

УДК 621.923

**І.М. Пижов, професор, д-р техн. наук**

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»*

*вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002*

*diamet@inbox.ru*

**В.Г. Клименко, аспірант**

*Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

*проспект Першотравневий, 24, м. Полтава, Україна, 36011*

*klim\_poltava@mail.ru*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ ВІДХИЛЕНЬ ВІД ПЛОЩИННОСТІ ПРИ ПЛОСКОМУ ТОРЦЕВОМУ ШЛІФУВАННІ**

*Розглянуто питання, пов'язані з особливостями формування увігнутості при плоскому торцевому шліфуванні. Показана визначальна роль кута нахилу круга, його діаметра і ширини оброблюваної поверхні деталі. На основі комп'ютерного моделювання в середовищі КОМПАС запропонована емпірична залежність, що зв'язує увігнутість із зазначеними параметрами і дозволяє на практиці обґрунтовано призначати кут нахилу круга.*

**Ключові слова:** *торцеве шліфування, кут нахилу шпинделя, шліфувальний круг, моделювання.*

**Вступ.** Відомо, що значна кількість виробів у машинобудуванні та інших галузях виробництва потребує технологічних операцій плоского шліфування. При цьому досить широко використовують верстати, що працюють торцем круга. Серед них особливе місце займають верстати з вертикальним розташуванням шпинделя. Вони можуть мати як обертові, так і прямокутні столи [1], [2]. Крім цього знаходять використання двосторонні верстати, на яких можна одночасно обробляти поверхні деталі одразу з обох боків.

Шліфувальні верстати з вертикальним розташуванням шпинделя забезпечують високі показники продуктивності та точності оброблювання при досить низькій шорсткості обробленої поверхні виробів. За умови, що діаметр круга (абразивної голівки) більше ніж ширина робочого столу, оброблення поверхні ведеться, як правило, на прохід, що сприятливо позначається на значеннях вихідних показників обробки. Такі верстати призначені для шліфування плоских поверхонь в умовах масового і серійного типів виробництв. При чорновому шліфуванні шпиндель шліфувальної бабки нахиляють у горизонтальній площині в напрямку поздовжньої подачі. Таким чином, за рахунок зменшення площі контакту робочої поверхні круга (РПК) з деталлю уникають надмірного нагрівання (а, також, і деформації) оброблюваної деталі і досягають значного підвищення продуктивності обробки [1], [2]. У деяких випадках нахил круга сприяє спрощенню подачі технологічної рідини (ТР) у зону шліфування [3]. На етапі чистового шліфування нахил шпинделя зменшують, а на етапі прецизійного оброблення кут нахилу повинен дорівнювати нулю.

Питання розширення технологічних можливостей процесу плоского торцевого шліфування є і в наш час достатньо актуальним. Як свідчать останні публікації, це можливо зробити декількома шляхами. Вони полягають в удосконаленні конструкцій плоскошліфувальних верстатів за рахунок реалізації ряду прогресивних технічних рішень. Ці рішення дозволяють: 1. забезпечити умови для реалізації на верстаті ідеї шліфування в суцільному шарі ТР і створити можливість застосування комбінованих процесів шліфування; 2. удосконалити конструкцію пристроїв для ефективного подання ТР в зони шліфування та правки круга; 3. здійснювати контроль за ступенем заповнення цих зон ТР; 4. підвищити ефективність процесу правки робочої поверхні абразивних кругів алмазними олівцями. 5. зменшити площу контакту РПК з деталлю за рахунок попереднього нахилу осі шпинделя та ін. Розглянемо докладніше технічну суть цих розробок.

