

УДК 621.923

## Дослідження ширини контакту різальної поверхні круга з деталлю при плоскому торцевому шліфуванні з нахилом осі шпинделя

І. М. Пижов<sup>1)</sup>, В. Г. Клименко<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002;

<sup>2)</sup> Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка, Першотравневий проспект, 24, м. Полтава, Україна, 36011.

### Article info:

Paper received:

25 May 2015

The final version of the paper received:

09 November 2015

Paper accepted online:

30 November 2015

### Correspondent Author's Address:

<sup>1)</sup> [diamet@inbox.ru](mailto:diamet@inbox.ru)<sup>2)</sup> [klim\\_poltava@mail.ru](mailto:klim_poltava@mail.ru)

Проведені дослідження, що дозволили виявити деякі особливості формування оброблюваної поверхні при багатопрохідному плоскому торцевому шліфуванні з попереднім нахилом осі шпинделя. Встановлено роль у цьому процесі таких факторів, як кут нахилу осі шпинделя, глибина шліфування, діаметр круга і поперечна подача. Враховуючи важливу роль поперечної подачі, значення якої на етапі попередньої обробки повинно гарантовано забезпечувати відсутність на обробленій поверхні ділянок, що будуть залишатися незачеплені кругом, а на етапі чистової обробки потрібної висоти залишкових гребінців запропоновано узгоджувати значення поперечної подачі з розміром ширини контакту різальної поверхні круга з деталлю. З використанням геометричного комп'ютерного моделювання були проведені дослідження, результатом яких є встановлена емпірична залежність, що пов'язує ширину контакту різальної поверхні круга з деталлю з умовами обробки, і, таким чином, розв'язана задача визначення потрібної величини поперечної подачі. Все це дозволяє вдосконалити процес плоского торцевого шліфування і тим самим розширити його технологічні можливості.

**Ключові слова:** увігнутість, комп'ютерне моделювання, залишкові гребінці, поперечна подача, глибина шліфування, діаметр круга.

### ВСТУП

Процес плоского торцевого шліфування, що виконується на верстатах як із вертикальним, так і з горизонтальним розміщенням шпинделя, може бути реалізований як на «прохід», так і за багатопрохідною схемою обробки [1-4]. Перспективність плоскої схеми шліфування підтверджується тим, що не менше 20 % деталей у машинобудуванні мають плоскі поверхні [5], і значна кількість із них підлягає різним видам обробки (обдирне, попереднє, чистове і прецизійне) на плоскошліфувальних верстатах.

**Поставлення проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для зменшення ступеня нагріву, а отже, й деформації оброблюваної заготовки під час шліфування, особливо зі збільшеними глибинами обробки, технологи використовують різні технічні прийоми [1-4]. Зокрема, застосовують шліфувальні круги з переривчастою робочою поверхнею на самозагострювальних керамічних і бакелітових зв'язках; використовують круги із суцільною, але вузькою робочою поверхнею; періодично виконують піднутрення робочої поверхні кругів із широкою робочою поверхнею алмазними випрямними інструментами; використовують прогресивні конструкції

пристроїв, призначених для подачі технологічної рідини в зону шліфування; удосконалюють процес правлення круга алмазними олівцями; проводять обробку в суцільному шарі технологічної рідини; використовують попередній нахил осі шпинделя на кут  $\alpha$  для зменшення площі контакту різальної поверхні круга (РПК) з деталлю, застосовують комбіновані процеси шліфування та ін.

Нахил осі шпинделя на кут  $\alpha$  (рис. 1 а) приводить до зміни низки параметрів зони контакту РПК з деталлю, а також впливає на формування оброблюваної поверхні виробу. Залежно від напрямку поздовжньої подачі процес може бути здійснений як за звичайною ( $S_{\text{под.зв.}}$ ), так і глибинною ( $S_{\text{под.гл.}}$ ) схемами (рис. 1). До параметрів зони контакту при застосуванні глибинної схеми можна віднести довжину  $W'$  (рис. 1 б), довжину дуги  $L$  та ширину  $B'$  контакту РПК із деталлю (рис. 2). Зміна цих параметрів приводить до зміни площі контакту круга з деталлю.

