

УДК 621.923

І.М. Піжов, д-р техн. наук, Харків, Україна,  
В.Г. Клименко, Полтава, Україна

## **ДЕЯКІ СОБЛИВОСТІ БАГАТОПРОХІДНОГО ПЛОСКОГО ТОРЦЕВОГО ШЛІФУВАННЯ**

*Виконано дослідження, що дали можливість виявити деякі особливості формування макро- і мікропрофілю оброблюваної поверхні при багатопрохідному плоскому торцевому шліфуванні з нахилом осі шпинделя. Встановлено роль у цьому процесі таких факторів, як кут нахилу осі шпинделя, діаметр круга і поперечна подача, і запропонована емпірична залежність, що зв'язує з ними висоту залишкових гребінців. Це дозволяє розширити уявлення про технологічні можливості процесу плоского торцевого шліфування.*

*Выполнены исследования, которые дали возможность выявить некоторые особенности формирования макро- и микропрофиля обрабатываемой поверхности при многопроходном плоском торцевом шлифовании с наклоном оси шпинделя. Установлена роль в этом процессе таких факторов, как угол наклона оси шпинделя, диаметр круга и поперечная подача и предложена эмпирическая зависимость, связывающая с ними высоту остаточных гребешков. Это позволяет расширить представление о технологических возможностях процесса плоского торцевого шлифования.*

*The studies that made it possible to identify some features of the formation of work surface macro-and microprofile under multiple-pass face flat grinding with inclination of the center line of spindle are fulfilled. A feature of this grinding process is the formation of residual ridges on the surface of the workpiece. This is different from through-feed grinding processing. Theoretically, depending on the magnitude of the cross-feed, residual ridges may be defined as the surface roughness and form deviation. In the latter case there is a such variant of form deviations as concavity. It is found that the value of a cross feed should be prescribed as the part of width of the contact between the working surface of the face wheel and workpiece which is formed in one pass with the concrete depth of grinding. Computer modeling of the contact area of the working surface of the grinding wheel with the workpiece in the COMPASS software environment has allowed to reveal the character of influence of processing conditions on the magnitude of residual ridges. Role has been installed for such factors of this process as the inclination angle of the center line of spindle, the diameter of the wheel and cross feed, and it has been proposed an empirical dependence linking the height of residual ridges with them. It is shown that the height of the residual ridges associated with a diameter of the wheel and cross feed by the degree dependences. The dependence on the inclination of the center line of spindle is linear. This allows expand the understanding of the technological capabilities of the flat face grinding process.*

**Вступ.** Об'єктом дослідження був обраний процес плоского торцевого шліфування, який виконується як на верстатах з вертикальним, так і з горизонтальним розташуванням шпинделя. Такий процес може бути реалізований як по одно - так і багатопрохідній схемах обробки. Плоске шліфування по глибинній схемі може здійснюватися замість попередньої обробки лезовим інструментом, що доцільно при обробці заготовок, оброблюваність яких лезовими інструментами викликає певні труднощі. При

цьому абразивний (алмазний) круг врізається в заготовку на значну глибину при невеликій поздовжній подачі (0,5-3 м/хв.). При багатопрхідному шліфуванні глибина різання, як правило, невелика (або середня), а швидкість поздовжньої подачі досягає 15-20 м/хв. [1].

Перспективність плоскої схеми шліфування підтверджується тим, що в даний час близько 20% деталей у машинобудуванні мають плоскі поверхні й підлягають різним видам обробки (обдирне, попереднє, чистове і прецизійне) на плоскошліфувальних верстатах [2].

Для зменшення ступеня нагріву, а отже, і деформації оброблюваної заготовки при шліфуванні зі збільшеними глибинами використовують різні технічні прийоми. Зокрема застосовують шліфувальні круги з переривчастою робочою поверхнею на самозагострювальних керамічних і бакелітових зв'язках [1]; використовують круги із суцільною, але вузькою робочою поверхнею; періодично виконують піднутрення робочої поверхні кругів (РПК) з широкою робочою поверхнею алмазнимиправлячими інструментами; використовують прогресивні конструкції пристроїв, призначених для подачі технологічної рідини (ТР) в зону шліфування [5] [6]; удосконалюють процес правки РПК алмазними олівцями [7], [8]; ведуть обробку в суцільному шарі ТР [3], [4]; використовують попередній нахил осі шпинделя для зменшення площі контакту РПК з деталлю [1] та ін.