1. В основі запропонованих технічних рішень лежить конструкція плоскошліфувального верстата з вертикальним шпинделем [4]. Новим є те, що верстат оснащено додатковим електродвигуном, вал якого встановлений співвісно зі шпинделем і механічно пов'язаний з ним за допомогою муфти зі змінним пружним елементом. При цьому напівмуфту, розміщену на шпинделі, встановлено з можливістю реалізації або робочого, або холостого ходу; пристрій для зливу технологічної рідини виконаний з можливістю ступінчастої або плавної зміни її рівня у ванні щодо рівня зони шліфування. Робоча частина пристосування складається з двох ділянок; при цьому правлячий катод встановлений на ділянці, прилеглої до периметра робочої поверхні пристосування, а ширина ділянки для розміщення оброблюваних виробів береться менше внутрішнього діаметру круга. Таким чином, запропонована конструкція верстата дозволяє, по-перше, здійснювати як попереднє (за умови, що рівень зливного отвору знаходиться вище за рівень зони шліфування); так і остаточне шліфування (за умови, що рівень

зливного отвору знаходиться нижче за рівень зони шліфування); по-друге, використання додаткового електродвигуна, пов'язаного зі шпинделем за допомогою механічної муфти зі змінним пружним елементом, дозволяє істотно підвищити ефективність попереднього шліфування за рахунок створення механічних коливань (вібрацій) шпинделя, а, отже, і шліфувального круга (тобто реалізовується процес вібраційного шліфування). У цілому, електрохімічна правка круга значно розширює технологічні можливості процесу шліфування.

2. Відомо, що для ефективного подання ТР (у зонах шліфування та правки) треба робити це у внутрішню порожнину круга. Найбільш просто та ефективно це можна здійснити у разі наявності на верстаті полого шпинделя. В інших випадках - за допомогою спеціального пристрою [5]. Для цього використовується стакан, зовнішня торцева поверхня якого знаходиться в механічному контакті з базовим торцем круга, а бічна внутрішня поверхня нахилена до осі обертання круга під гострим кутом, причому порожнина стакана сполучається з внутрішньою порожниною круга за допомогою наскрізних пазів. Новим у пристрої є те, що стакан виконаний як одне ціле зі змінною оправкою, його зовнішній торць є базовою поверхнею для установавлення шліфувального круга, на торці шайби, який сполучається з внутрішнім торцем круга, а також на утворюючих направляючого циліндричного поясочка змінної оправки утворені не наскрізні по глибині пази, причому пази на шайбі виходять в радіальному напрямку у внутрішню порожнину круга, а пази на циліндричному поясочку виконані таким чином, що з одного боку вони виходять у порожнину стакана, а з другого сполучаються з радіальними пазами на торці шайби.

3. Для здійснення контролю за ступенем заповнення ТР зон шліфування та правки запропоновано оригінальний спосіб, заснований на використанні непрямого критерію [6]. Новим є те, що використовують шліфувальний круг, ТР і оброблювану деталь, які є провідниками електричного струму. Круг і деталь підключають до різнойменних полюсів джерела постійного технологічного струму; круг, що обертається, підводять до деталі до дотику, включають подачу ТР, замикають електричний ланцюг, здійснюють депасивацію робочої поверхні круга і вимірюють величину технологічного струму в зазорі між кругом і деталлю, а як непрямий критерій оцінювання ступеня наповнення зони шліфування ТР використовують щільність технологічного струму. Шляхом підбору характеристики алмазного круга цей спосіб можна використовувати і для прогнозування ступеня заповнення ТР зони шліфування у разі використання звичайних абразивних кругів.

4. Що стосується процесу правки абразивних кругів алмазними олівцями, то це завдання може бути вирішене мінімум трьома шляхами. По-перше за рахунок удосконалення конструкції та технології виготовлення алмазних олівців, а по-друге, за рахунок реалізації процесу правки у суцільному шарі ТР. У першому випадку на алмази, призначені для використання в олівці, наносять рельєфне металеве покриття, мінімальну товщину якого беруть не менше 0,1 мм, після чого їх закріплюють у державці [7]. Встановлено, що наявність товстошарового рельєфного покриття суттєво підвищує силу утримання полікристалів алмазу в державці, а також їх загальний строк служби. У другому випадку підвищення загального строку служби олівців досягається тим, що у зоні контакту алмазу з РПК забезпечується мінімально низький рівень температури. Це позитивно позначається на загальному терміні служби алмазних олівців, бо температура є одним із факторів який суттєво впливає на абразивну стійкість алмазу. Це стає можливим завдяки тому, що процес правки виконують у суцільному шарі ТР, що гарантовано забезпечує надійність процесу охолодження алмазу [8]. Третій шлях полягає у використанні прогресивних марок синтетичного алмазу, наприклад, CVD алмазу [9].

