті, що дає можливість зберегти профіль інструмента, який формується при правці.

Оскільки при шліфуванні зі схрещеними осями задіяна вся периферія інструменту, припуск розподіляється вздовж чорнової, напівчистої, чистої та калібрувальної ділянок шліфувального круга. Відповідно, розвиненість робочої поверхні інструмента на вказаних ділянках повинна бути різною. Максимальною під час чорнового шліфування для забезпечення високої продуктивності обробки, меншою – при напівчистовій та чистовій обробках для отримання низької шорсткості поверхонь.

Тому виникає необхідність розробки такої правки круга, яка б забезпечувала можливість управління рельєфом його робочої поверхні у відповідності до особливостей розподілу припуску при шліфуванні зі схрещеними осями круга та деталі.

У роботі [10] пропонується використання текстурованих шліфувальних кругів, які мають як спеціально розроблені активні, так і пасивні ділянки шліфування на своїх геометрично активних поверхнях. Активна зона дозволяє виконувати процес обробки. Пасивна область, де немає жодного зерна, забезпечує більший простір для видалення стружки. Це збільшує розвиненість поверхні круга.

У роботі [11] проведені дослідження підвищення точності правки шліфувальних кругів. Визначено, що сила правки є ключовим параметром у визначенні кількості проходів, необхідних для досягнення високої ефективності процесу. Тому можна забезпечити зменшення тривалості правки та витрату правлячого інструменту. А в роботі [12] з метою підвищення точності обробки представлено безконтактний метод вимірювання зносу шліфувального круга.

Експериментальні дослідження процесу правки шліфувальних кругів, описані у роботі [13], показали, що на шорсткість шліфувального круга впливають відношення швидкостей, поперечні подачі та профілі роликів.

Однак, існуючі способи правки шліфувальних кругів [10–13] не розглядають питання забезпечення різної розвиненості рельєфу робочої поверхні інструмента.

Виникає необхідність у розробці способу правки круга при шліфуванні циліндричних деталей зі схрещеними осями його та деталі, який би забезпечував різні різальні властивості робочої поверхні інструмента у відповідності до особливостей процесу обробки деталей.

Дана проблема може бути вирішена шляхом розробки модульних тривимірних моделей процесів зняття припуску та формоутворення абразивних інструментів при правці. Аналіз моделей сприятиме розробці правки абразивних кругів із забезпеченням різної розвиненості рельєфу робочої поверхні інструмента при шліфуванні зі схрещеними осями інструмента та деталі.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є розробка просторової моделі правки інструментальної поверхні при круглому шліфуванні зі схрещеними осями круга і циліндричної деталі. Це дасть можливість підвищити точність формоутворення та продуктивність обробки.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- дослідити особливості процесу шліфування зі схрещеними осями інструмента та циліндричної деталі у частині розподілу припуску вздовж різальної ділянки круга;
- розробити модульну тривимірну модель правки периферійної ділянки шліфувального круга на базі уніфікованих модулів: інструментального, орієнтації та формоутворення;
- дослідити розвиненість робочої поверхні круга після правки;
- запропонувати спосіб правки абразивних кругів при шліфуванні циліндричних деталей зі схрещеними осями його та деталі, який би забезпечував різну розвиненість робочої поверхні інструмента у відповідності до особливостей процесу обробки.

4. Дослідження процесу шліфування валів зі схрещеними осями інструмента та циліндричної деталі

При шліфуванні валів 1 (рис. 3) абразивний круг 2 подається на всю глибину різання t (рис. 3) і переміщується вздовж осі $O_p Z_p$ системи координат деталі з подачею s_p . При цьому інструмент повертають навколо осі $O_w Y_w$, яка розташована на відстані C від торця інструмента [14]. 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 периферії круга, а зміщення осі $O_w Y_w$ забезпечує наявність калібрувальної ділянки довжиною C , що підвищує вихідну точність обробки циліндричного валика.

При постійній подачі s_p круга 2 на оберт деталі 1 величина припуску t від початкової точки i_1 на профілі круга до точки повороту A поступово зменшується: в точці i_1 величина припуску 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.

Для розробки моделі процесу шліфування необхідно математично описати поверхні інструменту, оброблюваної деталі та процес формоутворення при шліфуванні зі схрещеними осями інструмента та деталі.

