

В. І. Лавріненко

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля
НАН України, м. Київ, Україна
lavrinen52@gmail.com

Явище відставання значень експлуатаційних показників шліфувальних кругів, викликане формозміною ріжучої поверхні круга в радіальному напрямку під час алмазно-абразивної обробки

У процесі торцевого шліфування за умов багатопрохідної та глибинної обробки ріжуча поверхня круга набуває формозмін у радіальному напрямку. У разі досягнення критичної продуктивності шліфування, коли ріжуча поверхня круга не має резервів для збільшення, подальше підвищення продуктивності призводить до різкого зростання зносу кругів. Оскільки площа ріжучої поверхні круга надалі є стабільною, може відбуватися явище відставання значень експлуатаційних показників шліфувальних кругів у разі зменшення продуктивності шліфування за такої сталої площі. Таке відставання спостерігали для показників зносу кругів, питомої енергоємності та ефективної потужності шліфування, але не для показників шорсткості. Показано, що ріжучу поверхню круга можна припрацювати на величину критичної продуктивності, коли площа ріжучої поверхні досягає максимуму, і надалі працювати з меншими за критичні показниками продуктивності обробки, гарантовано досягаючи зменшення зносу круга та енергоємності обробки.

Ключові слова: *формозміна ріжучої поверхні шліфувального круга, критична продуктивність шліфування, знос круга, питома енергоємність обробки, алмазно-абразивна обробка, показники шорсткості.*

У разі фрикційного контакту двох тіл відбувається взаємна формозміна їхніх контактних поверхонь. У процесі шліфування також присутнє це явище, але відміна полягає в тому, що формозміна оброблюваного матеріалу відбувається достатньо швидко, а абразивного – повільно. Водночас від стану і формозміни ріжучої поверхні круга в значній мірі залежать вихідні показники процесу шліфування. Формозміна ріжучої поверхні круга відбувається як в радіальному напрямку (утворюється поперечний макропрофіль робочої поверхні круга), так і в коловому напрямку (повздовжній макропрофіль робочої поверхні круга). Тобто, насправді в процесі шліфування з оброблювальною поверхнею контактує не вся поверхня круга, а лише її частина.

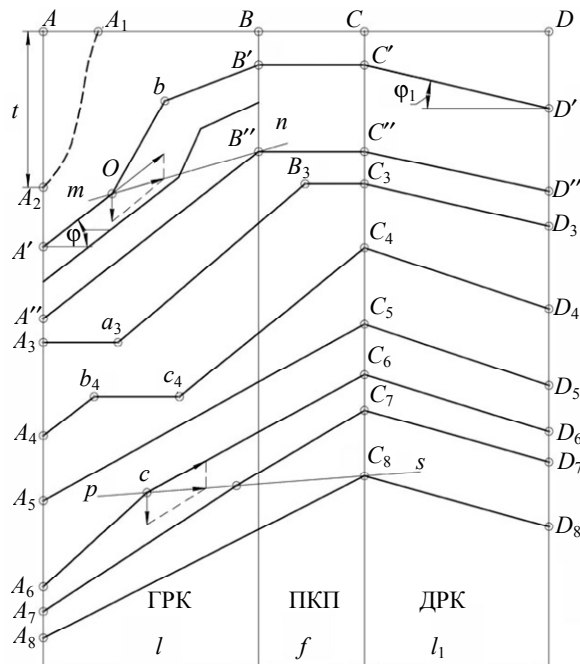
Дослідники останнього часу приділяють увагу дослідженню стану різальної поверхні алмазних кругів [1–4], особливо топографії. Під час оцінки топографії різальної поверхні круга треба враховувати, що в процесі шліфування з оброблювальною поверхнею контактує не вся поверхня круга, а лише її частина в результаті формозміни на поверхні круга. Це підтверджується сучасними дослідженнями [4–6], де вказано на формозміну робочої поверхні круга у коловому напрямку, коли є частина поверхні, відповідальна за зняття припуску, і та частина, що не приймає у цьому участь [4]. Тобто, під час дос-

лідження топографії робочої поверхні треба враховувати, на якій частині робочої площі круга знаходиться ділянка, де оцінюють топографію. Це явище, на думку дослідників, можна використати для підвищення ефективності процесу шліфування твердосплавних виробів [7] або виробів з полікристалічних надтвердих матеріалів [8].