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

Запропоновані вище пропозиції дозволяють суттєво підвищити ефективність процесу торцевого шліфування на верстатах з вертикальним шпинделем.

У наших дослідженнях за основу прийнято схему плоского торцевого шліфування з нахилом осі шпинделя. Її недоліком 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. Аналіз джерел інформації показав відсутність на даний час досліджень, пов'язаних з особливостями формування відхилень форми плоских поверхонь за такої схеми обробки. А в умовах шліфування з нахилом вісі обертання шпинделя на кут  $\alpha$  вони неминучі [1], [2]. Не врахування цього факту може призвести до значного відсотка браку виробів.

**Метою даної статті є виявлення особливостей формування відхилення від площинності при плоскому торцевому шліфуванні з нахилом осі шпинделя.**

**Основний зміст роботи.** Процес плоского торцевого шліфування може бути реалізований на практиці як за звичайною (класичною), так і глибинною схемами шліфування, що залежить від напрямку поздовжньої подачі стола верстата відносно напрямку кута нахилу вісі шпинделя  $\alpha$  (рис. 1).

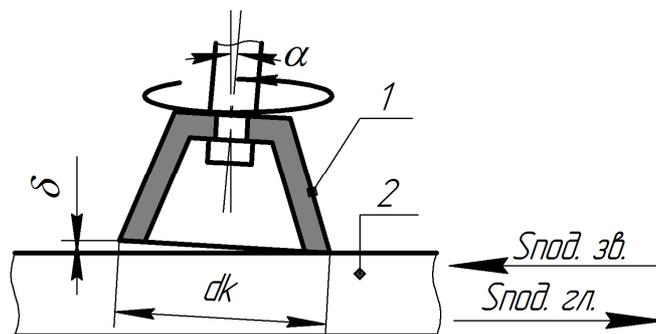


Рисунок 1 – Ілюстрація звичайної ( $S_{под. зв.}$ ) та глибинної ( $S_{под. зл.}$ ) схем шліфування

У випадку шліфування на прохід діаметр круга  $d_k$  повинен перевищувати ширину оброблюваної поверхні деталі  $B$ . При цьому бажано, щоб і мінімальний діаметр круга  $d_{k \min}$  також був більший, ніж ширина  $B$  (рис. 2).