Таким чином, позитивним моментом шліфування з нахилом осі шпинделя на кут  $\alpha$  є відносно проста можливість керування площею зони контакту РПК з оброблюваною поверхнею [2, 3], а, отже, й термостійкою напруженістю процесу шліфування.

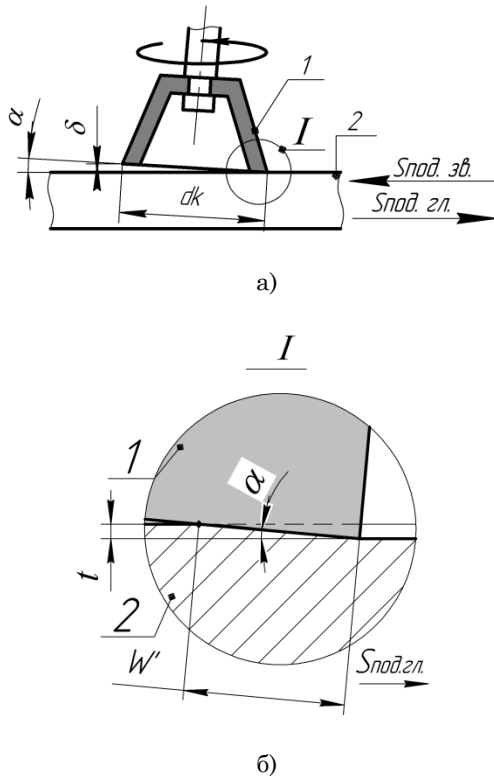


Рисунок 1 - Схема плоского торцевого шліфування з нахилом осі шпинделя: 1 - торцевий круг; 2 - деталь.

Негативний момент полягає в тому, що на оброблюваній поверхні деталі утворюється увігнутість під час шліфування «на прохід» або формуються залишкові гребінці при багатопрохідній схемі обробки.

Аналіз джерел інформації засвідчив, що докладних досліджень відносно встановлення параметрів зони контакту РПК із деталлю та формування оброблювальної поверхні деталі на сьогодні час немає. Є рекомендації нахилити вісь шпинделя верстата на такий кут, щоб зазор  $\delta$  (рис. 1) дорівнював  $\delta = 2$  мм за попередньої і  $\delta = 0,05$  мм за чистової видів обробок (причому незалежно від діаметра круга) [2, 4]. У праці [1] рекомендується брати кут нахилу  $\alpha = 2-4^\circ$  не акцентуючи уваги на вид шліфування.

Дослідження, що ми виконали раніше, із застосуванням комп'ютерного геометричного моделювання [6] дозволили запропонувати залежності, які дозволяють технологу проводити розрахунки довжини зони контакту ( $W'$ ) [7], значень увігнутості [8] під час шліфування «на прохід» та висоти залишкових гребінців [9] при багатопрохідній обробці. У праці [9] було встановлено, що практичне використання багатопрохідної схеми обробки вимагає визначеності величини поперечної подачі. В іншому випадку це може призвести до того, що на обробленій поверхні будуть або залишатися незачеплені кругом ділянки, або формуватися залишкові гребінці, висота яких може перевищувати їх допустиму величину. Це може призвести до появи браку виробів або до необхідності проведення додаткової обробки. Для усунення цього недоліку значення поперечної подачі необхідно задавати залежно від ширини контакту  $B'$  РПК із деталлю. На рисунку 2 наведено схему формування оброблюваної поверхні та показано вплив поперечної подачі на висоту залишкових гребінців при багатопрохідному торцевому шліфуванні.