Побудова моделей при шліфуванні зі схрещеними осями валика та шліфувального круга здійснювалась у програмному пакеті MatchCAD.

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

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

де MC_{z,φ,R_w}^w – циліндричний модуль формоутворення поверхні інструмента, представлений як матриця 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.

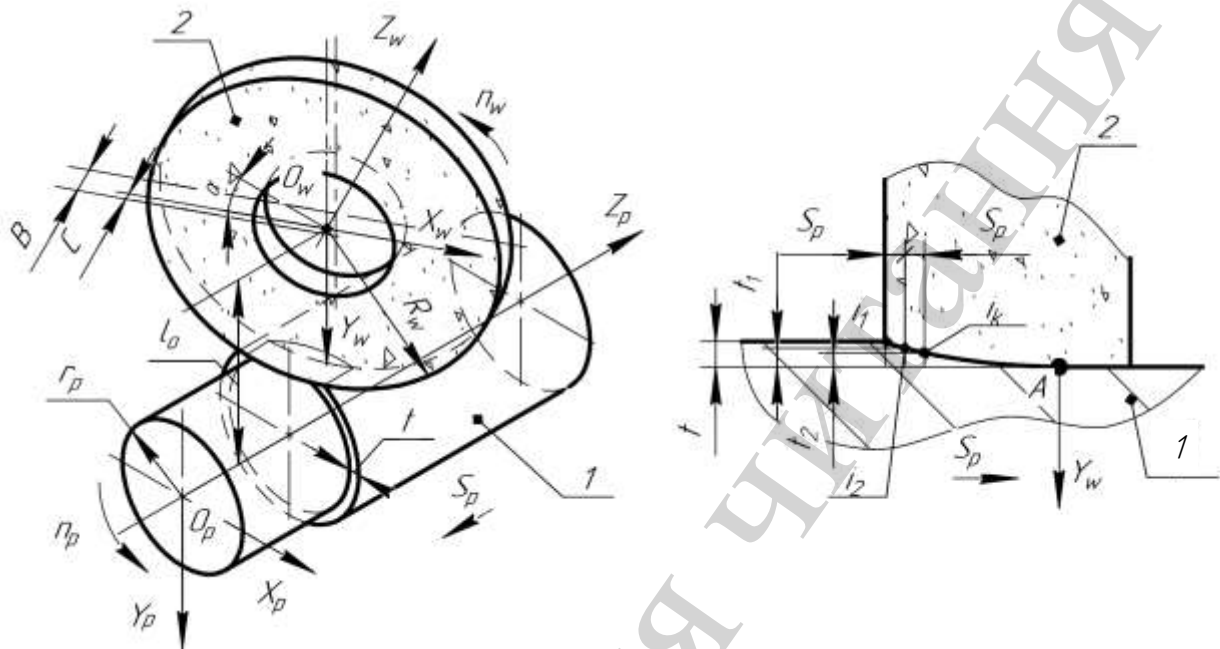


Рис. 3. Шліфування циліндричного вала периферією орієнтованого інструмента

Поверхня \bar{P} циліндричного вала, який оброблюється, задається радіус-вектором поверхні інструменту, матрицею переходу та модулем орієнтації шліфувального круга в системі координат деталі:

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

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

Номінальний профіль обробленої поверхні циліндричного валика 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.

Остаточна номінальна поверхня деталі з урахуванням рівнянь (1)-(3) може бути описана:

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

Для визначення профілю оброблюваної поверхні валика скористаємось умовою контакту профілів, яка визначає лінію контакту деталі та інструментальної поверхні:

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

де \bar{n} – одиничний вектор нормалі до поверхні круга, знаходиться як диференціал радіус-вектору $\bar{P}(z, \gamma_p, \gamma)$ за двома незалежним 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 інструмента та оброблюваного валика можна за допомогою наступного розрахункового блоку:

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

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

Отримані геометричні тривимірні моделі поверхонь валка 1 (рис. 4), 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. 4, 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.