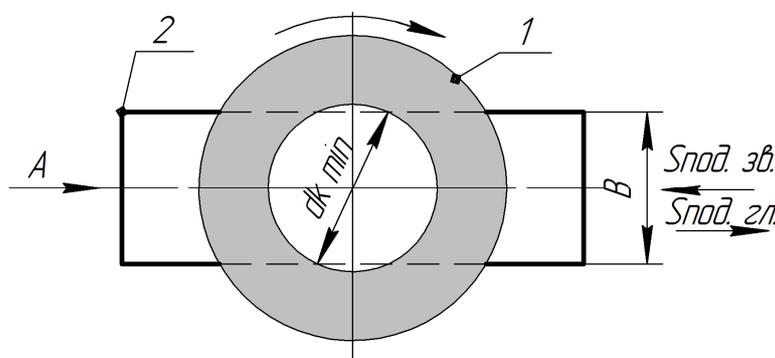


Рисунок 2 – До ілюстрації схем шліфування

Як було зазначено вище, спосіб плоского торцевого шліфування, заснований на повороті вісі обертання шпинделя на кут  $\alpha$  у напрямі поздовжнього переміщення стола верстата, має суттєвий недолік. Він полягає у появі відхилень від площинності. І чим більше ширина оброблюваної поверхні при шліфуванні на прохід, тим більші значення відхилень від площинності будуть мати місце. У літературних джерелах немає чітких рекомендацій щодо визначення величини кута нахилу  $\alpha$ . Лише вказуються значення зазору між кругом і деталлю:  $\delta=2$  мм для чорнового і  $\delta=0,05$  мм для чистового шліфування (рис. 1) [1], [2].

При цьому не враховується такий фактор, як діаметр круга, який безпосередньо впливає на величину кута. Якщо РПК занурена в оброблювану поверхню на глибину  $t$  і практично повністю знаходиться в контакті з деталлю (глибинна схема за умови, що  $B \geq d_k$ ), кут нахилу змінюється за законом:

$$\alpha = \arcsin \left( \frac{t}{d_k} \right).$$

У своїх дослідженнях ми враховували той факт, що для забезпечення технічних вимог щодо відхилення від площинності потрібно мати чітко визначену величину кута нахилу  $\alpha$ , причому з урахуванням того, що на відхилення форми плоскої поверхні окрім нього мають вплив і інші фактори. До них відносяться зовнішній діаметр торцевого круга  $d_k$ , а також ширина оброблюваної поверхні деталі  $B$ .

На рисунку 3 наведено схему утворення відхилення від площинності  $\Delta$  у процесі плоского торцевого шліфування на прохід (симетрична схема обробки). Як видно з рисунку, при першому проході  $\Delta$  дорівнює глибині шліфування, тобто  $\Delta_1 = t$ . Надалі, у міру здійснення декількох проходів з глибиною шліфування  $t$ , величина  $\Delta$  поступово зростає і дорівнює значенню  $\Delta_i$ . При цьому довжина дуги контакту РПК з поверхнею деталі також поступово зростає (від  $l_1$  до  $li$ ). У випадку, коли РПК почне

контактувати з деталлю по всій ширині оброблювальної поверхні ( $B = B_{max}$ ), маємо, що  $\Delta = \Delta_{max} = const$ , а  $l = l_{max} = const$ . Тобто, чим більше ширина обробки  $B$  (при постійних значеннях інших параметрів), тим більше і відхилення  $\Delta$ .

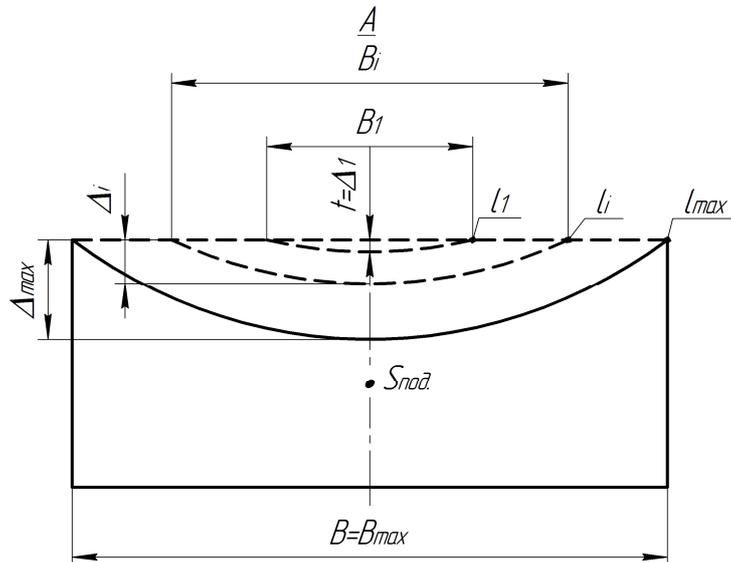


Рисунок 3 – Схема утворення відхилення від площинності  $\Delta$  при плоскому торцевому шліфуванні

Для встановлення залежності відхилення  $\Delta$  від зазначених вище факторів були проведені дослідження шляхом комп’ютерного моделювання у середовищі КОМПАС [10].