Такі прийоми часто дозволяють технологу вирішити ті чи інші завдання щодо зниження теплонапруженості процесу шліфування.

Позитивним моментом шліфування з нахилом осі шпинделя (рис. 1) є досить проста можливість керування площею зони контакту РПК з оброблюваною поверхнею, а значить і термосиловою напруженістю процесу шліфування.

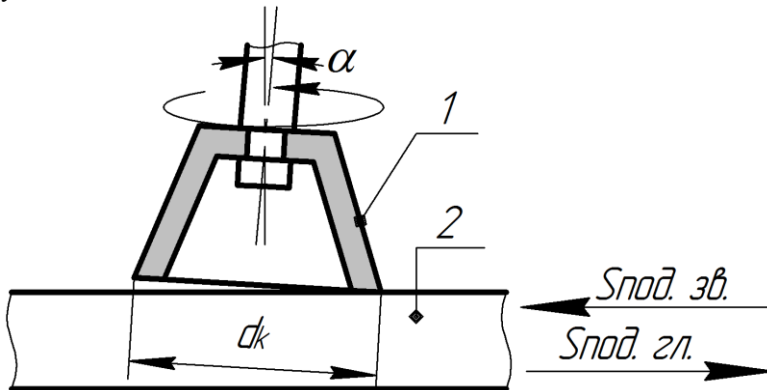


Рисунок 1-Схема плоского торцевого шліфування з нахилом осі шпинделя  
1-торцевий круг; 2-деталь

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. Ефект зниження температури може посилюватися за рахунок того, що в даному випадку створюються більш сприятливі умови для подачі ТР у зону контакту РПК з деталлю. Недоліком розглянутого процесу є те, що при нахилі РПК неминуче підвищення шорсткості і відхилень форми поверхні деталі. У даних умовах має місце окремий випадок відхилення від площинності – увігнутість. Тому обробка з підвищеними значеннями кутів нахилу може застосовуватися при незначних вимогах до шорсткості і відхилень форми, тобто при попередньому (чорновому) шліфуванні. У міру посилення зазначених вимог величину кута  $\alpha$  потрібно зменшувати і при прецизійному шліфуванні приймати рівною нулю [1].

У зв'язку з викладеним можна припустити, що ще одним технічним прийомом, який дозволить істотно знизити площу контакту РПК з деталлю, є використання багатопрхідної схеми торцевого шліфування з нахилом осі шпинделя, тобто вести обробку з додатковою поперечною подачею.

**Мета досліджень.** Метою даної роботи є вдосконалення процесу плоского торцевого шліфування за рахунок виявлення технологічних особливостей формування макро- і мікропрофілю оброблюваної поверхні при багатопрхідній обробці.

**Основний зміст роботи.** Наші дослідження показали, що значний теоретичний і практичний інтерес представляє схема плоского торцевого шліфування (рис. 1), коли нахил осі шпинделя на кут  $\alpha$  здійснюється у бік здійснення поздовжньої подачі стола верстата [4]. При цьому відбувається природний захист зовнішньої кромки круга за умови, що подача на глибину здійснюється таким чином, щоб першою вступала в роботу РПК з піднятого боку круга. Аналіз схеми торцевого шліфування на прохід (з нахилом осі шпинделя) показав, що в разі обробки широких деталей площа контакту РПК з оброблюваною поверхнею може мати достатньо великі значення, особливо при використанні кругів із суцільним робочим шаром.

У зв'язку з цим рішення проблеми може бути пов'язано із застосуванням багатопрхідної схеми обробки. Природно, при цьому буде збільшуватися кількість проходів, що в свою чергу призведе до зниження продуктивності обробки. Враховуючи, що на практиці все ж виникає необхідність у багатопрхідній обробці з певними, у тому числі і малими поперечними подачами, навіть на шкоду продуктивності, розглянемо докладніше його технологічні особливості. Це сприятиме розширенню технологічних можливостей процесу плоского торцевого шліфування в цілому.