У представленій роботі автором досліджено поперечний макропрофіль робочої поверхні круга під час алмазно-абразивної обробки, тобто певну формозміну у процесі шліфування ріжучої поверхні круга в радіальному напрямку, а також вплив на зміну експлуатаційних показників шліфувальних кругів у разі зміни продуктивності обробки. Переважно дослідники нехтують вказаною формозміною і вважають, що вся ріжуча поверхня круга є відповідальною за знімання матеріалу за оберт круга, але такого не відбувається у реальних умовах шліфування. В [4] детально розглянуто особливості формозміни поверхні круга в радіальному напрямку, що є найбільш характерним для методів обробки з подовжньою подачею – багатопрохідного та глибинного.

Профіль ріжучої поверхні круга, який утворюється у разі торцевого шліфування, є поєднанням двох ріжучих конічних поверхонь – головної (ГРК) та допоміжної, поділених перехідним коловим паском. Дослідженнями автора встановлено, що твірна AB ГРК поверхні (рисунок) з кутом нахилу ϕ може формуватися двома способами: в перехідному процесі вона буде увігнутою або вигнутою. Увігнута твірна є характерною для профілю, який утворюється вперше, і для неї процес припрацювання проходить три стадії (розглянуто для ширини робочого шару круга $l + f + l_1$, що дорівнювала 10 мм):

– перша – ~ 10 г знятого матеріалу, точка A (див. рисунок) рухається до точок A_1 і A_2 радіально (до A_1) і різко до низу форми профілю (до A_2), так, що відстань AA_2 дорівнює глибині обробки t ;



Послідовна зміна профілю поперечного перерізу ріжучої поверхні круга за різних умов шліфування з подовжньою подачею: головна (ГРК) і допоміжна (ДРК) ріжучі конічні поверхні, перехідний коловий пасок (ПКП).

– друга – ~ 250 г знятого матеріалу, точка A_1 зміщується до точки B , причому таке переміщення відбувається радіально;

– третя – > 250 г знятого матеріалу, у нижній частині профілю з'являється відрізок $A'a$, який має нахил з кутом φ , у процесі припрацювання точка a рухається у двох напрямках: вздовж твірної з кутом φ та у напрямку зносу, у кінцевому підсумку рух точки a здійснюється по прямій $m-n$, після того, як точка потрапляє в точку B'' , завершується перший етап припрацювання і утворюється нестабільний трапецієподібний профіль $A''B''C''D''$. Після визначення на початку цієї стадії напрямку та швидкості руху точки a вздовж твірної ГРК поверхні, а також швидкість зносу, можна розрахувати момент закінчення припрацювання, коли твірна $A''B''$ є прямою лінією.

Подальшими дослідженнями встановлено, що і після припрацювання ріжуча поверхня круга має “повзучі” зміни. Спочатку ГРК поверхня зміщується приблизно на половину первісної ширини колового паска (див. рисунок), причому таке зрушення A_3a_3 відбувається паралельно B_3C_3 . Надалі ГРК поверхня поділяється на дві частини. Нижній пасок b_4c_4 починає зміщуватися вгору вздовж твірної, і в нижній частині профілю, починаючи від точки A_4 , з'являється новий ріжучий конус. У подальшому верхній коловий пасок B_3C_3 зникає, а нижній b_4c_4 у процесі руху вгору до точки C_4 зменшується і далі утворюється трикутний профіль ріжучої поверхні круга, що і характеризує повне завершення етапу його припрацювання. З підвищенням режимів шліфування трикутна форма профілю надалі не змінюється.

Складнішою є кінематика зміни профілю у разі переходу від більш інтенсивних режимів обробки до менш інтенсивних. У цьому разі в нижній частині профілю від точки A_6 (див. рисунок) зароджується твірна нового ріжучого конусу з кутом φ більшим, ніж у A_5C_5 . Однак у подальшому кут φ зменшується, наближаючись до вихідного, а точка C , по аналогії з точкою a , описаною вище, переміщується по прямій $p-s$ і у підсумку двох рухів потрапляє у точку C_8 . Утворений в результаті таких еволюцій профіль $A_8C_8D_8$ повністю відповідає вихідному $A_5C_5D_5$.