Результати моделювання показали, що функції  $\Delta = f(B)$  та  $\Delta = f(d_k)$  достатньо коректно можна описати степеневими залежностями (рис. 4, 5).

Таким чином, чим більше значення діаметру круга  $d_k$  і менше величини ширини деталі  $B$  та кута нахилу  $\alpha$ , тим менші значення відхилення  $\Delta$  будуть мати місце при плоскому торцевому шліфуванні і навпаки. Виконані дослідження дозволили отримати узагальнену емпіричну залежність відхилення  $\Delta$  від указаних факторів. Ця залежність має вигляд:

$$\Delta = 0.013 \cdot d_k^{-1,196} \cdot \alpha \cdot B^{2,026} \tag{1}$$

Таким чином, наведена формула для визначення рівня відхилення від площинності (у даному випадку її окремого випадку – увігнутості), враховує зв’язок  $\Delta$  з діаметром круга, шириною оброблювальної деталі та величиною кута  $\alpha$ .

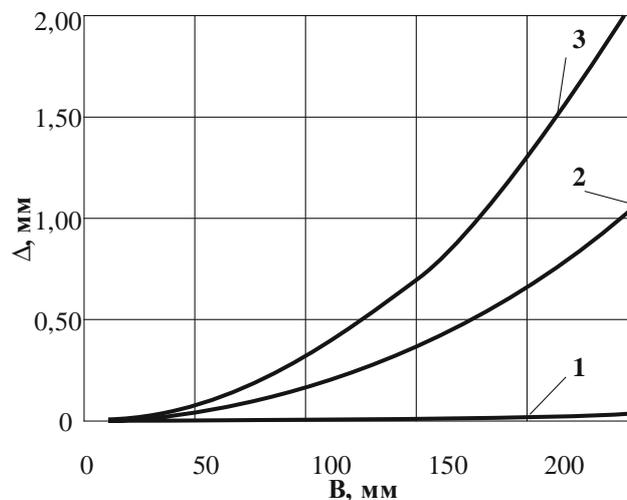


Рисунок 4 – Графік залежності  $\Delta = f(B)$  при  $d_k = 400$  мм: 1 –  $\alpha = 0,05^\circ$ ; 2 –  $\alpha = 1,40^\circ$ ; 3 –  $\alpha = 2,75^\circ$

Що стосується впливу кута нахилу вісі обертання шпинделя  $\alpha$ , то він має лінійний характер (рисунок 6).

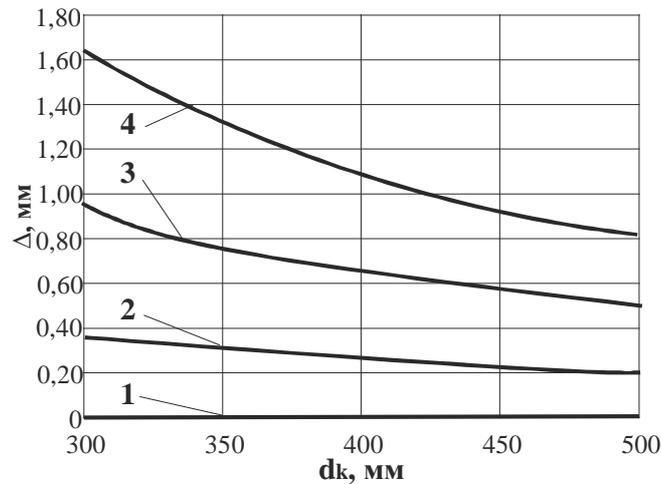


Рисунок 5 - Графік залежності  $\Delta = f(d_k)$  при  $\alpha = 1,4^\circ$ :  
1 -  $B = 10$  мм, 2 -  $B = 130$  мм, 3 -  $B = 200$  мм, 4 -  $B = 250$  мм