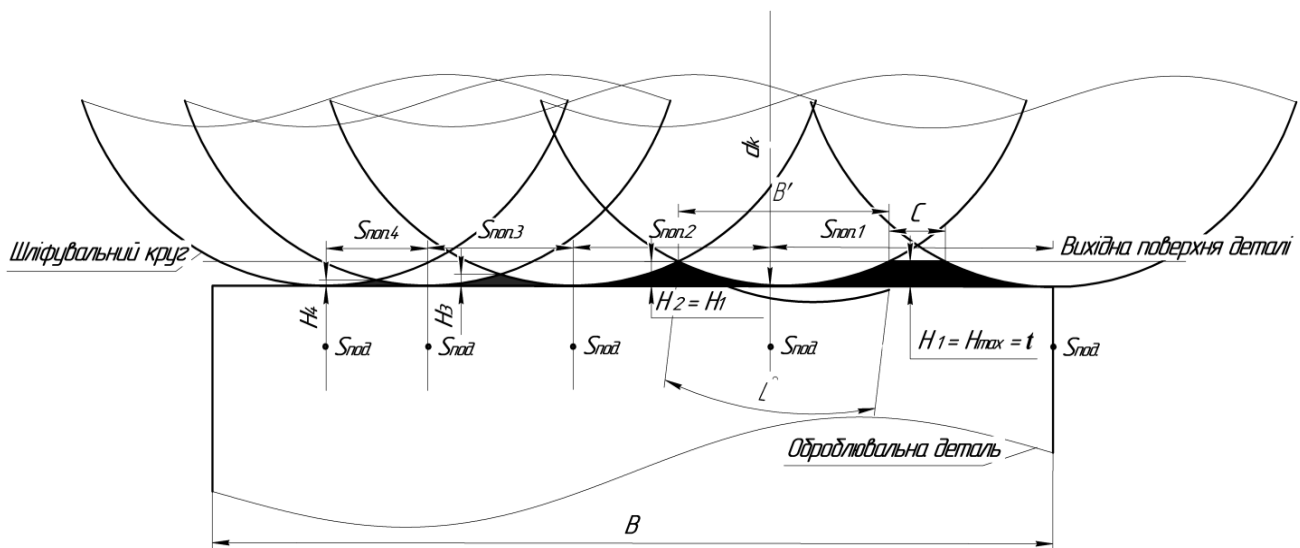


Рисунок 2 - Вплив  $S_{\text{под.}}$  на висоту залишкових гребінців

$$S_{non.1} > B', S_{non.2} = B',$$

$$S_{non.4} < S_{non.3} < S_{non.2} < S_{non.1}.$$

Контур шліфувального круга умовно показаний у вигляді кола, а для зручності прийнято, що при першому проході вісь круга збігається з одним із країв деталі. Як бачимо з рисунка 2, при багатопрхідному шліфуванні з глибиною  $t$ , поздовжньою  $S_{под}$  та поперечною  $S_{non}$  подачами на оброблюваній поверхні шириною  $B$  формуються ділянки шириною  $B'$  з увігнутістю та залишковими гребінцями певної висоти. При цьому й увігнутість, і залишкові гребінці характеризуються висотним параметром  $H$ . У праці [9] була встановлена залежність цього параметра від умов обробки:

$$H = 0,003 \cdot \alpha \cdot S_{non.2}^{2,039} \cdot d_k^{-0,949}, \quad (1)$$

де  $\alpha$  - кут нахилу осі шпинделя верстата;  $S_{non}$  - поперечна подача, мм/подв. хід;  $d_k$  - зовнішній діаметр шліфувального круга, мм.