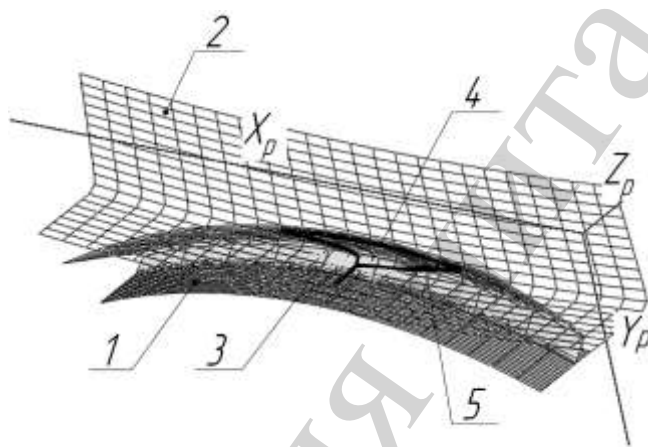


Рис. 4. Пляма контакту при шліфуванні валу 1 орієнтованим кругом 2, обмежена лініями: 3 – лінія контакту; 4 – лінія перетину інструмента і торця заготовки; 5 – лінія перетину зовнішнього циліндру заготовки і шліфувального круга

Із отриманого графіка проекції лінії контакту 3 на площину (рис. 5) видно, що припуск t вздовж периферії круга рівномірно зменшується від чорнової ($50 < z < 20$) до чистової та калібрувальної ділянок ($20 < z < 0$).

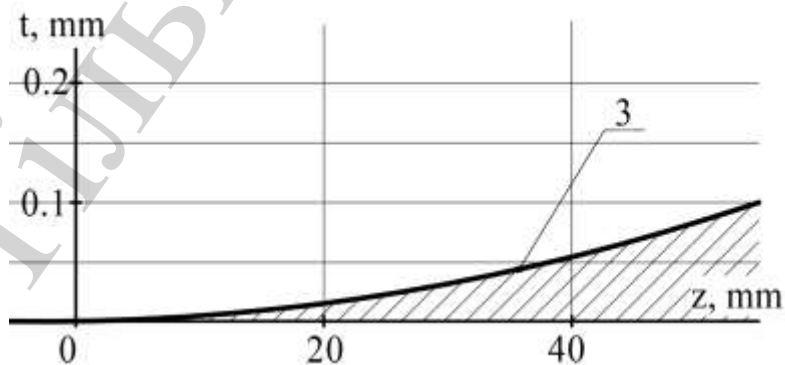


Рис. 5. Розподіл припуску t вздовж лінії контакту 3 шліфувального круга та деталі при шліфуванні орієнтованим інструментом: z – висота шліфувального круга

Від координати z (рис. 5), 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.

Отже, на периферії шліфувального круга суміщаються чорнова, напівчистова, чистова обробки та калібрування. Нерівномірний знос шліфувального круга не впливає на точність формоутворення, оскільки схрещення осей інструмента та деталі забезпечує розвантаження чистової та калібрувальної ділянок круга і їх мінімальний знос.

5. Тривимірне моделювання правки периферії абразивного круга однокристалним алмазним інструментом

З метою забезпечення відповідної до процесу обробки розвиненості чорнової, напівчистої, чистової та калібрувальної ділянок периферії круга необхідно змоделювати процес правки інструментальної поверхні.

Правку абразивного круга 1 (рис. 6) здійснюють однокристалним алмазним олівцем 2 із різальним зерном у формі октаедра.