Для досліджень процесу формування макро- і мікрорельєфу оброблюваної поверхні нами було використано комп'ютерне моделювання в середовищі КОМПАС [9]. При цьому застосовувався чисто геометричний підхід, тобто вважалося, що глибина різання не впливає на формування

профілю деталі, з одного боку, і не враховувався можливий впливу явищ, пов'язаних з проявом дії фізичного чинника (наприклад, пружне відновлення і т.д.), з іншого [10]. При моделюванні також вважали, що зовнішній діаметр торцевого круга не змінюється в міру його зносу (наприклад, абразивні круги форм ЧЦ, ПВ, ПВДС ГОСТ 2424-83, круги з надтвердих матеріалів форми 6А2 ГОСТ 16170-81Е, 9А3 ГОСТ 16171-81Е, 12А2-45° ГОСТ 16172-81Е), а у якості оброблюваних приймалися традиційні матеріали, наприклад, сталь та тверді сплави.

При багатопрхідному шліфуванні на оброблюваній поверхні формуються ділянки з увігнутістю і залишковими гребінцями певної висоти. При цьому й увігнутість, і залишкові гребінці характеризуються параметром  $H$  (рис. 2). Це можна вважати відмінними ознаками такого процесу, порівняно з обробкою на прохід. На рисунку контур шліфувального круга умовно показаний у вигляді кола, а для зручності прийнято, що при першому проході вісь круга збігається з одним із країв деталі.

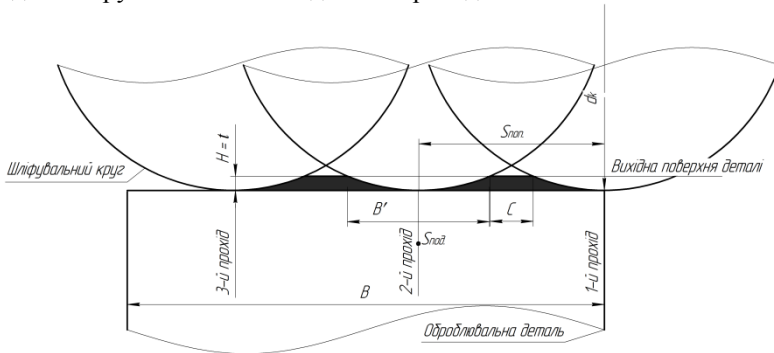


Рисунок 2 – До особливостей формування оброблюваної поверхні при багатопрхідному торцевому шліфуванні ( $S_{\text{поп.}} > B'$ )

Слід зазначити, що хоча глибина різання безпосередньо і не впливає на зміни параметра  $H$ , її роль проявляється в обмеженні їх граничних значень. Величину  $H$  визначають такі чинники, як діаметр круга  $d_k$ , кут нахилу шпинделя  $\alpha$  і поперечна подача  $S_{\text{поп.}}$ . Теоретично поєднання їх величин забезпечує знаходження параметра  $H$  в інтервалі значень  $0 \leq H \leq t$ . Величину поперечної подачі  $S_{\text{поп.}}$  зручно виражати в частках ширини оброблюваної поверхні деталі. При цьому необхідно за основу брати не всю ширину  $B$ , а її частину  $B'$ , яка утворюється при одному проході з глибиною шліфування  $t$ , що, як буде показано нижче, дозволяє внести визначеність при виборі максимального значення  $S_{\text{поп.}}$ . Як видно з рис. 1, якщо величина поперечної подачі буде більша зазначеної вище частини ширини деталі  $B'$ ,

тобто  $S_{\text{ноп.}} > B'$ , то висота  $H$  буде максимальною. У даному випадку маємо, що  $H = H_{\text{max}} = t$ . При цьому характерним є те, що на обробленій поверхні будуть залишатися незачеплені кругом ділянки шириною  $C$ , що недопустимо (якщо тільки це не передбачено кресленням). Відповідно, для усунення цього недоліку значення поперечної подачі має бути обмеженим шириною  $B'$ , тобто повинна дотримуватись умова:  $S_{\text{ноп.}} \leq B'$ . Випадок, коли  $S_{\text{ноп.}} = B'$  (рис. 3), є граничним. Тут, як і в попередньому прикладі,  $H = H_{\text{max}} = t$ , однак ділянки з необробленою поверхнею будуть відсутніми.

Як видно з наведених вище рисунків, формування оброблюваної поверхні при багатопрхідному шліфуванні має деяку схожість з утворенням шорсткості при обробці лезовим інструментом, у разі, коли в роботі бере участь кругове перехідне лезо певного радіуса [10]. Відмінність полягає в тому, що якщо при точінні поздовжня подача здійснюється безперервно, то при багатопрхідному шліфуванні торцевим кругом її роль як би виконує поперечна подача, яка відбувається періодично, тобто на подвійний хід столу верстата.

