

УДК 621.923

І. М. Пижов, д-р техн. наук, А. І. Грабченко, д-р техн. наук, Харків, Україна,  
В. Г. Клименко, Полтава, Україна

## **ДО РОЗРАХУНКУ ШИРИНИ ЗОНИ КОНТАКТУ РПК З ДЕТАЛЛЮ ПРИ ПЛОСКОМУ ТОРЦЕВОМУ ШЛІФУВАННІ З НАХИЛОМ ОСІ ШПИНДЕЛЯ**

*Виконано теоретичні дослідження, що дозволили отримати наближену аналітичну залежність для визначення ширини зони контакту РПК з деталлю при плоскому торцевому шліфуванні шліфування з попереднім нахилом осі шпинделя. Встановлено роль у цьому процесі таких факторів як кут попереднього нахилу осі шпинделя, глибина шліфування та діаметр круга. Це дає можливість коректного визначення величини поперечної подачі (при багатопрохідній схемі обробки) яка, як відомо, повинна узгоджуватися зі значенням ширини контакту РПК з деталлю. Це гарантовано забезпечує відсутність на обробленій поверхні ділянок, які будуть залишатися незачепленими кругом. При шліфуванні «на прохід» отримана теоретична залежність дає можливість визначати умови обробки з урахуванням допустимого значення віхилання форми плоскої поверхні. Все це дозволяє вдосконалити процес плоского торцевого шліфування і тим самим розширити його технологічні можливості.*

*Ключові слова: плоске торцеве шліфування, ріжуча поверхня круга, кут нахилу осі шпинделя, діаметр круга, глибина шліфування, геометричне моделювання, схема шліфування.*

*Выполнены теоретические исследования, позволившие получить приближенную аналитическую зависимость для определения ширины зоны контакта РПК с деталью при плоском торцевом шлифовании шлифования с предварительным наклоном оси шпинделя. Установлена роль в этом процессе таких факторов как угол предварительного наклона оси шпинделя, глубина шлифования и диаметр круга. Это дает возможность корректного определения величины поперечной подачи (при многопроходной схеме обработки), которая, как известно, должна согласовываться со значением ширины контакта РПК с деталью. Это гарантированно обеспечивает отсутствие на обработанной поверхности участков, которые будут оставаться незатронутыми кругом. При шлифовании «на проход» полученные теоретические зависимости дают возможность определять условия обработки с учетом допустимого значения отклонения формы плоской поверхности. Все это позволяет совершенствовать процесс плоского торцевого шлифования и тем самым расширить его технологические возможности.*

*Ключевые слова: плоское торцевое шлифование, режущая поверхность круга, угол наклона оси шпинделя, диаметр круга, глубина шлифования, геометрическое моделирование, схема шлифования.*

*Theoretical researches that have made it possible to obtain the analytical dependences connecting the parameters of contact area of wheel cutting surface with workpiece such as length, width, arc length and form deviation of flat surface under conditions of flat face grinding with preliminary slope of spindle axis have been carried out. In this process the role of the factors such as the angle of preliminary slope of spindle axis, grinding depth and the diameter of grinding wheel has been established. This makes it possible to correctly determine the value of the transverse feed (when multiple-pass processing) which, as it is known, should be conformed to the value of the contact width of the wheel cutting surface with workpiece. It guarantees that on the treated surface there will be no areas unaffected with the wheel. In case of through grinding the obtained theoretical dependences make it*

possible to determine the processing conditions, taking into account the allowable values of form deviation of flat surface. All this makes it possible to improve the process of flat face grinding and thereby expand its technological capabilities.

Keywords: Flat face grinding, the cutting surface of the circle, the angle of inclination of the spindle axis, the diameter of the circle, the depth of grinding, geometric modeling, the grinding scheme.

**Вступ.** Перспективність плоскої схеми шліфування підтверджується тим, що значна кількість деталей у машинобудуванні мають плоскі поверхні [1] і підлягає різним видам обробки (обдирне, попереднє, чистове і прецизійне) на плоскошліфувальних верстатах. Значне місце в цьому процесі займає плоске торцеве шліфування, яке має ряд переваг у порівнянні зі схемою, яка базується на застосуванні периферійних шліфувальних кругів [2-5]. Процес плоского торцевого шліфування, який виконується як на верстатах з вертикальним, так і з горизонтальним розташуванням шпинделя, може бути реалізований як на «прохід», так і за багатопрохідною схемою обробки. Ці схеми мають особливості, які треба враховувати при розробці технологічних операцій плоского шліфування.

**Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень та публікацій.** Одним з підходів, який забезпечує зменшення ступеня нагріву, а отже, і деформації оброблюваної заготовки при шліфуванні (особливо зі збільшеними глибинами  $t$  обробки) за рахунок зменшення площі контакту різальної поверхні круга (РПК) з деталлю є попередній нахил осі шпинделя на кут  $\alpha$  [2-5]. В залежності від напрямку поздовжньої подачі процес може бути здійснений як за звичайною ( $S_{\text{под.зв.}}$ ), так і глибинною ( $S_{\text{под.гл.}}$ ) схемами.

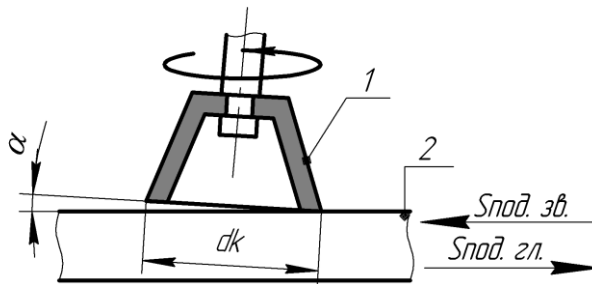


Рисунок 1 – Схема плоского торцевого шліфування з нахилом осі шпинделя.  
1 – торцевий круг; 2 – деталь

У даній роботі розглядається глибинна схема хоча багато зроблених висновків стосується і звичайної схеми. Нахил осі шпинделя на кут  $\alpha$  (рис. 1) призводить до зміни низки параметрів зони контакту РПК з деталлю, а також впливає на формування оброблювальної поверхні виробу. До параметрів зони контакту при застосуванні глибинної схеми можна віднести (рис. 2)

довжину  $W'$ , довжину дуги  $L$  та ширину  $B'$  контакту РПК з деталлю, а також висоту залишкових гребінців (в даній роботі це питання не розглядається) та увігнутість  $\Delta$  (як приватний випадок відхилення від площинності).

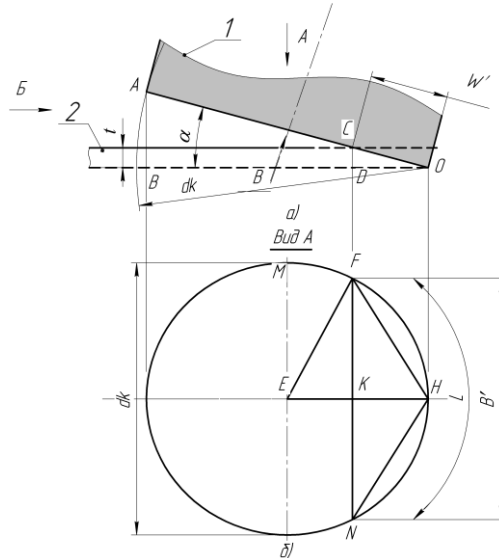


Рисунок 2 – Схема для розрахунку параметрів зони контакту РПК з деталлю

Для встановлення площі контакту РПК з деталлю потрібно знати ширину зони контакту. Для її визначення вже були проведені теоретичні дослідження як з використанням геометричного комп'ютерного моделювання в середовищі «КОМПАС» [6], так і шляхом розрахунків на базі методів аналітичної геометрії [8]. В першому випадку були отримані ступенева [7], а в другому аналітична [9], залежності для визначення ширини зони контакту. Враховуючи той факт, що значення кутів нахилу осі шпинделя не перевищують  $3^\circ$ , завдяки чому проекція шліфувального круга на основну площину (еліпс) не повинна значно відрізнятись від кола, представляє практичний інтерес отримання наближеної формули для визначення ширини зони контакту і провести порівняння отриманих даних з формулою для точних розрахунків.

**Мета досліджень.** Метою досліджень є встановлення наближеної залежності для розрахунку ширини зони контакту РПК з деталлю в умовах незначних кутів попереднього нахилу осі обертання шпинделя при плоскому торцевому шліфуванні.

**Основні матеріали досліджень.** Поставлена задача була вирішена нами шляхом теоретичних досліджень з використанням методів аналітичної геометрії [9-10]. Правильність отриманих аналітичних залежностей перевіряли шляхом комп'ютерного геометричного моделювання [6]. При виконанні досліджень прийнято ряд допущень [6-7] серед яких була і незначність впливу процесу самозаточування [11] абразивних зерен на знос РПК, що має реальне місце при використанні твердих абразивних кругів.

Як було показано в роботі [9] довжина зони контакту РПК з деталлю підкоряється залежності (рис. 2):

$$W' = \frac{t}{\sin \alpha}. \quad (1)$$

Для встановлення аналітичної залежності, яка пов'язує ширину  $B'$  з умовами обробки, скористаємося рисунком 2. Розрахунки проводилися у припущенні, що значення довжини контакту  $W'$  не перевищує половину діаметру круга.

На рисунку 2 б (вид А) показано еліпс як проекцію на горизонтальну площину окружності, що нахилена під кутом  $\alpha$  (рис. 2 а) [9]. Відрізки  $FN$  та  $FK$  являють собою ширину ( $B'$ ) та половину ширини ( $B'/2$ ) контакту РПК з деталлю відповідно.