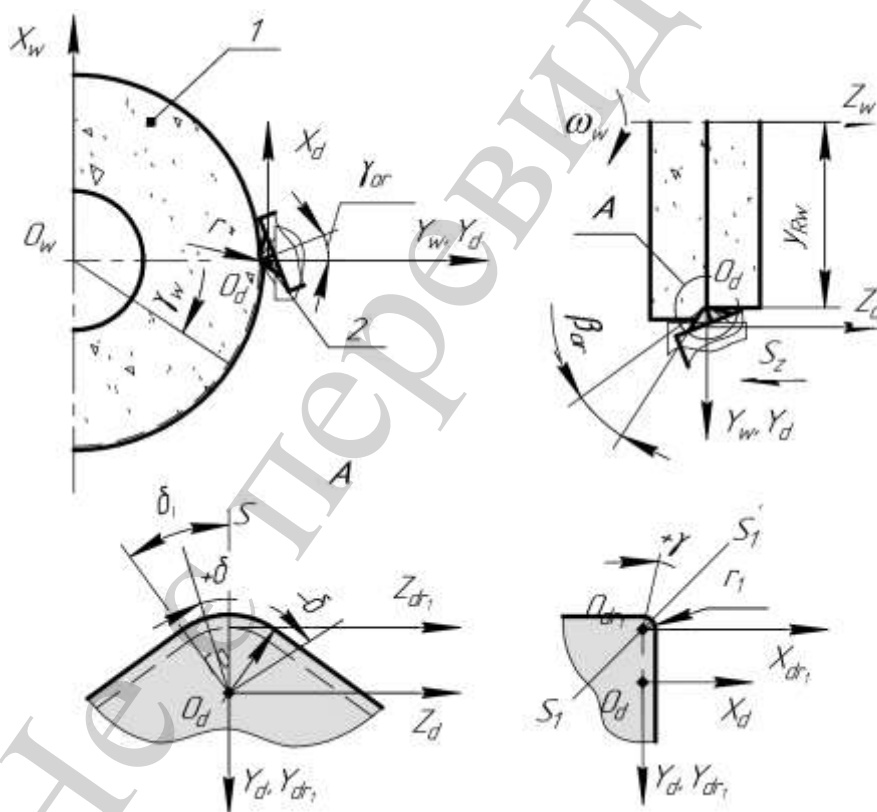


Рис. 6. Схема правки абразивного круга алмазним олівцем

Алмазний олівець необхідно подавати під кутом γ_{or} до оброблюваної поверхні шліфувального круга. Таке розташування правлячого інструмента забезпечує роботу граней алмазного зерна, які ще не затупилися в процесі обробки.

Для розробки загальної тривимірної моделі зняття припуску та точності формоутворення периферійної ділянки абразивного круга при його правці необхідно описати інструментальну поверхню алмазного олівця 2 (рис. 6, А).

Радіус-вектор \bar{r}_d точок різальної поверхні алмазного олівця задається сферичним модулем $MS_{\delta, r_0, \gamma, r_1}^d$ його формоутворення:

$$\overline{RD} = MS_{\delta, r_0, \gamma, r_1}^d \cdot \bar{e}4 = M4(\delta) \cdot M2(r_0 - r_1) \cdot M6(\gamma) \cdot M2(r_1), \quad (7)$$

де r_1 – радіус, який визначає положення вершини алмазного олівця (рис. 6, А); δ – кут повороту навколо осі $O_d X_d$ (рис. 6, А), який задає радіус r_0 заокруглення різальної крайки олівця; γ – кутова координата, яка задає радіус r_1 заокруглення різальної крайки.

Радіус-вектор $\overline{RD}(\delta, \gamma)$ різальної поверхні інструмента задається у вигляді двох прямолінійних ділянок та сферичної частини (рис. 6, А):

$$\begin{aligned} \overline{RD}(\delta, \gamma) = & MS_{\delta, r_0, \gamma, r_1}^d \cdot \bar{e}4 \cdot \Phi(|\delta|) - MS_{\delta, r_0, \gamma, r_1}^d \cdot \bar{e}4 \cdot \Phi(|\delta| - \delta_i) + \\ & + M2(h|\delta|) \cdot MS_{\delta, r_0, \gamma, r_1}^d \cdot \bar{e}4 \cdot \Phi(\delta - \delta_i) + M2(-h|\delta|) \cdot MS_{\delta, r_0, \gamma, r_1}^d \cdot \bar{e}4 \cdot \Phi(-\delta - \delta_i), \end{aligned} \quad (8)$$

де δ_i – кут, який визначає розташування радіусної кромки відносно лінії симетрії пластинки $O_d S$ (рис. 6, А); $h(\delta) = (r_0 - r_1) \cdot \text{tg}(\delta - \delta_i)$ – функція, яка визначає координату розташування точки вздовж конусних ділянок різальної поверхні олівця; $\Phi(\delta)$ – функція Хевісайда, при додатному аргументі дорівнює одиниці, при від'ємному – нулю.

На рис. 7 представлена просторова модель різальної поверхні алмазного олівця з кутом при вершині $\delta_i = \pi / 4$ та радіусами округлення $r_0=1,5$ мм, $r_1=0,2$ мм.