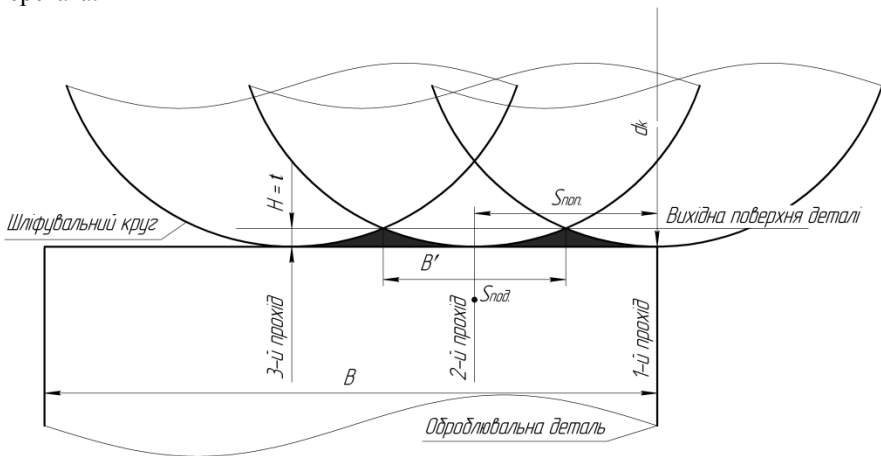


Рисунок 3 – До особливостей формування оброблюваної поверхні при багатопрхідному торцевому шліфуванні ( $S_{\text{ноп.}} = B'$ )

Теоретично, у залежності від величини подачі  $S_{\text{ноп.}}$ , такий параметр, як висота залишкових гребінців  $H$ , на поверхні деталі може визначати в одному випадку відхилення форми, а в іншому – шорсткість обробки. У міру зменшення  $S_{\text{ноп.}}$  висота гребінців буде відповідно зменшуватись (рис. 4).

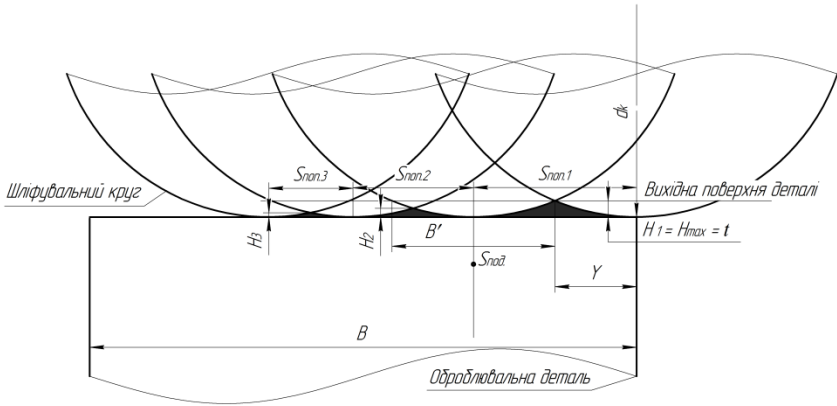


Рисунок 4 – Вплив  $S_{non}$  на висоту залишкових гребінців

$$S_{non.1} = B', \quad S_{non.1} > S_{non.2} > S_{non.3}$$

Тільки при куті нахилу шпинделя  $\alpha = 90^\circ$ , коли торцевий круг стає периферійним (наприклад, при використанні чашково-циліндричних кругів), справедлива класична формула для визначення висоти залишкових гребінців:

$$H = r - \frac{\sqrt{4 \cdot r^2 - S^2}}{2},$$

де  $H$  – висота залишкових гребінців, мм;  $r$  – радіус при вершині різця, мм;  $S$  – поздовжня подача, мм/об.