З прямокутного трикутника  $EFK$  маємо, що:

$$FK = \frac{B'}{2} = \sqrt{EF^2 - EK^2} \quad (2)$$

Враховуючи невеликі значення кута  $\alpha$  (при цьому більша  $ME$  і менша  $EH$  піввісі еліпса не суттєво відрізняються одне від одного, а, отже, і від половини діаметра круга  $d_k$ , рис. 2.), можна з достатньою точністю прийняти відрізок  $EF$  таким, що приблизно дорівнює половині суми більшої та меншої півосей (або однієї з них), тобто:

$$EF = \frac{EM + EH}{2}. \quad (3)$$

Як видно з рисунка (рис. 2 б) більша піввісь еліпса ( $EM$ ) має довжину, яка дорівнює половині діаметру круга, тобто  $EM = \frac{d_k}{2}$ .

Відрізок  $EK$  можна визначити наступним чином:

$$EK = EM - KH. \quad (4)$$

Відрізок  $EH$  уявляє собою меншу піввісь еліпсу ( $b$ ) і може бути визначений з прямокутного трикутника  $AOB$  (рис. 2 а) як:

$$EH = \frac{OB}{2} = \frac{d_k}{2} \cdot \cos \alpha. \quad (5)$$

Тоді вираз (3) з урахуванням (5) прийме вигляд:

$$EF = \frac{\frac{d_k}{2} + \frac{d_k}{2} \cdot \cos \alpha}{2} = \frac{d_k(1 + \cos \alpha)}{4}. \quad (6)$$

У свою чергу відрізок  $KH$  може бути визначений з прямокутного трикутника  $COD$ :

$$KH = OD = W' \cdot \cos \alpha = \frac{t}{\sin \alpha} \cdot \cos \alpha = \frac{t}{tg \alpha}. \quad (7)$$

Підставляючи вирази (5) та (7) до формули (4) знаходимо відрізок  $EK$ :

$$EK = \frac{d_k}{2} \cdot \cos \alpha - \frac{t}{tg \alpha}, \quad (8)$$

З урахуванням виразів (6) та (8) залежність (2) буде мати вигляд:

$$\frac{B'}{2} = \sqrt{\frac{(d_k \cdot (1 + \cos \alpha))^2}{16} - \left(\frac{d_k}{2} \cdot \cos \alpha - \frac{t}{tg \alpha}\right)^2}.$$

Остаточно можна записати, що:

$$B' = 2 \cdot \sqrt{\frac{(d_k \cdot (1 + \cos \alpha))^2}{16} - \left(\frac{d_k}{2} \cdot \cos \alpha - \frac{t}{tg \alpha}\right)^2}. \quad (9)$$

На основі даних роботи [9] точне рівняння для визначення ширини  $B'$  має вигляд:

$$B' = \sqrt{d_k^2 - \frac{4 \cdot \left(\frac{d_k}{2} \cdot \cos \alpha - \frac{t}{tg \alpha}\right)^2}{\cos^2 \alpha}}. \quad (10)$$

**Висновки.** Зроблені порівняння результатів розрахунків параметра  $B'$  за формулами (9) та (10) відповідно дозволили зробити висновок, що у діапазоні кутів нахилу осі обертання шпинделя  $\alpha \leq 1,5^\circ$  ( $t = 0,01 - 0,1$  мм,  $d_k = 150 - 500$  мм) відносна похибка між даними отриманими за наближеною формулою (9) та точною формулою (10) не перевищує 5%. При подальшому збільшенні значення кута  $\alpha$  похибка може перевищувати загально прийняте в технології машинобудування значення  $\delta = 5\%$ .