Даний графік (рис. 7) є математичним відображенням поверхні алмазного олівця, яку, завдяки розробленим рівнянням, можна змінювати в залежності від параметрів робочого інструмента. Математична модель інструментальної поверхні дозволяє змоделювати геометричний профіль обробленої поверхні деталі.

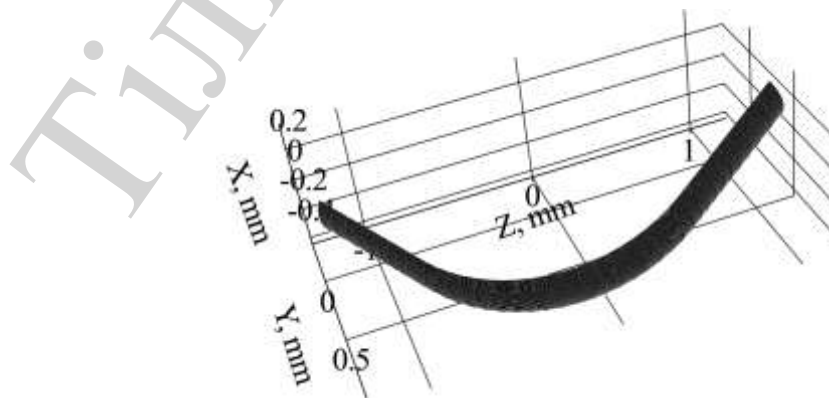


Рис. 7. Різальна грань поверхні алмазного олівця

Опишемо номінальну поверхню шліфувального круга 1 (рис. 6):

$$\begin{aligned} \overline{R}_{GW}(\delta, \gamma, \gamma_w) &= MC_{p_z \cdot \gamma_w \cdot y_{Rw}}^{sh} MS_{\beta_{or} \cdot \gamma_{or} \cdot \chi_{or}}^{or} \cdot \overline{RD} = \\ &= M3(\gamma_w \cdot p_z) \cdot M2(-y_{Rw}) M6(\gamma_{or}) \cdot M4(\beta_{or}) \cdot M5(\chi_{or}) \cdot \overline{RD}, \end{aligned} \quad (9)$$

де $MS_{\beta_{or} \cdot \gamma_{or} \cdot \chi_{or}}^{or}$ – модуль орієнтації алмазного олівця у системі координат круга; $MC_{p_z \cdot \gamma_w \cdot y_{Rw}}^{sh}$ – циліндричний модуль, який задає рух алмазного олівця відносно шліфувального круга; R_w – радіус круга після правки; t – припуск на правку круга; γ_{or} , β_{or} , χ_{or} – кути нахилу інструментальних поверхонь відносно осей $O_d Z_d$, $O_d X_d$, $O_d Y_d$ відповідно; y_{Rw} – переміщення системи координат інструмента в систему координат деталі, (радіус циліндричної поверхні шліфувального круга після правки); γ_w – кут повороту оброблюваної поверхні круга навколо власної осі; p_z – параметр гвинтового руху різального леза олівця вздовж поверхні круга, $p_z = \frac{s_z}{2 \cdot \pi}$; s_z – подача на оберт у відповідному напрямку (рис. 6).

Остаточне рівняння обробленої поверхні шліфувального круга із врахуванням моделей (8) і (9):

$$\overline{R}_{GW}(\delta, \gamma, \gamma_w) = MC_{p_z \cdot \gamma_w \cdot y_{Rw}}^{sh} \cdot MS_{\beta_{or} \cdot \gamma_{or} \cdot \chi_{or}}^{or} \cdot MS_{\delta \cdot \gamma \cdot \gamma_w}^d \cdot \overline{e}4. \quad (10)$$

Лінію контакту круга та алмазного олівця визначимо із рівності (11) аналогічно (5):

$$\bar{n} \cdot \bar{v} = \left(\frac{\partial \overline{R}_{GW}(\delta, \gamma, \gamma_w)}{\partial \delta} \times \frac{\partial \overline{R}_{GW}(\delta, \gamma, \gamma_w)}{\partial \gamma} \right) \cdot \frac{\partial \overline{R}_{GW}(\delta, \gamma, \gamma_w)}{\partial \gamma_w} = 0, \quad (11)$$

де \bar{n} – одиничний вектор нормалі до поверхні алмазного олівця; \bar{v} – вектор швидкості відносного руху олівця в системі координат круга.