Для випадку, коли поперечна подача перевищує свою допустиму величину ( $S_{non.1} > B'$ ), висота гребінців має максимальне значення, тобто  $H_1 = H_{max} = t$ . При цьому характерним є те, що на обробленій поверхні будуть залишатися незачеплені кругом ділянки шириною  $C$ , що недопустимо (якщо лише це не передбачено кресленням). Зі зниженням значення поперечної подачі ( $S_{non.4} < S_{non.3} < S_{non.2} < S_{non.1}$ ) висота залишкових гребінців також зменшується ( $H_4 < H_3 < H_2 < H_1$ ). Максимально допустиме значення поперечної подачі повинно дорівнювати ширині ділянки  $B'$  (тобто  $S_{non.2} = B'$ ). При цьому теоретично на обробленій поверхні не будуть залишатися незачеплені кругом ділянки. У цілому аналіз особливостей застосування процесу плоского торцевого шліфування з попереднім нахилом осі шпинделя за багатопрхідною схемою показав, що значення поперечної подачі потрібно обирати з урахуванням виду обробки. На етапі чистового шліфування поперечна подача повинна призначатися з урахуванням допустимого рівня висоти  $H$  залишкових гребінців згідно із залежності (1) [9]. На етапі попереднього шліфування значення поперечної подачі, з одного боку, повинно бути максимально можливим, що позитивно впливає на продуктивність процесу, а з іншого - гарантовано забезпечувати відсутність на обробленій поверхні ділянок, які будуть залишатися незачепленими кругом.

Для розв'язання цієї задачі необхідно встановити взаємозв'язок ширини  $B'$  контакту РПК із деталлю та умовами обробки.

**Мета досліджень.** Метою досліджень є встановлення взаємозв'язку між шириною контакту РПК із деталлю та умовами обробки при торцевому багатопрхідному шліфуванні з попереднім нахилом осі шпинделя.

**Основні матеріали досліджень.** Поставлене завдання ми вирішили шляхом комп'ютерного геометричного моделювання у середовищі «КОМПАС». Досліджувався вплив глибини шліфування  $t$ , кута попереднього нахилу осі шпинделя  $\alpha$  та діаметра круга  $d_k$  на ширину контакту РПК круга з деталлю  $B'$ . При цьому були зроблені такі допущення.

1. Діаметр круга не змінюється в міру його зношення. Цю вимогу можна реалізувати на практиці за умови, якщо за шліфувальний круг використовують, наприклад, чашку циліндричну.

2. На РПК практично немає площадки зношення (що на практиці забезпечується регулярним правлінням круга, наприклад, алмазним олівцем).

3. Жорсткість технологічної системи висока.

Математична обробка результатів комп'ютерного експерименту методом найменших квадратів дозволила запропонувати таку степеневу залежність (у припущенні, що глибина обробки не перевищує 0,1 мм):

$$B' = 14,92 \cdot t^{0,50} \cdot \alpha^{-0,48} \cdot d_k^{0,50}.$$

Похибка між експериментальними та розрахунковими даними не перевищує 5%. Графіки залежності ширини  $B'$  від умов шліфування наведені на рисунках 3-8.

Використовуючи рівняння (1) та (2), можна запропонувати такий підхід до визначення необхідного значення поперечної подачі в залежності від виду обробки. Ці значення при попередній ( $S_{non.n.}$ ) та чистовій ( $S_{non.ч.}$ ) обробках повинні задовольняти нерівності:

$$S_{non.n.} \leq B' \leq 14,92 \cdot t^{0,50} \cdot \alpha^{-0,48} \cdot d_k^{0,50};$$

$$S_{non.ч.} \leq 2,039 \sqrt{\frac{[H]}{0,003 \cdot \alpha \cdot d_k^{-0,949}}},$$

де  $[H]$  - допустиме значення висоти залишкових гребінців (рис. 2).

При цьому значення поперечної подачі, розраховане за формулою (3), гарантовано забезпечує на етапі попередньої обробки відсутність на обробленій поверхні ділянок, що будуть залишатися незачепленим кругом. Значення поперечної подачі, розраховане за формулою (4), дозволяє забезпечити на етапі чис-

тової обробки потрібний рівень залишкових гребінців  $H$ .

На практиці це може істотно розширити технологічні можливості процесу плоского торцевого багатопрохідного шліфування та уникнути браку шліфованих виробів.