**Список використаних джерел:** [1] *Маталин А. А.* Технология машиностроения / *А. А. Маталин.* – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с. [2] *Лурье Г. Б.* Шлифовальные станки и их наладка / *Г. Б. Лурье., В. Н. Комиссаржевская.* – М.: Высшая школа, 1972. – 416с. [3] *Наерман М. С.* Справочник молодого шлифовщика. / *М. С. Наерман.* М.: Высшая школа, 1985. – 207 с. [4] *Лоскутов В. В.* Шлифовальные станки / *В. В. Лоскутов.* – М.: Машиностроение. – 1976. – 191 с. [5] Справочник технолога машиностроителя. В 2-х т. Т.1 / Под ред. *А. М. Дальского, А. Г. Сулова, А. Г. Косиловой, Р. К. Мецереякова.* – 5-е изд., исправл. – М.: Машиностроение-1, 2003. – 944 с. [6] *Грabenко А. І.* Дослідження ширини контакту різальної поверхні круга з деталлю при плоскому торцевому шліфуванні з нахилом осі шпинделю / *А. І. Грabenко, І. М. Піжов, В. Г. Клименко* // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: 2013. – С. 62. [7] *Пижов І. М.* Дослідження ширини контакту різальної поверхні круга з деталлю при плоскому торцевому шліфуванні з нахилом осі шпинделю / *І. М. Піжов, В. Г. Клименко* // Журнал інженерних наук : наук. журн. / Сум. держ. ун-т. – Суми: Вид-во СумДУ. Том 2. №1. – 2015. – С. А10-А15. [8] *Александров П. С.* Лекции по аналитической геометрии / *П. С. Александров.* – М.: Главная редакция физматлитературы, 1968. – 911 с. [9] *Пижов І. М.* Теоретичні дослідження лінійних параметрів зони контакту різальної поверхні круга із деталлю та увігнутості при плоскому торцевому шліфуванні з нахилом осі шпинделя / *І. М. Піжов, В. Г. Клименко* // Журнал інженерних наук : наук. журн. / Сум. держ. ун-т. – Суми: Вид-во СумДУ. Том 3. № 1. – 2016. – С. А9-А14. [10] *Выгодский М. Я.* Справочник по элементарной математике / *М. Я. Выгодский.* – М.: АСТ: Астрель, 2006. – 509 с. [11] *Федоренко Д. О.* Динамическое 3D моделирование процесса шлифования в режиме самозатачивания / *Д. О. Федоренко, Д. В. Криворучко, В. А. Федорович* // Різання та інструмент в технологічних системах. – 2012. – Вып. 82 – 2012. – С. 301 – 307.

**Bibliography (transliterated):** [1] *Matalin A. A.* Tehnologija mashinostroenija / *A.A. Matalin.* - L.: Mashinostroenie, 1985. – 496 s. [2] *Lur'e G.B.* Shlifoval'nye stanki i ih naladka / *G.B. Lur'e, V.N. Komissarzhevskaja.* – M.: Vysshaja shkola, 1972. – 416s. [3] *Naerman M.S.* Spravochnik mladogo shlifovshhika. / *M.S. Naerman.* M.: Vysshaja shkola, 1985. -207 s. [4] *Loskutov V.V.* Shlifoval'nye stanki / *V.V. Loskutov.* – M.: Mashinostroenie. - 1976. –191 s. [5] Spravochnik tehnologa mashinostroitelja. V 2-h t. T.1 / Pod red. *A.M. Dal'skogo, A.G. Suslova, A.G. Kosilovoj, R.K. Meshherjakova.* – 5-e izd., ispravl. – M.: Mashinostroenie-1, 2003. – 944 s. [6] *Grabchenko A. I.* Doslidzhennja shirini kontaktu riral'noj poverhni krugu z detallju pri ploskomu torcevomu shlifuvanni z nahilom osi shpindelju / *A.I. Grabchenko, I. M. Pizhov, V. G. Klimenko* // Vazhke mashinobuduvannja. Problemi ta perspektivi rozvitku. Materiali mizhnarodnoї naukovo-tehnichnoї konferencii. – Kramators'k: 2013. – S. 62. [7] *Pyzhov I. M.* Doslidzhennja shirini kontaktu riral'noj poverhni krugu z detallju pri ploskomu torcevomu shlifuvanni z nahilom osi shpindelju / *I.M. Pyzhov, V.G. Klimenko* // Zhurnal inzhenernyh nauk : nauk. zhurn. / Sum. derzh. un-t. – Sumi: Vid-vo SumDU. Tom 2. №1. – 2015. – S. A10-A15. [8] *Aleksandrov P. S.* Lekcii po analiticheskoi geometrii / *P. S. Aleksandrov.* - M.: Glavnaja redakcija fizmatliteratury, 1968. – 911 s. [9] *Pyzhov I.M.* Teoretichni doslidzhennja linijnih parametriv zoni kontaktu riral'noj poverhni kruga iz detallju ta uvignutosti pri ploskomu torcevomu shlifuvanni z nahilom osi shpindelja / *I.M. Pizhov, V.G. Klimenko* // Zhurnal inzhenernyh nauk : nauk. zhurn. / Sum. derzh. un-t. – Sumi: Vid-vo SumDU. Tom 3. № 1. – 2016. – S. A9-A14. [10] *Vygodskij M. Ja.* Spravochnik po jelementarnoj matematike / *M. Ja. Vygodskij.* - M.: AST: Astrel', 2006. – 509 s. [11] *Fedorenko D. O.* Dinamicheskoe 3D modelirovanie processa shlifovanija v rezhime samozatachivanija / *D.O. Fedorenko, D.V. Krivoruchko, V.A. Fedorovich* // Rizzannja ta instrument v tehnologichnih sistemah. – 2012. – Vyp. 82 – 2012. – S. 301-307.