Для знаходження кутів γ_{min} , γ_{max} , які визначають розташування лінії контакту на формоутворювальній грані алмазного олівця, скористуємось розрахунковим блоком, аналогічним блоку (6):

$$\text{Ang} = \left\{ \begin{array}{l} \lambda \leftarrow 0, \\ \text{for } i \in 0..k \\ \left| \begin{array}{l} \delta \leftarrow \delta_{\min} + \frac{\delta_{\max}}{k} \cdot j, \\ \gamma \leftarrow \text{root}(n(\delta, \gamma, 0) \cdot v(\delta, \gamma, 0), \gamma), \\ M^{(j+1)} \leftarrow \begin{pmatrix} \gamma \\ \delta \end{pmatrix}, \end{array} \right. \\ M^T. \end{array} \right. \quad (12)$$

Рівняння (10) та (11) описують модульну тривимірну модель формоутворення периферійної ділянки шліфувального круга при правці.

6. Дослідження мікрорельєфу периферійної різальної ділянки абразивного круга після правки

На базі модульної тривимірної моделі формоутворення поверхні шліфувального круга при правці алмазним олівцем отримана периферійна поверхня шліфувального круга після його правки (рис. 8). Радіус шліфувального круга $R_w=600$ мм; висота $h=50$ мм, кут при вершині алмазного олівця $\gamma_i=\pi/4$, подача $s_z=0,1$ мм/об.

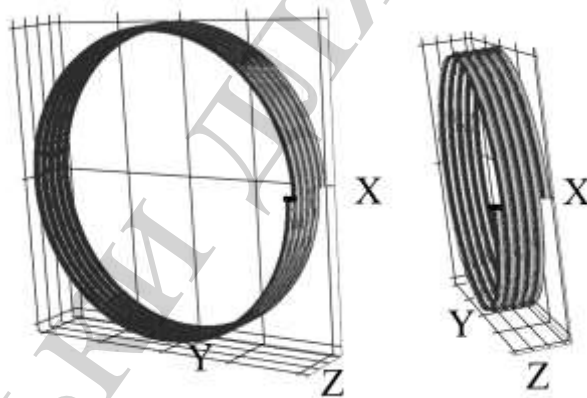


Рис. 8. Просторова модель поверхні периферії шліфувального круга після правки однокристальним алмазним олівцем

Як видно із рис. 8, у результаті правки шліфувального круга однокристальним алмазним олівцем на периферії шліфувального круга утворюються геометрична шорсткість у формі гвинтових канавок. Висота канавок залежить від величини припуску та подачі правлячого інструменту. При постійній подачі s_z на оберт розміри канавок однакові, що забезпечує однакову розвиненість робочої поверхні шліфувального круга.

7. Спосіб правки абразивних кругів при шліфуванні зі схрещеними осями інструмента та циліндричної деталі

При шліфуванні зі схрещеними осями інструмента та деталі виникає геометрична шорсткість R_z (рис. 9), величина якої визначається як відстань від номінальної поверхні деталі до точки N перетину двох послідовних положень 1 та 2 проекцій ліній контакту на площину круга.

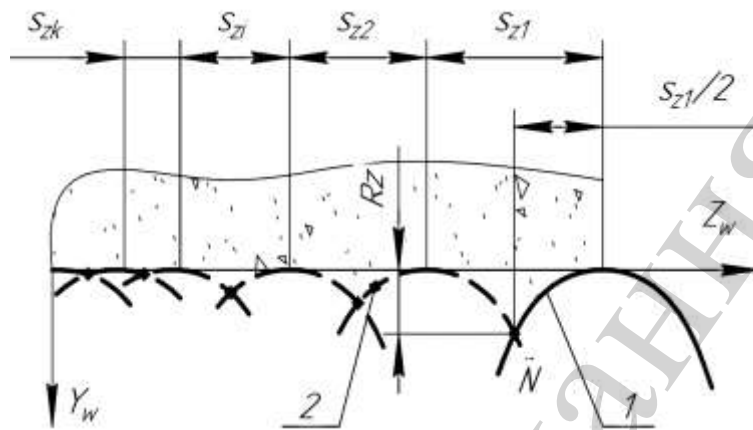


Рис. 9. Утворення геометричної шорсткості R_z на поверхні абразивного круга при правці однокристалним правлячим інструментом із різною величиною подачі s_z

Як видно із рис. 9, зміна величини подачі від s_{z1} до s_{zi} забезпечує можливість керування розвиненістю рельєфом та різальними властивостями периферійної ділянки шліфувального круга.