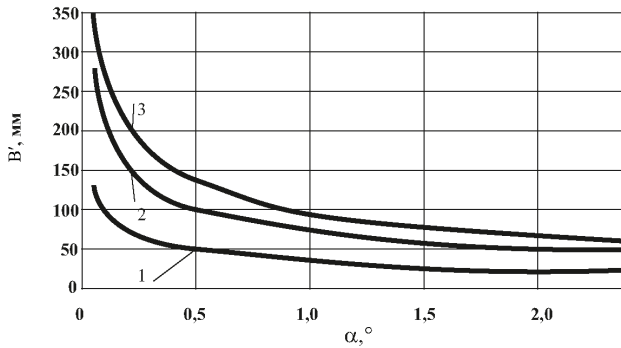


Рисунок 3 - Залежності  $B' = f(\alpha, t)$

1 -  $t = 0,01$  мм; 2 -  $t = 0,05$  мм; 3 -  $t = 0,09$  мм

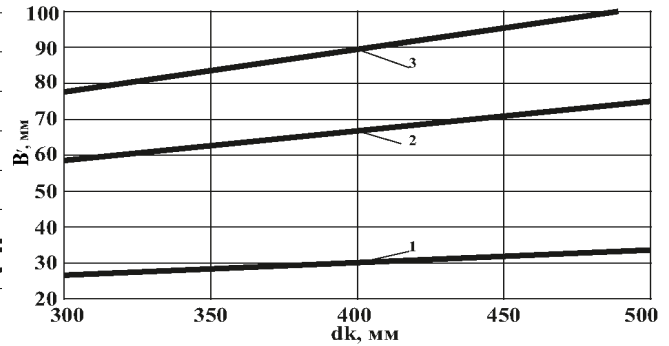


Рисунок 6 - Залежності  $B' = f(d_k, t)$

1 -  $t = 0,01$  мм; 2 -  $t = 0,05$  мм; 3 -  $t = 0,09$  мм

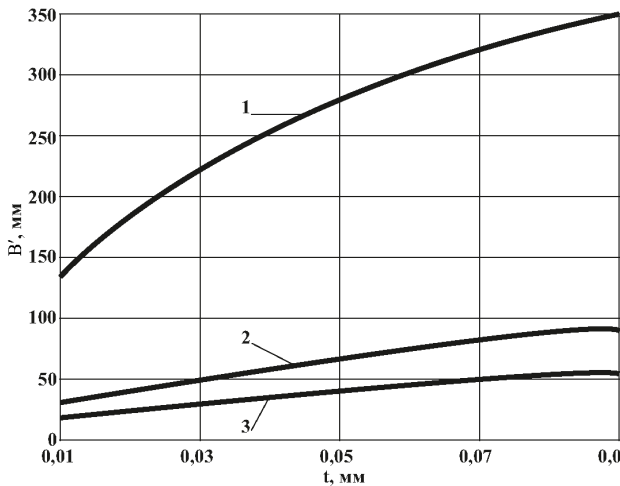


Рисунок 4 - Залежності  $B' = f(t, \alpha)$

1 -  $\alpha = 0,05^\circ$ ; 2 -  $\alpha = 1,00^\circ$ ; 3 -  $\alpha = 2,75^\circ$