Тобто, під час торцевого жорсткого шліфування ріжуча поверхня круга в радіальному перерізі набуває сталої трикутної форми профілю $A_8C_8D_8$, для якої характерним є рівномірний (еквідистантний) знос. Для типових умов металообробки, у разі досягнення стабільної трикутної форми профілю, площа ріжучої поверхні круга, що відповідає за знімання матеріалу, складає лише 70–75 % від загальної [4]. А відтак, якщо надалі підвищується продуктивність обробки, площі ріжучої поверхні стає недостатньо для шліфування і, як наслідок, зростає навантаження в зоні контакту.

В [9] автором, на основі урахування таких формозмін, висунуте наступне положення: характерний перегин кривої продуктивність шліфування–знос круга у процесі торцевого шліфування з подовжньою подачею є межею між зоною роботи круга з наявністю явища формозміни ріжучої поверхні в радіальному напрямку та зоною з відсутністю такого явища, а продуктивність, що відповідає цьому перегину, визначена як критична продуктивність шліфування.

На основі цього положення та запропонованого в [10] механізму абразивного зносу зерен отримано формулу для розрахунку критичної продуктивності шліфування Q , яка для умов торцевого шліфування кругами з надтвердих матеріалів (НТМ), має наступний вигляд [9]:

$$Q = k_{\phi} k_n k_{\text{пер}} \frac{S_n \left(D - 2 \frac{S_n}{\text{tg } \phi} \right) \arcsin \left(\frac{h}{D - 2 \frac{S_n}{\text{tg } \phi}} \right)}{0,5625 \alpha D \sin \phi} \cdot \frac{H_p v_k}{ZH_m},$$

де k_{ϕ} – коефіцієнт неповного використання ріжучої поверхні круга за його оберт, враховує формозміну круга ($k_{\phi} = 0,4$ – для жорсткого торцевого шліфування, $k_{\phi} = 0,55$ – для пружного та врізного торцевого шліфування); k_n – коефіцієнт, що враховує зменшення реальної кількості зерен, які є відповідальними за знімання припуску, викликане їхнім нахилом у робочому шарі; $k_{\text{пер}}$ – коефіцієнт, що враховує зменшення перерізу зрізу зерном, яке викликане його нахилом; S_n – поперечна подача, яка дорівнює глибині обробки t (див. рисунок); Z – зернистість НТМ (за розміром нижнього сита); H_p – показник міцності зерен НТМ у процесі руйнування; H_m – твердість обробного матеріалу; v_k – швидкість обертання круга; h – висота виробу, що піддається обробці; D – зовнішній діаметр круга; ϕ – головний кут профілю у радіальному перерізі круга; α – ізометричність зерен НТМ.

Для виведення формули в [10] було прийнято припущення, які не в повній мірі враховували формозміну ріжучої поверхні круга, тому це додатково враховано введенням коефіцієнта неповного використання ріжучої поверхні круга за його оберт (k_{ϕ}).

Аналіз наведеної вище формули показав, що у разі заданих типорозміра круга і характеристик його робочого шару можна вплинути на зміну критичної продуктивності шліфування зміною двох показників – v_k та H_p . Зміною швидкості обертання круга можна як підвищити критичну продуктивність шліфування, так і зменшити, наприклад, перевести процес шліфування кераміки у зону пластичності [11]. Підвищити критичну продуктивність шліфування можна підвищенням значення показника міцності зерен НТМ їхньою термообробкою, що детально описано в [12].

У разі збільшення продуктивності шліфування форма ріжучої поверхні круга у радіальному перерізі набуває форми трикутника, де більша зовнішня частина відповідає за знімання припуску на основному ходові, а менша – на зворотному. Тобто, як би не збільшували далі продуктивність, подальшого збільшення площі ріжучої поверхні круга не відбувається і знос круга зростає. Автором було розглянуто, що відбувається з експлуатаційними показниками круга, якщо після досягнення найбільшої площі ріжучої поверхні круга знижувати продуктивність (таблиця), чи будуть вони співпадати з показниками, що отримані після зростання продуктивності. Якщо показники не співпадають, то виникає явище своєрідного “гістерезису” – відставання експлуатаційних показників круга під час повернення до вихідних показників. Звичайно, є певна умовність використання терміну “гістерезис”, але, на думку автора, саме він є найбільш близьким до визначення явища відставання експлуатаційних показників круга.