Так, при шліфуванні валків стрічкопрокатних станів зі схрещеними осями інструмента та деталі величина припуску вздовж лінії контакту постійно змінюється. На периферійній ділянці шліфувального круга суміщаються чорнова, чистова обробки та калібрування (рис. 5).

З метою забезпечення високої точності обробки валків при шліфуванні широким орієнтованим абразивним кругом пропонується правити його периферію з різною величиною подачі однокристалного правлячого інструмента. Так, чорнові та напівчистові ділянки периферії круга правляться із більшими подачами $s_{z1}, s_{z2}=0,3-0,5$ м/хв (рис. 9), чистові – з подачами $s_{zi}=0,15-0,25$ м/хв, а калібрувальні – з подачами $s_{zk}=0,05-0,1$ м/хв. При наближенні до чистової ділянки периферії круга подача правлячого інструмента поступово зменшується, а калібрувальну ділянку необхідно правити з однаковою подачею, щоб забезпечити високу точність поверхні валків. Величина подачі алмазного олівця залежить від величини припуску.

8. Обговорення результатів дослідження точності правки круга при шліфуванні зі схрещеними осями інструмента та деталі

Представлений спосіб шліфування зі схрещеними осями інструмента та циліндричної деталі забезпечує фіксацію формоутворюючої ділянки круга та рівномірне зменшення припуску вздовж його периферії від чорнової до чистової та калібрувальної ділянок (рис. 5). Це підвищує продуктивність обробки у

порівнянні із існуючими способами [2, 3], де задіяна не вся висота круга, а лише його невеликі частини, та невідоме розташування ділянки, яка забезпечує формоутворення.

Розроблена модульна тривимірна модель правки периферійної ділянки шліфувального круга (рис. 8), отримана за допомогою рівнянь (10) та (11), дає можливість враховувати особливості роботи її чорнових та чистових ділянок при шліфуванні орієнтованим інструментом.

Оскільки при шліфуванні зі схрещеними осями припуск розподіляється вздовж чорнової, напівчистої, чистої та калібрувальної ділянок шліфувального круга (рис. 5), відповідно, розвиненість робочої поверхні інструмента на вказаних ділянках повинна бути різною.

На відміну від існуючих способів правки шліфувальних кругів [10–13], представлений спосіб забезпечує різну розвиненість його периферійної поверхні за рахунок різної величини подачі правлячого інструмента (рис. 9). Так, на чорновій ділянці круга при правці знімається основний припуск, більші канавки забезпечують більший простір для відведення стружки, запобігаючи її прилипанню і виникненню вібрацій. Це підвищує точність обробки деталі до ІТ 6-7. А чистова та калібрувальна ділянки периферії, на які припадають невеликі значення припуску, забезпечують низьку геометричну шорсткість поверхні валків ($Ra=0,32-1,25$ мкм) завдяки меншим значенням геометричної шорсткості.

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 при шліфуванні 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 врахуванням впливу профілю алмазного олівця, глибини різання та подачі. Однак отримана модель профіля круга не враховує вплив жорсткості системи та вібрацій.

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

9. Висновки

1. Дослідження способу шліфування циліндричних деталей периферією орієнтованого інструмента, проведені на базі просторових моделей круга, валика, процесів зняття припуску та формоутворення показали можливість рівномірного зменшення припуску до чистої та калібрувальної ділянок вздовж різальної поверхні інструмента. Це підвищує точність до ІТ 6-7 та продуктивність

обробки за рахунок розподілу периферії інструмента на чорнові, чистові та калібрувальні ділянки.

2. Розроблена модульна просторова модель правки абразивних кругів однокристальним правлячим інструментом, з використанням рівнянь якої отримується геометричний профіль круга при різних входних параметрах (профіль правлячого інструмента, глибина різання та подача). Це дає можливість аналізувати процеси зняття припуску та формоутворення шліфувальних інструментів.