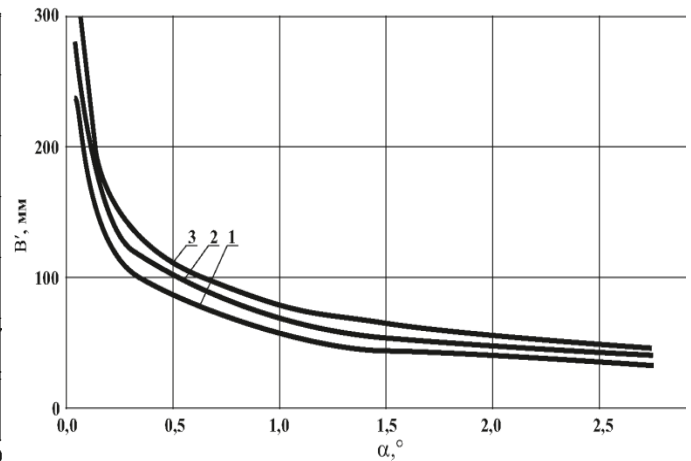


Рисунок 7 - Залежності  $B' = f(\alpha, d_k)$

1 -  $d_k = 300$  мм; 2 -  $d_k = 400$  мм; 3 -  $d_k = 500$  мм

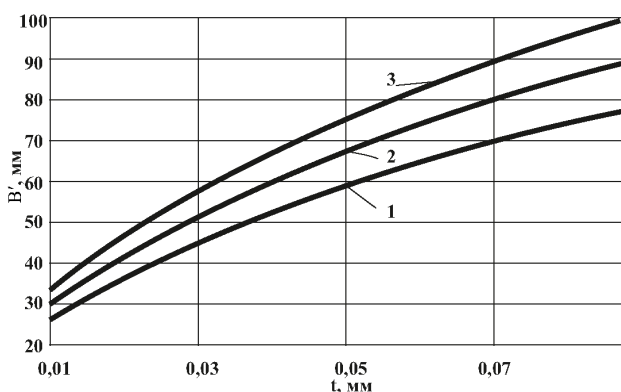


Рисунок 5 - Залежності  $B' = f(t, d_k)$

1 -  $d_k = 300$  мм; 2 -  $d_k = 400$  мм; 3 -  $d_k = 500$  мм

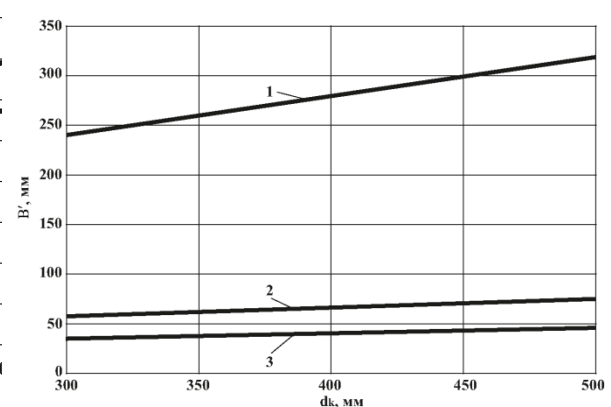


Рисунок 8 - Залежності  $B' = f(d_k, \alpha)$

1 -  $\alpha = 0,05$ ; 2 -  $\alpha = 1,00$ ; 3 -  $\alpha = 2,75$

Одним із фізичних параметрів процесу обробки, що визначають площу контакту РПК з деталлю, є довжина дуги ( $L$ ) контакту РПК із деталлю (див. рис. 2). Ми встановили, що залежність, яка пов'язує цей параметр із умовами обробки, має вигляд

$$L = 15,24 \cdot t^{0,50} \cdot \alpha^{-0,50} \cdot d_{\max}^{0,50}.$$

Аналіз формули (5) показує, що в міру зменшення глибини шліфування та збільшення кута нахилу і діаметра круга значення ширини поступово наближається до довжини дуги контакту круга з деталлю.

**Висновки.** Таким чином, виконані дослідження дозволили встановити таке:

1. За рахунок зміни величини кута попереднього нахилу осі шпинделя можна в достатньо широких межах регулювати значення ширини та довжини

дуги контакту РПК із деталлю. При цьому значно впливають на ширину контакту такі параметри процесу, як глибина обробки та діаметр круга.

2. Під час попередньої обробки значення поперечної подачі повинно узгоджуватися з величиною ширини контакту РПК із деталлю, а на чистовому етапі шліфування - з допустимою висотою залишкових гребінців на оброблюваній поверхні деталі.

3. У міру зменшення глибини шліфування та збільшення кута нахилу і діаметра круга значення ширини поступово наближається до довжини дуги контакту круга з деталлю.