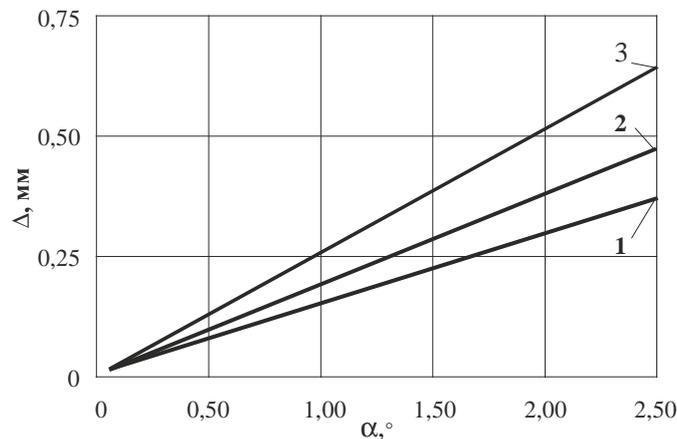


Рисунок 6 - Графік залежності  $\Delta = f(\alpha)$  при  $B = 130$  мм: 1 -  $d_k = 500$  мм; 2 -  $d_k = 400$  мм; 3 -  $d_k = 300$  мм

На основі формули (1) маємо, що величина кута  $\alpha$  при конкретних значеннях  $d_k$ ,  $B$  і технічних вимог креслення щодо відхилення  $\Delta$  (тобто його гранично допустимої величини  $[\Delta]$ ) повинна підкорятися залежності:

$$\alpha \leq \frac{[\Delta]}{0,013 \cdot d_k^{-1,196} \cdot B^{2,026}} \quad (2)$$

Це дозволяє на практиці для конкретної технологічної операції (чорнова, чистова чи прецизійна) при відомих значеннях діаметра круга та ширини оброблювальної поверхні достатньо точно визначити максимально допустиме значення кута  $\alpha$ , при якому відхилення від площинності буде знаходитися у допустимих межах, а отже уникнути браку шліфованих виробів з цієї причини. Окрім цього стає можливою і зворотна задача – визначення величини кута  $\alpha$  (при відомих  $d_k$ ,  $B$ ) у разі необхідності шліфування поверхонь із заздалегідь утвореною увігнутістю (профільне шліфування). Все це дозволяє суттєво розширити технологічні можливості процесу плоского торцевого шліфування в цілому.

Слід зазначити, що знання такого параметра процесу обробки, як відхилення від площинності, має практичне значення і у процесі розробки технологічної операції плоского торцевого шліфування у складі конкретного технологічного процесу виготовлення виробу. Мається на увазі те, що це дозволяє визначити кількість проходів ( $i$ ) з глибиною  $t$  на етапі чистової обробки з метою зменшення відхилення від площинності у разі її наявності на поверхні деталі:

$$i = \frac{\Delta_{\max}}{t}$$

**Висновки.** Таким чином, виконані розробки дозволили виявити деякі особливості формування відхилення від площинності (у даному випадку – увігнутості) при плоскому торцевому шліфуванні. Запропонована узагальнена експериментальна залежність для розрахунку кута нахилу вісі обертання шпинделя залежно від діаметра круга, ширини шліфування до допустимого значення відхилення від площинності. Це створює передумови для подальшого розширення технологічних можливостей процесу плоского торцевого шліфування.

**Перспективи подальших досліджень у даній галузі.** Надалі викликає інтерес дослідження впливу умов обробки на зміну площі контакту РПК з поверхнею оброблювальної деталі.