У нашому випадку ця формула є такою:

$$H = \frac{d_k - \sqrt{4 \cdot \left(\frac{d_k}{2}\right)^2 - S_{non.}^2}}{2} = \frac{d_k - \sqrt{d_k^2 - S_{non.}^2}}{2}.$$

Оскільки в розглянутому процесі шліфувальний круг нахилений під кутом  $\alpha$ , значення якого близьке до нуля, ця формула дає великі похибки, що робить її практично не придатною для використання. Це вимагає встановлення залежності, придатної для практичного використання в умовах плоского торцевого шліфування з нахилом осі шпинделя. Для цього була проведена серія комп'ютерних експериментів у середовищі КОМПАС [9]. Це дозволило встановити характер впливу таких параметрів процесу плоского торцевого багатопрохідного шліфування як  $\alpha$ ,  $d_k$  і  $S_{non}$  на висоту залишкових гребінців.

Дослідження показали, що функції  $H = f(S_{non.})$  і  $H = f(d_k)$  досить добре описуються ступеневими залежностями (рис. 5, 6, 7). Що стосується функції  $H = f(\alpha)$ , то вона лінійна.

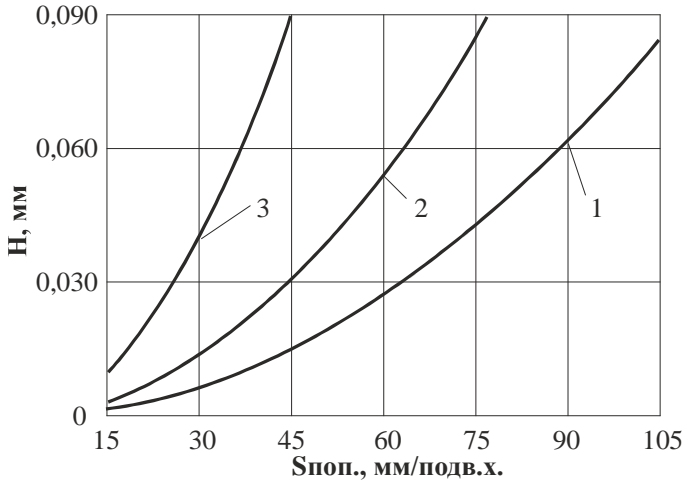


Рисунок 5 – Залежність  $H = f(S_{non.}, \alpha)$  при  $d_k = 150$  мм та  $t = 0,09$  мм  
 1 –  $\alpha = 0,25^\circ$  ( $B \approx 103$  мм);  
 2 –  $\alpha = 0,50^\circ$  ( $B \approx 76$  мм);  $\alpha = 1,5^\circ$  ( $B \approx 33,90$  мм)

Факт зниження висоти гребінців  $H$  при зменшенні значень поперечної подачі і кута нахилу осі шпинделя, а також збільшенні діаметра кола є очевидним і узгоджується з даними, отриманими при шліфуванні на прохід.

Якщо при виходжуванні змістити місце здійснення  $S_{non.}$  (по ширині деталі  $B$ ), наприклад, на величину, рівну половині цієї подачі (щоб здійснювати процес шліфування не «по сліду»), то висоту залишкових гребінців можна істотно знизити навіть у разі обробки з нахилом осі шпинделя.

За допомогою такого підходу можна забезпечити підвищені технічні вимоги креслення щодо допустимих значень шорсткості і відхилень форми.

При особливих вимогах до цих параметрів є додаткова можливість, яка полягає у виходжуванні без нахилу осі шпинделя ( $\alpha = 0^\circ$ ).

Математична обробка результатів експерименту дозволила запропонувати емпіричну залежність, що відображає вплив розглянутих вище факторів на висоту залишкових гребінців  $H$  :

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

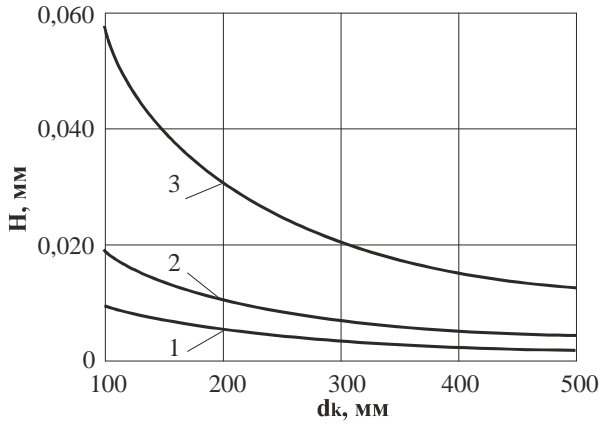


Рисунок 6 – Залежність  $H = f(d_k, \alpha)$  при  $S_{non.} = 30$  мм/подв.х. та  $t = 0,09$  мм  
 1-  $\alpha = 0,25^\circ$  ( $B' \approx 76$  мм); 2-  $\alpha = 0,50^\circ$  ( $B' \approx 103$  мм); 3-  $\alpha = 1,50^\circ$  ( $B' \approx 34$  мм)