Припустимо, що може виникнути явище відставання або умовного “гістерезису”, адже спочатку, у разі збільшення продуктивності, перемінна твірна (A_1A_2) переходить у пряму (A_5C_5), а у разі зменшення продуктивності твірна вже не є прямою (A_6C_6), але далі знову стає прямою – A_8C_8 (див. рисунок). Перевірку цього припущення проводили під час шліфування з охолодженням оксидної кераміки марки VO13 алмазним кругом 12A2-45° 150×10×3×32 AC4 100/80 B2-08 100 (круг був у вихідному стані після виготовлення, тобто

без наявності будь-якої формозміни у радіальному напрямку). Продуктивність шліфування послідовно збільшували від 500 до 3000 мм³/хв, а потім, після утворення сталої твірної А₅С₅, продуктивність зменшували у зворотному напрямку. Експлуатаційні показники шліфувального круга наведено в таблиці.

Експлуатаційні показники шліфувального круга 12А2-45° 150×10×3×32 АС4 100/80 В2-08 100 у разі шліфування з охолодженням оксидної кераміки ВО13 з різною продуктивністю

Продуктивність шліфування, мм ³ /хв	Ефективна потужність шліфування, кВт	Відносні витрати алмазів, мг/г	Шорсткість обробленої поверхні Ra, мкм	Питома енергоємність шліфування E _{пит} , кДж/кг
Прямий напрямок (збільшення продуктивності)				
500	0,25	1,1	0,16	37,7
1000	0,30	2,0	0,25	41,2
1500	0,40	3,7	0,53	67,7
2000	0,45	5,1	0,58	87,4
3000	0,80	41,0	0,82	749,7
Зворотній напрямок (зменшення продуктивності)				
2500	0,40	9,1	0,50	99,8
2000	0,37	3,1	0,51	39,4
1500	0,37	2,2	0,37	37,2
1000	0,25	1,3	0,26	22,2
500	0,20	0,7	0,16	19,2

З аналізу даних таблиці можна зробити наступні висновки:

– явище “гістерезису” чітко спостерігали для зміни відносних витрат алмазів в крузі під час шліфування та для питомої енергоємності E_{пит} шліфування, тобто, коли маємо зворотне зменшення продуктивності (з більшою ріжучою поверхнею круга), то відносні витрати на третину, а E_{пит} фактично наполовину є меншими;

– явище “гістерезису” спостерігали, але було меншим для ефективної потужності шліфування.

– для шорсткості поверхні за параметром Ra явище “гістерезису” фактично не спостерігали.

Тобто, це означає, що для досягнення менших показників зносу круга та E_{пит} шліфування необхідно відразу припрацювати ріжучу поверхню круга поза критичну продуктивність, а за умовами таблиці вона складає 2000 мм³/хв, що надає можливість отримати найбільшу площу ріжучої поверхні круга. Далі можна шліфувати з меншою, ніж критична, продуктивністю та отримувати гарантовано менші показники зносу та E_{пит} обробки. На показники шорсткості така маніпуляція з ріжучою поверхнею круга фактично не впливає. Разом з тим, як встановлено, показники опорної кривої t₂₀ та t₅₀ на рівні 20 та 50 % R_{max} у разі збільшення продуктивності обробки спочатку зростають, досягаючи максимуму за критичної продуктивності обробки, а потім зменшуються, фактично повертаючись у вихідний стан. Це означає, що після повернення до меншої продуктивності, у разі досягнення найбільшої ріжучої площі круга, залишиться меншою наповненість профілю мікронерівностей шліфованої

поверхні і збільшити її за такого варіанта можливості немає. Тобто, тільки допоки зростає ріжуча поверхня круга (ріжуча поверхня круга має резерв для зростання) у разі збільшення продуктивності, зростають і показники опорної кривої t_{20} та t_{50} і зростає наповненість профілю мікронерівностей.

З врахуванням наявності формозмін ріжучої поверхні круга у радіальному напрямку свого часу було створено шліфувальні круги форми 12V5 для глибинного шліфування (ГОСТ 16177–82 або СТ СЭВ 2505–80) з наперед створеним нахилом робочого шару з кутом 15° . Тобто, вважали, що зі створенням такого нахилу можна виключити процес припрацювання та економити тим самим робочий шар круга. Але такі круги не мають широкого застосування саме через особливості, що набуває ріжуча поверхня круга в процесі шліфування зі змінною продуктивністю обробки.