#### **Бібліографічний список використаної літератури**

1. Лоскутов В.В. Шлифовальные станки / В.В. Лоскутов. – М.: Машиностроение, 1976. – 191 с.
2. Наерман М. С. Справочник молодого шлифовщика. / М.С. Наерман. – М: Высш. шк., 1985. — 207 с.
3. Пат. 2162788 Российская Федерация, МПК7 В24В55/02. Способ подачи смазочно-охлаждающей технологической смеси в зону шлифования / Ю.С. Степанов, Б.И. Афонасьев, С.А. Куценко, Г.А. Харламов, М.Г. Подзолков; патентообладатель и заявитель Орловский государственный технический университет. -99107768/02; заявл. 07.04.1999; опубл. 10.02.2001. Бюл. №4.
4. Пат. 81400 Україна, МПК (2013.01) В24В7/00 В24В21/00. Плоскошліфувальний верстат. / А.І. Грабченко, І.М. Пижов, В.Г. Клименко. Власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». - № u 2013 01144; заявл. 30.01.2013; опубл. 25.06.2013. Бюл. № 12.
5. Пат. 82805 Україна, МПК (2013.01) В24В55/00. Пристрій для подачі технологічної рідини в зону шліфування. / А.І. Грабченко, І.М. Пижов, В.Г. Клименко. Власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». - № u 2013 01933; заявл. 18.02.2013; опубл. 12.08.2013. Бюл. № 15.
6. Пат. 84041 Україна, МПК (2013.01) В24В 1/00 В24В55/00. Спосіб оцінки ступеня наповнення зони шліфування технологічною рідиною / А.І. Грабченко, І.М. Пижов, В.О. Федорович, В.Г. Клименко. Власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». - № u 2013 04078; заявл. 02.04.2013; опубл. 10.10.2013. Бюл. № 19.
7. Пат. 74681 Україна, МПК (2012.01) В24 В 53/00. Спосіб виготовлення алмазного олівця / А.І. Грабченко, І.М. Пижов, В.О. Федорович, В.Г. Клименко. Власник Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка - № u 2012 04084; заявл. 03.04.2012; опубл. 12.11.2012. Бюл. № 21.
8. Пат. 76444 Україна, МПК (2013.01) В24 В 53/00. Спосіб правки торцевих абразивних кругів на шліфувальних верстатах з вертикальним шпинделем. / А.І. Грабченко, І.М. Пижов, С.І. Кравченко, В.Г. Клименко. Власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». - № u 2012 05634; заявл. 08.05.2012; опубл. 10.01.2013. Бюл. № 1.
9. Sen P.K. Synthetische Diamant-Abrichtrohlinge für den zukunfftigen 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).
10. Грабченко А.І. Комп'ютерне моделювання зони контакту торцевого круга з деталлю на плоскошліфувальних верстатах / А.І. Грабченко, І.М. Пижов, В.Г. Клименко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ, 2013. – С. 62.

*Надійшла до редакції 27.01.2014 р.*

#### **Пыжов И.Н., Клименко В.Г. Исследование особенностей формирования отклонений от плоскостности при плоском торцевом шлифовании**

Рассмотрены вопросы, связанные с особенностями формирования вогнутости при плоском торцевом шлифовании. Показана определяющая роль угла наклона круга, его диаметра и ширины обрабатываемой поверхности детали. На основе компьютерного моделирования в среде КОМПАС предложена эмпирическая зависимость, связывающая вогнутость с отмеченными параметрами и позволяющая на практике обоснованно назначать угол наклона круга.

**Ключевые слова:** торцевое шлифование, угол наклона шпинделя, шлифовальный круг, моделирование.

#### **Pyzhov I.N., Klimenko V.G. Study of the features of flatness error formation at flat face grinding**

The problems linked to the features of concavity formation at flat face grinding are considered. The essential role of the inclination angle of grinding wheel, wheel diameter and width of the surface to-be-machined of the workpiece are shown. On the basis of computer-aided simulation using software package COMPAS an empirical dependence which links the concavity with pointed out parameters and makes it possible in practice to set reasonably the angle of grinding wheel inclination are proposed.

**Keywords:** face grinding, spindle rotation angle, grinding wheel, simulation