У подальшому становлять певний інтерес дослідження щодо встановлення впливу умов процесу торцевого шліфування з нахилом осі шпинделя на такий параметр, як площа контакту РПК із деталлю як під час обробки на «прохід», так і при багатопрохідному шліфуванні.

## Investigation of contact width of wheel working surface with workpiece at flat face grinding with sloped spindle axis

Ivan N. Pyzhov<sup>1</sup>), Vitaly G. Klimenko<sup>2</sup>)

<sup>1</sup>) National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 21, Frunze Str., Kharkiv, Ukraine, 61002;

<sup>2</sup>) Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, 24, Pershotravnevyi avenue, Poltava, Ukraine, 36011.

The investigations that make it possible to reveal some features of the formation of a surface being machined at multipass flat face grinding with the preliminary inclination of the spindle axis are carried out. The role of the factors in this process such as the angle of inclination of the spindle axis, grinding depth, wheel diameter and cross-feed are established. Taking into account the importance of cross-feed, the value of which at the stage of pre-machining is to ensure the absence of the areas on the machined surface, which will remain unaffected with the wheel, and at the stage of finishing is to ensure the desired height of residual ridges, it is proposed to harmonize the value of cross-feed with the value of the width of the contact of the wheel cutting surface with the workpiece. The investigations using computer-aided geometric simulation are carried out, the result is an empirical dependence of the contact width of the wheel cutting surface with the workpiece on machining conditions and thus it is possible to solve the problem of the determination of wanted value of cross-feed. All this make it possible to improve the process of flat face grinding and thereby to expand its technological capabilities.

**Keywords:** concavity, computer-aided modeling, residual ridges, cross-feed, grinding depth, wheel diameter.

## Исследование ширины контакта режущей поверхности круга с деталью при плоском торцевом шлифовании с наклоном оси шпинделя

И. Н. Пыжов<sup>1</sup>), В. Г. Клименко<sup>2</sup>)

<sup>1</sup>) Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002;

<sup>2</sup>) Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка, Первомайский проспект, 24, г. Полтава, Украина, 36011

Выполнены исследования, позволившие выявить некоторые особенности формирования обрабатываемой поверхности при многопроходном плоском торцевом шлифовании с предварительным наклоном оси шпинделя. Установлена роль в этом процессе таких факторов, как угол наклона оси шпинделя, глубина шлифования, диаметр круга и поперечная подача. Учитывая важную роль поперечной подачи, значение которой на этапе предварительной обработки должно гарантированно обеспечивать отсутствие на обработанной поверхности участков, которые будут оставаться незатронутыми кругом, а на этапе чистовой отделки нужной высоты остаточных гребешков предложено согласовы-

вать значения поперечной подачи с размером ширины контакта режущей поверхности круга с деталью. С использованием геометрического компьютерного моделирования были проведены исследования, следствием которых установлена эмпирическая зависимость, связывающая ширину контакта режущей поверхности круга с деталью с условиями обработки и, таким образом, решена задача определения нужной величины поперечной подачи. Все это позволяет усовершенствовать процесс плоского торцевого шлифования и тем самым расширить его технологические возможности.

**Ключевые слова:** вогнутость, компьютерное моделирование, остаточные гребешки, поперечная подача, глубина шлифования, диаметр круга.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лурье Г. Б. Шлифовальные станки и их наладка / Г.Б. Лурье, В.Н. Комиссаржевская. – М. : Высшая школа, 1972. – 416 с.
2. Наерман М. С. Справочник молодого шлифовщика / М.С. Наерман. М. : Высшая школа, 1985. - 207 с.
3. Лоскутов В. В. Шлифовальные станки / В.В. Лоскутов. - М. : Машиностроение. --1976. – 191 с.
4. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х т. Т.1 / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Суслова, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 5-е изд., исправл. – М. : Машиностроение-1, 2003. – Т. 1. - 944 с.
5. Маталин А. А. Технология машиностроения / А.А. Маталин. - Л.: Машиностроение, 1985. - 496 с.
6. Грабченко А.И. Компьютерное моделирование зоны контакта торцевого круга с деталью на плоскошлифовальных верстаках / А. И. Грабченко, И. М. Пижов, В. Г. Клименко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи ро-

звитку : матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ, - 2013. – С. 62.