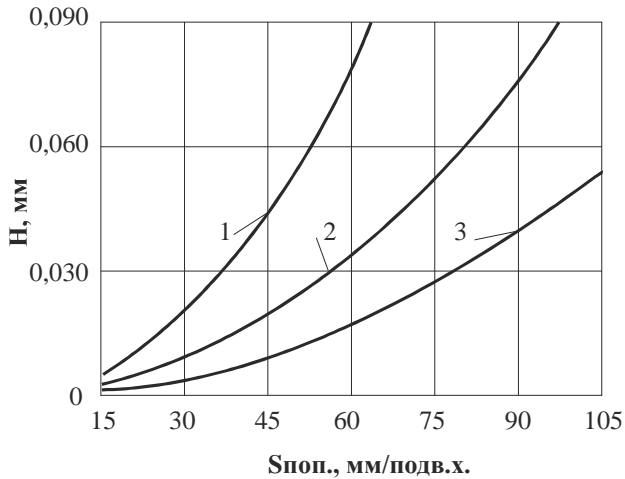


Рисунок 7 – Залежність  $H = f(S_{non.}, d_k)$  при  $\alpha = 0,5^\circ$  та  $t = 0,09$  мм  
 1-  $d_k = 100$  мм; 2-  $d_k = 250$  мм; 3-  $d_k = 500$  мм

Ця залежність отримана в припущенні, що глибина обробки не перевищує 0,1 мм. При використанні її необхідно дотримуватися умови  $S_{non.} \leq B'$ . А для цього необхідно виконати додаткові дослідження щодо



встановлення розрахункової залежності для визначення ширини контакту РПК з деталлю  $B'$  при конкретних умовах обробки.

**Висновки та перспективи подальшого розвитку.** Таким чином, виконані дослідження дозволили виявити деякі особливості формування макро - і мікропрофілю оброблюваної поверхні при багатопрхідному плоскому торцевому шліфуванні з нахилом осі шпинделя. Встановлено роль у цьому процесі таких факторів, як кут нахилу осі шпинделя, діаметр круга й поперечна подача і запропонована емпірична залежність, що зв'язує з ними висоту залишкових гребінців. Усе це дозволяє розширити технологічні можливості процесу плоского торцевого шліфування і, таким чином, сприяє його вдосконаленню.

Надалі становлять певний інтерес дослідження щодо встановлення впливу умов процесу шліфування з нахилом торцевого круга на такі параметри, як ширина, довжина дуги і площа контакту РПК з деталлю як при обробці на прохід, так і при багатопрхідному шліфуванні.