В [13] було показано, що під час оцінки $E_{\text{пит}}$ обробки в процесі алмазно-абразивній обробки треба враховувати зношуваність інструмента, яким проводять обробку. Враховуючи особливості алмазно-абразивної обробки, під час шліфування кругами з надтвердих матеріалів це має принципове значення, адже якщо круг зношується дуже швидко, то це збільшує $E_{\text{пит}}$ шліфування і навпаки.

Для розрахунку питомої енергоємності $E_{\text{пит}}$ шліфування автор скористався формулою з [13], яка враховує зношуваність круга через відносні витрати зерен НТМ в крузі:

$$E_{\text{пит}} = \frac{E}{m} = \frac{240 \cdot 10^5 N_{\text{эф}} q_p}{QK\gamma_{\text{НТМ}}},$$

де $N_{\text{эф}}$, кВт – ефективна потужність шліфування; q_p , мг/г – відносні витрати зерен НТМ в крузі під час шліфування; Q , мм³/хв – продуктивність шліфування; K , % – відносна концентрація зерен НТМ в крузі; $\gamma_{\text{НТМ}}$, г/см³ – густина зерен НТМ.

Автором було досліджено інструментальну оксидну кераміку VO13 яка складається на 99 % з оксиду алюмінію, це дало можливість оцінити $E_{\text{пит}}$ її плавлення. Для Al₂O₃ вона складає 1108 кДж/кг [14], а для цієї кераміки $E_{\text{пит}} \approx 1100$ кДж/кг.

Аналіз даних для $E_{\text{пит}}$ шліфування (див. таблицю) показав, що істотне (до 3000 мм³/хв) перевищення критичної продуктивності, яка складає для даного випадку 2000 мм³/хв, значно підвищує $E_{\text{пит}}$ шліфування (до 750 кДж/кг) і вона починає наблизитися до питомої теплоти плавлення кераміки (~ 1100 кДж/кг). Тобто, це дозволяє переводити обробку в зону пластичності, що у разі обробки керамік може бути актуальним [11, 15]. Традиційний метод оцінки $E_{\text{пит}}$ за відношенням потужності шліфування до продуктивності обробки не дає адекватного рішення, оскільки в такому разі питома теплоємність оброблення майже на порядок перевищує питому теплоємність плавлення керамік, тобто, за будь-якої алмазної обробки кераміки відразу маємо потрапляти у режим пластичності, чого реально не відбувається. Тому саме застосування нового підходу до оцінки $E_{\text{пит}}$ алмазного шліфування з урахуванням зношування робочого шару алмазного круга дозволяє оцінити можливість досягнення енергетичних умов переходу обробки кераміки у пластичний режим [11].

ВИСНОВКИ

Під час торцевого шліфування з подовжньою подачею за умов радіальної формозміни ріжучої поверхні шліфувального круга у разі зворотної зміни продуктивності обробки існує явище відставання експлуатаційних показників або умовного “гістерезису”. Це явище спостерігали для відносних витрат

алмазів в крузі під час шліфування та для питомої енергоємності шліфування (тобто, коли маємо зворотнє зменшення продуктивності з більшої ріжучої поверхні круга, то відносні витрати на третину, а питома енергоємність фактично наполовину є меншими).

Для ефективної потужності шліфування явище “гістерезису” спостерігали, але воно було незначним. Для шорсткості поверхні за параметром Ra це явище фактично не спостерігали.

Для досягнення менших показників зносу круга та питомої енергоємності шліфування необхідно припрацювати ріжучу поверхню круга за критичну продуктивність, що надає можливість отримати найбільшу площу ріжучої поверхні круга і надалі шліфувати з меншою, ніж критична, продуктивністю, з отриманням гарантовано менших показників зносу круга та питомої енергоємності обробки.

V. I. Lavrinenko

Bakul Institute for Superhard Materials,

National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The phenomenon of lagging in operational values indicators of grinding wheels, called shape change of the cutting surface of the wheel in the radial direction during diamond abrasive processing

During face grinding under the conditions of multi-pass and deep processing, the cutting surface of the circle acquires a shape change in the radial direction. With the achievement of critical grinding performance, when the cutting surface of the wheel has no reserves to increase, the further increase in performance leads to a sharp increase in the wear of the wheels. Since the area of the cutting surface of the wheel is stable in the future, there may be a lag in the values of the operational indicators of grinding wheels in case of a decrease in the productivity of grinding at such a constant area. Such a lag was observed for wheel wear indicators, specific energy intensity and effective grinding power, but not for roughness indicators. It is shown that the cutting surface of the wheel can be adjusted to the value of the critical productivity, when the area of the cutting surface reaches a maximum, and further work with less than the critical indicators of processing productivity, guaranteed to achieve a reduction in wheel wear and energy consumption of processing.