7. Клименко В. Г. Вдосконалення процесу плоского торцевого шліфування / В. Г. Клименко, І. М. Піжов. // Високі технології в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХП», 2013. - Вип. 1 (23). – С. 68-79.

8. Піжов І. Н. Дослідження особливостей формування відхилень від площинності при плоскому торцевому шліфуванні / І. М. Піжов, В. Г. Клименко // Вісник СевНТУ : зб. наук. пр. Вип. 151/2014. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. - Севастополь, 2014. - С. 134-139.

9. Піжов І. М. Деякі особливості багатопрохідного плоского торцевого шліфування / І. М. Піжов, В. Г. Клименко // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков, - 2014. - Вып. 84. - С. 201-210.

## REFERENCES

1. Lur'e, G. B., & Komissarzhevskaya V. N. (1972). Shlifoval'nye stanki i ih naladka [Grinding machines and their adjustment]. Moskva. Vysshaya shkola (in Russian).
2. Naerman, M. S. (1985). Spravochnik molodogo shlifovshchika [Handbook for beginners in grinding]. Moskva. Vysshaya shkola (in Russian).
3. Loskutov, V. V. (1976). Shlifoval'nye stanki [Grinding machines]. Moskva. Mashinostroenie (in Russian).
4. Dal'skij, A. M., Suslova, A. G., Kosilova, A. G., & Mesheryakov, R. K. (2003). Spravochnik tehnologa mashinostroitel'ya [Manual Machinist technologist]. Moskva. Mashinostroenie-1 (in Russian).
5. Matalin, A. A. (1985). Tehnologiya mashinostroeniya [Mechanical Engineering Technology]. Moskva. Mashinostroenie (in Russian).
6. Grabchenko, A. I., Pizhov, I. M., & Klimenko, V. G. (2013). Komp'yuternye modelyuvannya zoni kontaktu tortseвого kruga z detallyu na ploskoshlifoval'nykh verstatakh [Computer modeling of the contact area of a circle with the mechanical parts on surface grinding machines]. Heavy engineering. Problems and prospects of development. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii. (4-6 iyunya 2013 hoda) - proceedings of the international scientific conference (p. 62). Krama-

tors'k (in Ukrainian).

7. Klimenko, V. G., & Pizhov, I. N. (2013). Vdoskonalennya protsesu ploskogo tortseвого shlifuvannya [Improving the process of flat face grinding]. Visoki tehnologiyi v mashinobuduvanni. - High technologies in mechanical engineering: collection of scientific papers. Harkiv, 1 (23), 68-79 (in Ukrainian).

8. Pizhov, I. N., & Klimenko, V. G. (2014). Doslidzhennya osoblyvostej formuvannya vidhilen' vid ploskosti pri ploskomu tortseвому shlifuvanni [Investigation of the features of formation of flatness for flat face grinding]. Visnik SevNTU. Seriya: Mashinopriladobuduvannya ta transport: sbornik nauchnykh trudov. - Bulletin of the SevNTU. Series: mechanical engineering and transport: collection of scientific papers. Sevastopol', 151/2014, 134-139 (in Ukrainian).

9. Pyzhov, I. N., & Klimenko, V. G. (2014). Deiaki osoblyvosti bagatoprohidnogo ploskogo torcheвого shlifuvaniia. [Some features of the multistep flat face grinding]. Rezanie & instrument v tekhnologicheskikh sistemakh. Mezhdunarodnyi nauch. tekhn. sbornik. - Cutting tool and process systems: Intern. scientific and technical collection. Kharkov, 84, 201-210 (in Ukrainian).