**Список використаних джерел:** 1. *Наерман М.С.* Справочник молодого шлифовщика. / *М.С. Наерман.* -М.: Высшая школа, 1985. -207 с. 2. *Маталин А.А.* Технология машиностроения / *А.А. Маталин.* - Л.: Машиностроение, 1985. - 496 с. 3. *Грабченко А.И.* Расширение технологических возможностей процесса плоского торцевого шлифования / *А.И. Грабченко, И.Н. Пыжов, В.Г. Клименко* // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.–Харьков: 2012.- Вып. 81.-С. 64-75. 4. Пат. 81400 Україна, МПК (2013.01) B24B7/00 B24B21/00. Плоскошлифовальный верстат / *А.И. Грабченко, I.M. Пижов, В.Г. Клименко.* Власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». - № у 2013 01144; заявл. 30.01.2013; опубл. 25.06.2013. Бюл. № 12. 5. *Худобин Л.В.* Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке / *Л.В. Худобин, Е.Г. Бердичевский.* -М.: Машиностроение. - 1977. -189 с. 6. Пат. 82805 Україна, МПК (2013.01) B24B55/00. Пристрій для подачі технологічної рідини в зону шліфування / *А.И. Грабченко, I.M. Пижов, В.Г. Клименко.* Власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». - № у 2013 01933; заявл. 18.02.2013; опубл. 12.08.2013. Бюл. № 15. 7. *P. K. Sen.* [Synthetische Diamant-Abriechtrohlinge für den zukunftigen Industriebedarf.](http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2002_2/16_art/art16_2_02.htm) [http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2002\\_2/16\\_art/art16\\_2\\_02.htm](http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2002_2/16_art/art16_2_02.htm). 8. Пат. 76444 Україна, МПК (2013.01) B24 B 53/00. Спосіб правки торцевих абразивних кругів на шліфовальних верстатах з вертикальним шпинделем / *А.И. Грабченко, I.M. Пижов, С.И. Кравченко, В.Г. Клименко.* Власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». - № у 2012 05634; заявл. 08.05.2012; опубл. 10.01.2013. Бюл. № 1. 9. *Грабченко А.И.* Комп'ютерне моделювання зони контакту торцевого круга з деталлю на плоскошлифовальних верстатах / *А.И. Грабченко, I.M. Пижов, В.Г. Клименко* // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: 2013. –С. 62. 10. *Исаев А.И.* Микрогеометрия поверхности при токарной обработке / *А.И. Исаев.* –М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1950. -108с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Naerman M.S.* Spravochnik mladogo shlifovshhika. / *M.S. Naerman.* -M.: Vysshaja shkola, 1985. -207 s. 2. *Matalin A.A.* Tehnologija mashinostroenija / *A.A. Matalin.* - L.: Mashinostroenie, 1985. - 496 s. 3. *Grabchenko A.I.* Rasshirenie tehnologicheskikh vozmozhnostej processa ploskogo torcovogo shlifovanija / *A.I. Grabchenko, I.N. Pyzhov, V.G. Klimenko* // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb.–Har'kov: 2012.- Vyp. 81.-S. 64-75. 4. Pat. 81400 Ukraїna, MPK (2013.01) B24B7/00 B24B21/00. Ploskoshlifuval'nij verstat / *A.I. Grabchenko, I.M. Pizhov, V.G. Klimenko.* Vlasnik Nacional'nij

tehnichnij universitet «Harkivs'kij politehnichnij institut». - № u 2013 01144; zajavl. 30.01.2013; opubl. 25.06.2013. Bjul. № 12. **5.** Hudobin L.V. Tehnika primenenija smazочно-ohlazhdajushhih sredstv v metalloobrabotke / L.V. Hudobin, E.G. Berdichevskij. -M.: Mashinostroenie. - 1977. -189 s. **6.** Pat. 82805 Ukraïna, MPK (2013.01) B24B55/00. Pristrij dlja podachi tehnologichnoï ridini v zonu shlifuvannja / A.I. Grabchenko, I.M. Pizhov, V.G. Klimenko. Vlasnik Nacional'nij tehnichnij universitet «Harkivs'kij politehnichnij institut». - № u 2013 01933; zajavl. 18.02.2013; opubl. 12.08.2013. Bjul. № 15. **7.** P.K. Sen. Synthetische Diamant-Abrihtrohlinge für den zukunftigen Industriebedarf. [http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2002\\_2/16\\_art/art16\\_2\\_02.htm](http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2002_2/16_art/art16_2_02.htm). **8.** Pat. 76444 Ukraïna, MPK (2013.01) V24 V 53/00. Sposib pravki torcevih abrazivnih krugiv na shlifival'nih verstatah z vertikal'nim shpindelem / A.I. Grabchenko, I.M. Pizhov, S.I. Kravchenko, V.G. Klimenko. Vlasnik Nacional'nij tehnichnij universitet «Harkivs'kij politehnichnij institut». - № u 2012 05634; zajavl. 08.05.2012; opubl. 10.01.2013. Bjul. № 1. **9.** Grabchenko A.I. Komp'juterne modeljuvannja zoni kontaktu torcevogo kruga z detalju na ploskoshlifival'nih verstatah / A.I. Grabchenko, I.M. Pizhov, V.G. Klimenko // Vazhke mashinobuduvannja. Problemi ta perspektivi rozvitku. Materiali mizhnarodnoï naukovno-tehnichnoï konferencii. – Kramators'k: 2013. – S. 62. **10.** Isaev A.I. Mikrogeometrija poverhnosti pri tokarnoj obrabotke / A.I. Isaev. –M.-L.: Izd-vo AN SSSR, 1950. -108s.

*Надійшла до редколегії 28.07.2014*