Keywords: *shape change of the cutting surface of the grinding wheel, critical grinding performance, wheel wear, specific energy intensity of processing, diamond-abrasive processing, roughness indicators.*

1. Бабенко Е.А., Фадеев В.А., Федорович В.А., Фидлер Ф. Определение износа режущей поверхности алмазного шлифовального круга путем исследования его 3D топографии. Резание и инструмент в технологических системах: *Межд. науч.-техн. сб. Харьков: НТУ “ХПИ”, 2011. Вып. 80. С. 15–21.*
2. Доброскок В.Л., Шпилька А.Н., Котляров В.Б. Получение триангуляционной модели рельефа рабочей поверхности шлифовальных кругов. *Резание и инструмент в технологических системах: Межд. науч.-техн. сб. Харьков: НТУ “ХПИ”, 2014. Вып. 84. С. 85–92.*
3. Qiuyan W., Zhiqiang L., Xibin W., Wenxiang Zh., Tianfeng Zh., Yongbo W., Pei Ya. Modeling surface topography in ultra-precision grinding process. *The 6th Int. Conf. of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN2015)*, 15–20 Aug., 2015, Harbin, China.
4. Лавріненко В.І., Новіков М.В. Надтверді абразивні матеріали в механообробці: енциклопедичний довідник / під заг. ред. акад. НАН України М.В. Новікова. Київ: ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2013. 456 с.
5. Кудрявцева Н.Н., Орлова Т.Н. Влияние вязко-упругих свойств модифицированной органической связки на снижение интенсивности автоколебаний при шлифовании. *Процес-*

- сы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. *Шлифабразив-2009: Сб. статей Междунар. науч.-техн. конф.* Волгоград: ВолгГАСУ, 2010. С. 168–171.
6. Wang S., Zhao Q., Guo B. Wear characteristics of electroplated diamond dressing wheels used for on-machine precision truing of arc-shaped diamond wheels. *Diam. Relat. Mater.* 2022. Vol. 129, November, art. 109372.
 7. Дитиненко С.А., Крюк А.Г. Прецизионная алмазно-абразивная обработка цилиндрических твердосплавных изделий. *Фізичні та комп'ютерні технології. Матеріали XXIII науково-технічної конференції*, 21–22 грудня 2017 р., Харків–Одеса: ОНПУ, 2018. С. 122–129.
 8. Грабченко А.И., Дюбнер Л.Г., Пыжов И.Н. Повышение эффективности обработки ПСТМ на основе использования явления периодичности процесса шлифования. *Резание и инструмент в технологических системах: Межд. науч.-техн. сб.* Харьков: НТУ “ХПИ”. 2011. Вып. 80. С. 43–55.
 9. Lavrinenko V. Grinding wheels of superhard materials for diamond-abrasive processing: new in the famous. Kyiv: Akadempriodyka, 2019. 190 p.
 10. Крагельский И.В., Ямпольский Г.Я. О механизме абразивного износа. *Изв. ВУЗов. Физика.* 1968. № 11. С. 81–87.
 11. Lavrinenko V.I., Solod V.Yu. Determining the conditions for achieving the plastic regime of diamond grinding of ceramics from the standpoint of estimating energy costs of processing. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 1. P. 65–71.
 12. Ільницька Г.Д., Лавріненко В.І., Смоквіна В.В. Алмази для шліфувального інструменту, отримані в різних системах / за ред. д.т.н, професора В.І. Лавріненка. Київ: Наук. думка, 2021. 167 с.
 13. Lavrinenko V.I. To the analysis of the estimate of energy expenditures in the diamond abrasive treatment by wheels from superhard materials. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 4. P. 285–291.
 14. Физико-химические свойства окислов: Справ. / под ред. Г.В. Самсонова. Москва: Металлургия, 1978. 472 с.
 15. Kovalchenko A.M. Studies of the ductile mode of cutting brittle materials (A review). *J. Superhard Mater.* 2013. Vol. 35, no. 5. P. 259–276.

Надійшла до редакції 04.01.23

Після доопрацювання 17.02.23

Прийнята до опублікування 20.02.23