3. Запропонований спосіб правки периферійної ділянки абразивного круга із різною подачею правлячого інструмента у відповідності до особливостей процесу шліфування зі схрещеними осями круга та деталі. Завдяки різній розвиненості робочої поверхні інструменту на його чорновій, чистовій та калібрувальній ділянках представлена правка для кругів, які працюють в режимі затуплення.

4. Запропонований спосіб правки інструмента може бути використаний для способів шліфування зі схрещеними осями широких абразивних кругів та циліндричних, ступінчастих й криволінійних поверхонь обертання.

Література

1. Shkarlet, S., Kholiavko, N., Dubyna, M., Zhuk, O. (2019). Innovation, Education, Research Components of the Evaluation of Information Economy Development (as Exemplified by Eastern Partnership Countries). *Marketing and Management of Innovations*, 70–83. doi: <https://doi.org/10.21272/mmi.2019.1-06>

2. Nadolny, K., Słowiński, B. (2011). The Effects of Wear upon the Axial Profile of a Grinding Wheel in the Construction of Innovative Grinding Wheels for Internal Cylindrical Grinding. *Advances in Tribology*, 2011, 1–11. doi: <https://doi.org/10.1155/2011/516202>

3. Кальченко, В. І., Кальченко, В. В., Єрошенко, А. М., Сіра, Н. М. (2016). Дослідження способу шліфування валків стрічкопрокатних станів зі схрещеними осями інструмента та деталі. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, 4, 80–87. URL: http://visnyk.chdtu.edu.ua/images/tech/4_2016/14.pdf

4. Li, C. H., Qi, L. Y., Zhao, H. Y. (2011). Application and Development of High-Efficiency Abrasive Finishing. *Advanced Materials Research*, 189-193, 3113–3116. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.189-193.3113>

5. Hou, Y., Li, C., Zhou, Y. (2010). Applications of High-Efficiency Abrasive Process with CBN Grinding Wheel. *Engineering*, 02 (03), 184–189. doi: <https://doi.org/10.4236/eng.2010.23026>

6. Quickpoint. Flexible high-performance grinding machine (2015). URL: https://www.junker-group.com/fileadmin/user_upload/Prospekte/JUNKER_QUICKPOINT_en.pdf

7. Technical solutions for roll grinding (2019). Norton Saint-Gobain. URL: https://www.nortonabrasives.com/sga-common/files/document/ROLL%20GRINDING%20BROCHURE_apr2019.pdf

8. Пермяков, А. А., Жижев, А. А. (2011). Повышение эффективности предварительного шлифования прокатных валков за счет восстановления режущей способности круга без правки. *Вісник СевНТУ. Серія: Машиноприладо-*

будування та транспорт, 118, 113–118. URL: http://lib.sevsu.ru:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/4928/118_19.pdf?sequence=1&isAllowed=y

9. Шахбазов, Я. О., Широков, В. В., Широков, О. В., Паламар, О. О. (2018). Технологічне забезпечення процесу шліфування. Поліграфія і видавнича справа, 1 (75), 75–81. doi: <https://doi.org/10.32403/0554-4866-2018-1-75-75-81>

10. 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>

11. Young, H.-T., Chen, D.-J. (2005). Online dressing of profile grinding wheels. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 27 (9-10), 883–888. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2271-8>

12. Fan, K.-C., Lee, M.-Z., Mou, J.-I. (2002). On-Line Non-Contact System for Grinding Wheel Wear Measurement. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 19 (1), 14–22. doi: <https://doi.org/10.1007/pl00003964>

13. Kunderák, J., Fedorovich, V., Markopoulos, A. P., Pyzhov, I., Kryukova, N. (2014). Improvements of the Dressing Process of Super Abrasive Diamond Grinding Wheels. Manufacturing Technology, 14 (4), 545–554. URL: <https://www.researchgate.net/publication/269129723>

14. Кальченко, В., Кологойда, А., Кужельний, Я., Морочко, В. (2018). Однопрохідне доводочне шліфування зі схрещеними осями круга та циліндричної деталі. Технічні науки та технології, 4 (14), 9–17. doi: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-4\(14\)-9-17](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-4(14)-9-17)